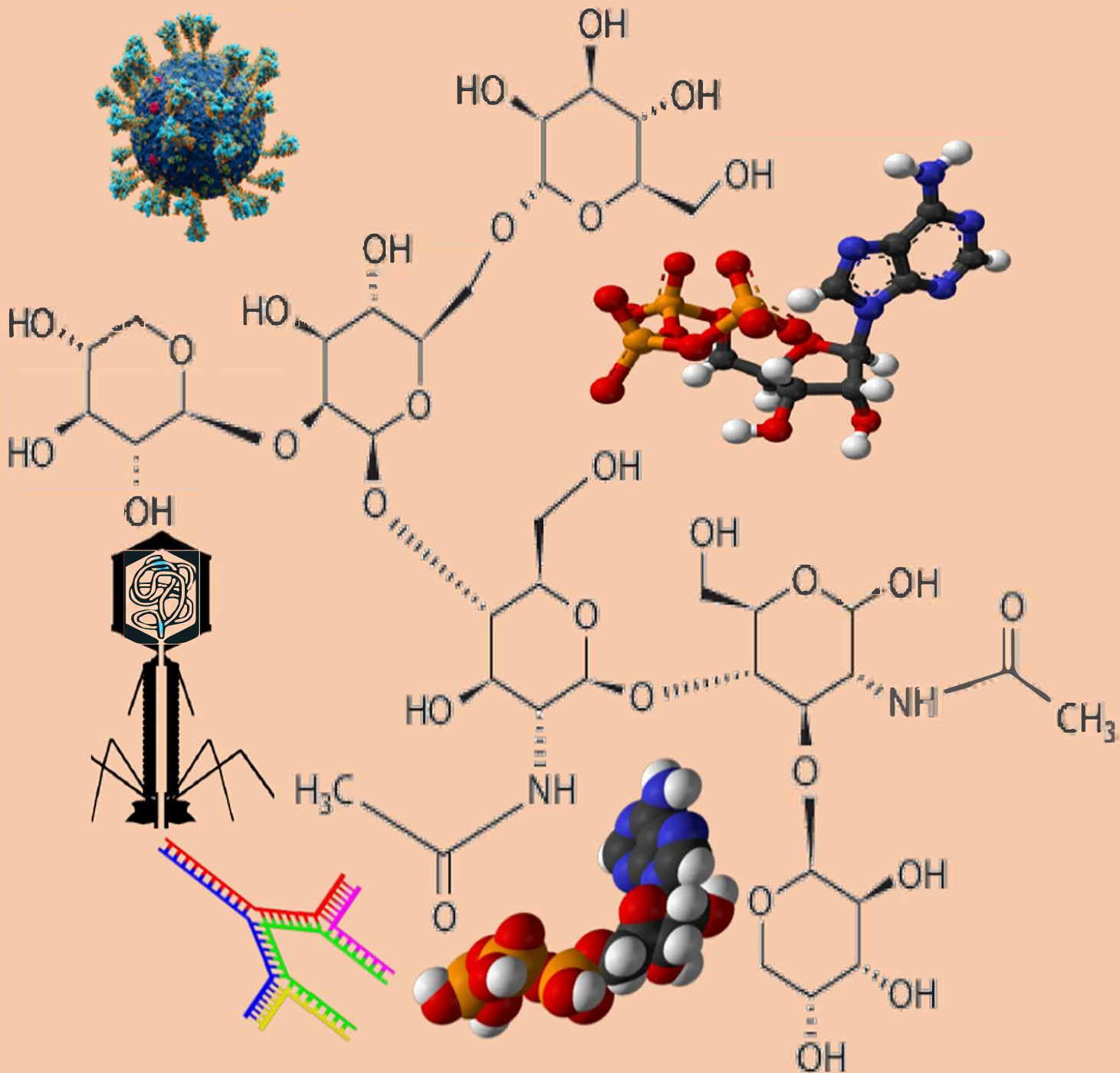


BAHAN AJAR BIOKIMIA 1

BERBASIS KONSTRUKTIVISME 5 FASE NEEDHAM



Disusun Oleh:

Drs. Made Sukaryawan, M.Si., Ph.D

Dr. Diah Kartika Sari, M.Si

BUKU AJAR BIOKIMIA 1
BERBASIS KONSTRUKTIVISME 5 FASE NEEDHAM

Drs. Made Sukaryawan, M.Si., Ph.D
Dr. Diah Kartika Sari, M,Si.

Buku Ajar Biokimia 1
Berbasis Konstruktivisme 5 Fhase Needham
copyright © Februari 2022

Penulis : Drs. Made Sukaryawan, M.Si., Ph.D
Dr. Diah Kartika Sari, M.Si.
Setting Dan Layout : Ardatia Murty
Desain Cover : Nur Sharfina Aprilianti

Hak Penerbitan ada pada © Bening media Publishing 2022
Anggota IKAPI No. 019/SMS/20

Hakcipta © 2022 pada penulis
Isi diluar tanggung jawab percetakan

Ukuran 21 cm x 29,7 cm
Halaman : ii + 530 hlm

Hak cipta dilindungi Undang-undang
Dilarang mengutip, memperbanyak dan menerjemahkan sebagian
atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Bening media
Publishing

Cetakan I, Februari 2022



Jl. Padat Karya
Palembang – Indonesia
Telp. 0823 7200 8910
E-mail : bening.mediapublishing@gmail.com
Website: www.bening-mediapublishing.com

ISBN : 978-623-5854-50-2

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Puji syukur kehadirat Allah Subhanahu Wata'ala senantiasa kami ucapkan, atas rahmat dan karunia-Nya yang berupa iman dan kesehatan akhirnya kami dapat menyelesaikan bahan ajar Biokimia 1 berbasis Kostruktivisme Lima Fhasa Needham. Pelaksanaan proses pembelajaran biokimia 1 dapat dilakukan baik secara luring maupun daring dengan melakukan beberapa inovasi, sehingga mahasiswa memperoleh pengalaman belajar yang kontekstual. Walaupun dilakukan secara daring proses pembelajaran untuk meningkatkan kemampuan berpikir kreatif dan inovatif tetap terus dikembangkan dengan memperkaya pengalaman yang bermakna melalui persoalan pemecahan masalah.

Kimia sebagai produk merupakan pengetahuan kimia yang berupa fakta, konsep, hukum dan prinsip. Kimia sebagai proses berkaitan dengan bagaimana proses penemuan pengetahuan. Dengan demikian, apabila kimia disajikan secara utuh sebagai produk, proses dan sikap, maka akan dihasilkan mahasiswa yang terampil dalam berpikir tingkat tinggi. Berpikir tingkat tinggi adalah salah satu kemampuan yang harus dimiliki mahasiswa sebagai bekal untuk menghadapi perkembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK). Proses berpikir tingkat tinggi mahasiswa seperti berpikir kritis, kreatif dan inovatif terus dikembangkan agar mampu bersaing di era digital. Mahasiswa saat ini merupakan era *digital natives* yaitu generasi yang lahir pada era digital, lebih banyak di dalam kehidupannya mengisi dengan menggunakan komputer, dan berbagai macam perangkat yang diproduksi di abad digital. Generasi *digital natives* menganggap perangkat komunikasi sebagai bagian integral dari kehidupan yang tidak dapat dipisahkan dengan teknologi. Pengembangan inovasi pembelajaran yang berbasis digital sudah menjadi kebutuhan untuk berlangsungnya proses pembelajaran.

Pada proses pembelajaran biokimia 1 mahasiswa diminta untuk merencanakan, merancang dan melaksanakan proyek yang berhubungan dengan materi perkuliahan. Materi perkuliahan tersebut dihubungkan dengan permasalahan kehidupan sehari-hari yang ada pada lingkungan daerahnya masing-masing.

Kemudian mahasiswa menyelesaikan dan membahas permasalahan tersebut, sehingga dapat menguji hipotesis mereka sendiri. Data hasil proyek yang telah dilakukan digunakan sebagai bahan diskusi untuk memperoleh suatu kesimpulan melalui elaborasi baik secara luring maupun daring. Selanjutnya mahasiswa membuat laporan hasil proyek, dan mensubmit ke Link yang sudah di tentukan. Mahasiswa dalam melaksanakan proyek diharapkan dapat mematuhi standar operasional prosedur yang telah ditetapkan. Dengan demikian diharapkan proses pelaksanaan pembelajaran biokimia 1 dapat berjalan lancar, tertib, aman dan terkendali. Akhirnya kami pengampu mata kuliah biokimia 1 mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung serta membantu dalam kegiatan dari persiapan sampai selesainya penyusunan buku ini.

Palembang, 25 Februari 2022,
Penulis,

Drs. Made Sukaryawan, M.Si., Ph.D

Dr. Diah Kartika Sari, M.Si

DAFTAR ISI

1. Kata Pengantar	1
2. Daftar Isi	3
3. BAB 1 PONDASI BIOKIMIA	6
A. Logika Molekuler Organisme Hidup	6
B. SEI	12
C. Virus	31
D. Reproduksi Sel	38
4. BAB 2 BIOMOLEKUL	55
A. Senyawa Karbon	55
B. Polisakarida	60
C. Lipid	61
D. Protein	63
E. Asam Nukleat	65
F. Air	67
5. BAB 3 ASAM AMINO	98
A. Sifat Kimia Asam Amino	98
B. Klasifikasi Asam Amino	102
C. Ionisasi Asam Amino	105
D. Reaksi Asam Amino	108
E. Pemisahan Asam Amino	113
6. BAB 4 PROTEIN	125
4.1 Penggolongan dan Reaksi Protein	125
A. Sifat-sifat Protein	125
B. Ciri-Ciri Protein	127
C. Penggolongan Protein	131
D. Fungsi Biologi Protein	132
E. Struktur Protein	134
F. Reaksi Protein	136

4.2 Pemisahan dan Pemurnian Protein	145
A. Dialisis	145
B. Kromatografi Kolom	146
C. Kromatografi Penukar Ion	148
D. Gel Filtrasi	149
E. Kromatografi Afinitas	151
F. Elektroforesis	152
G. SDS Page	152
H. Pemfokusan Isoelektrik	154
I. Elektroforesis 2 Dimensi	156
J. Penentuan Urutan Asam Amino dalam Protein	157
4.3 Struktur Protein	169
A. Struktur Primer Protein	169
B. Struktur Sekunder Protein	170
C. Struktur Tersier Protein	176
D. Struktur Kwarterner Protein	179
7. BAB 5 ENZIM	193
5.1 Sifat dan Fungsi, Gugus Prostetik dan Reaksi Enzim	193
A. Klasifikasi Enzim	196
B. Enzim Sebagai Biokatalisator	197
5.2 Kinetika dan Reaksi Enzim	229
A. Kinetika Reaksi Enzim	229
B. Inhibisi Reaksi Enzim	240
8. BAB 6 HORMON, ANTIGEN, ANTIBODI, VITAMIN DAN MINERAL	254
A. Hormon	254
B. Antigen dan anti bodi	272
C. Vitamin	298
D. Mineral	315
9. BAB 7 KARBOHIDRAT	326
A. Struktur Karbohidrat	327
B. Sifat Fisika dan Kimia Karbohidrat	329
C. Klasifikasi Karbohidrat	330

D. Struktur Cincin Aldopentosa	337
E. Anomer	340
F. Oligosakarida dan Polisakarida	344
G. Reaksi Karbohidrat	361
10. BAB 8 LIPID DAN MEMBRAN	371
A. Asam Lemak	371
B. Struktur Triasilgliserol	376
C. Lilin	380
D. Membran Lipid	381
E. Gliserol Posfolipid	382
F. Galaktolipid	384
G. Membran Lipid Arkea	385
H. Membran dan sistem transport	393
11. BAB 9 PENCERNAAN MAKANAN	420
A. Mulut	422
B. Faring	425
C. Esofagus	425
D. Lambung	426
E. Usus Halus	429
F. Usus Besar	431
G. Rectum	432
12. BAB 10 BIOENERGITIKA	438
A. Bioenergitika dan Termodinamika	445
B. Energi Bebas	446
C. Sel Membutuhkan Energi	447
D. Entropi	452
13. BAB 11 FHOTOSINTESIS	471
A. Proses Fotosintesis	473
B. Reaksi Terang	476
C. Siklus Calvin	483
D. Fotosintesis Pada Tanaman C3, C4 Dan Cam	500
14. Rencana Pembelajaran Semester	515

BAB 1 PONDASI BIOKIMIA

1. ORIENTASI

A. LOGIKA MOLEKULER ORGANISME HIDUP

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa mampu bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (CPMK-1), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah mahasiswa mampu menunjukkan sikap tanggungjawab untuk memahami falsafah biokimia (Sub-CPMK1). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

Biokimia adalah ilmu yang mempelajari proses kimiawi yang terjadi di dalam makhluk hidup. Makhluk hidup pada hakikatnya sebagai salah satu makhluk ciptaan Tuhan Yang Maha Esa, dengan tugas-tugas mulia yang diembanya. Biokimia menanyakan bagaimana sifat luar biasa dari organisme hidup muncul dari ribuan biomolekul yang berbeda. Studi biokimia menunjukkan bagaimana kumpulan biomolekul tersebut, berinteraksi satu sama lain untuk mempertahankan dan melanggengkan kehidupan. Beberapa hal penting yang perlu dipelajari dalam biokimia yaitu:

1. Struktur Biomolekul
2. Fungsi Biomolekul
3. Metabolisme Biomolekul

Makhluk hidup sangat dinamis, perilakunyapun mudah berubah, untuk mempelajari makhluk hidup dapat di dekati melalui ciri-cirinya atau karakteristiknya. Adapun karakteristik makhluk hidup diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Makhluk hidup disusun dari molekul yang kompleks terorganisasi secara rapih. Makhluk hidup diperlengkapi struktur internal yang ruwet, dan mengandung banyak molekul kompleks.

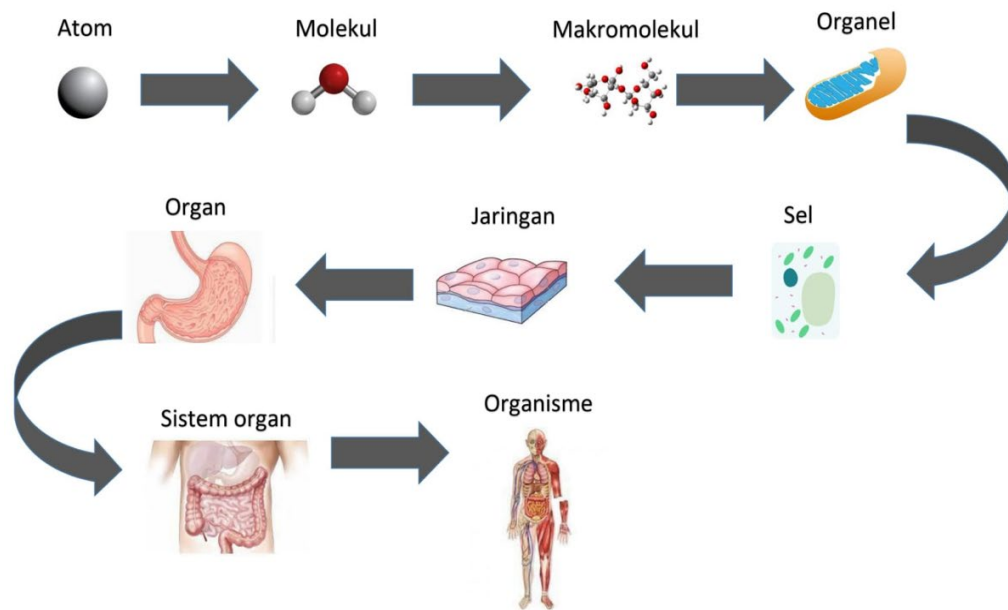
2. Tiap komponen pembentuk makhluk hidup mempunyai fungsi khusus, hal ini berlaku baik pada struktur makroskopik, seperti otak, jantung, paru-paru, maupun struktur mikroskopik seperti inti sel, protein, lemak yang mempunyai fungsi khusus.
3. Makhluk hidup dapat memanfaatkan energi, artinya makhluk hidup mampu mengekstrak, mengubah dan menggunakan energi lingkungannya. Pemanfaatan energi lingkungannya digunakan untuk mempertahankan struktur kompleksnya untuk melangsungkan kehidupan.
4. Makhluk hidup dapat menduplikasi diri artinya makhluk hidup memiliki kemampuan untuk melakukan replikasi diri secara tepat.
5. Makhluk hidup dapat mentransformasi energi, seperti tumbuh-tumbuhan yang memiliki klorofil dapat mengubah cahaya matahari menjadi energi kimia dalam bentuk adenosin triposfat.

Adapun karakteristik makhluk hidup dalam kehidupan sehari-hari anda dapat melihat pada link video berikut ini:

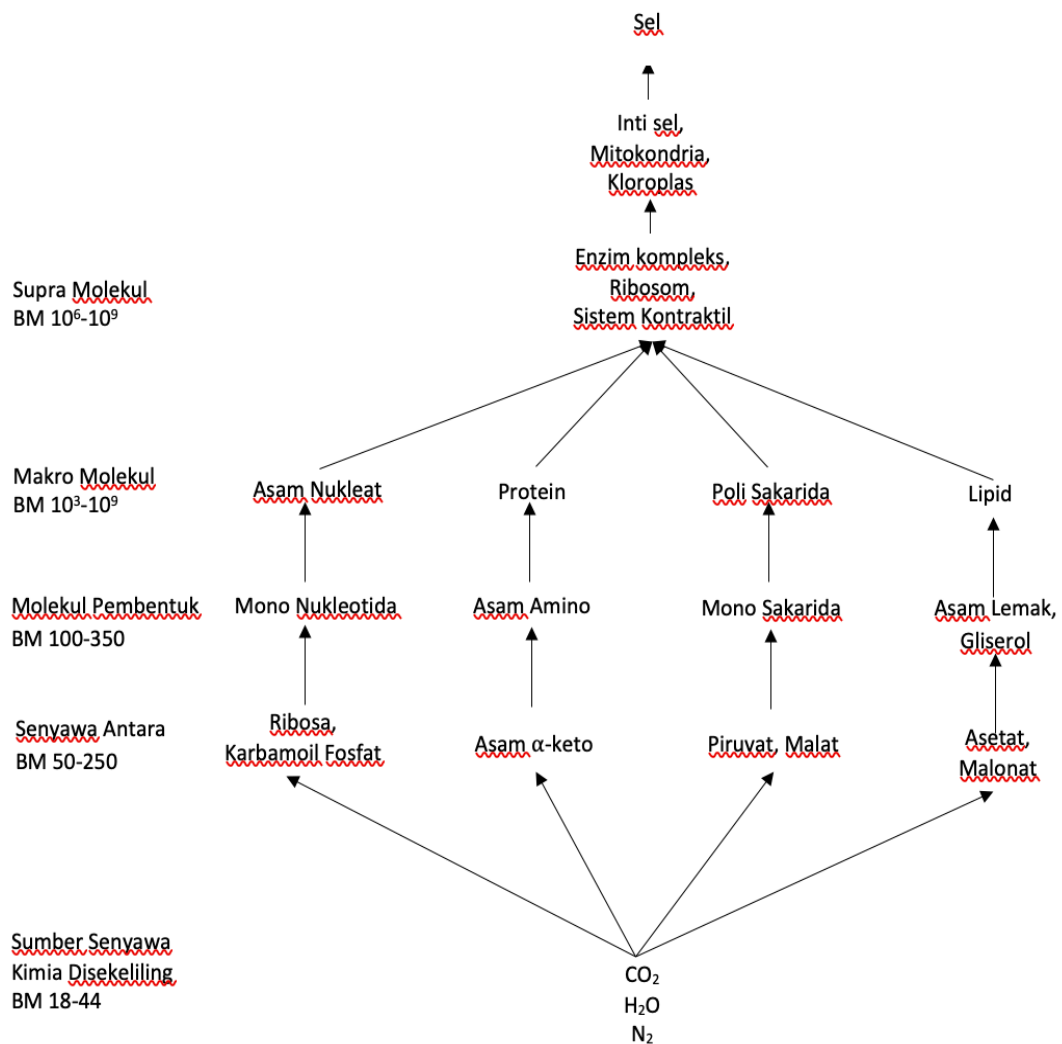


Gambar 1 Karakteristik Makhluk Hidup
Sumber: Sukaryawan & Sari, 2021

Makhluk hidup ditinjau dari segi penyusunnya terbentuk dari molekul-molekul yang berinteraksi satu sama lain secara rapih. Adapun hierarki penyusun makhluk hidup dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 2. Hierarki penyusun makhluk hidup



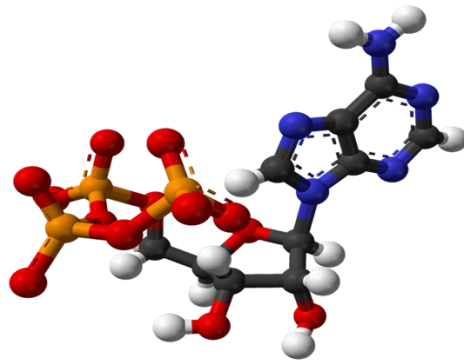
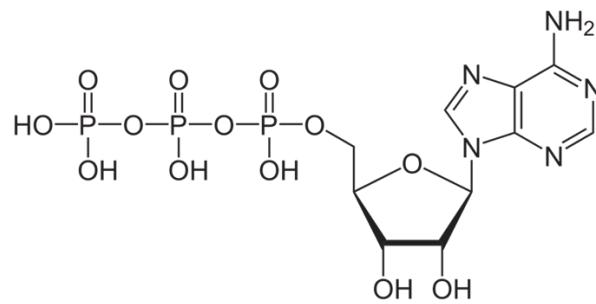
Gambar 3. Penyusun Sel

Molekul-molekul yang membentuk organisme hidup mengikuti hukum-hukum kimia yang telah di kenal, molekul-molekul ini berinteraksi satu dengan yang lain, yang di sebut sebagai logika molekuler keadaan hidup. Pada umumnya komponen penyusun makhluk hidup merupakan senyawa organik yang berunsur atom karbon, yang secara kovalen mengikat atom-atom lainnya seperti hidrogen, nitrogen, sulfur dan lain-lain. Molekul-molekul ini selanjutnya membentuk makro molekul atau biomolekul organisme hidup. Biomolekul menjalankan fungsinya masing-masing di dalam sel. Sel menggunakan energi kimia untuk melangsungkan kerja kimia pada proses pertumbuhan sel, kerja osmotik, transfortasi, system gerak dan lain-lain.

Pada umumnya reaksi-reaksi kimia yang terjadi pada makhluk hidup berlangsung di dalam sel, dan merupakan reaksi yang terjadi secara enzimatik. Reaksi enzim jauh lebih efisien dibandingkan reaksi menggunakan katalisator anorganik, karena molekul enzim lebih spesifik, daya katalisatornya jauh lebih besar, dan dapat berfungsi pada kondisi suhu dan kosentrasi ion hidrogen normal. Enzim dapat mengkatalisa dalam waktu beberapa detik dan berlangsung dengan sempurna menghasilkan produk atau rendemen 100 persen, tanpa ada produk samping. Enzim adalah protein aktif yang berfungsi sebagai biokatalisator, mengkatalisis reaksi-reaksi yang terjadi pada organisme hidup. Reaksi-reaksi enzimatik pada umumnya terjadi dalam proses metabolisme. Reaksi metabolisme diatur secara cermat, sehingga reaksi yang terjadi hanya reaksi yang di butuhkan oleh sel.

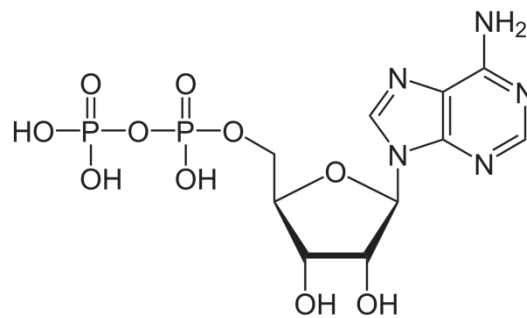
Sel hidup memperoleh, menyimpan dan mengangkut energi dalam bentuk adenosin triposfat atau ATP. Adenosin triposfat dapat memindahkan energinya ke biomolekul lain dengan cara memecahkan ikatan fosfatnya menjadi molekul adenosin difosfat atau ADP. Molekul ADP dapat kembali mengikat gugus fosfat menjadi ATP dengan bantuan energi pada proses fotosintesis, atau energi kimia pada sel-sel hewan. Adenosin trifosfat merupakan penyambung utama antara dua rangkaian reaksi enzimatik di dalam sel. Salah satu rangkaian ini menyimpan energi kimia yang berasal dari lingkungan, melangsungkan fosforilasi ADP yang berenergi kecil, menjadi molekul ATP yang berenergi tinggi. Adapun struktur Adenosin trifosfat adalah sebagai berikut.

Struktur ATP

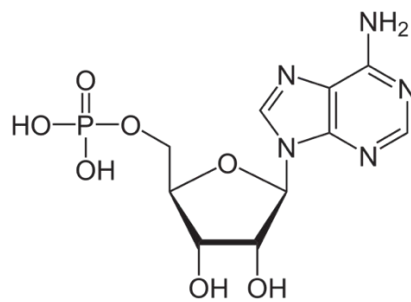


Berikut dapat di lihat struktur adenosin difosfat, dan adenosin monofosfat.

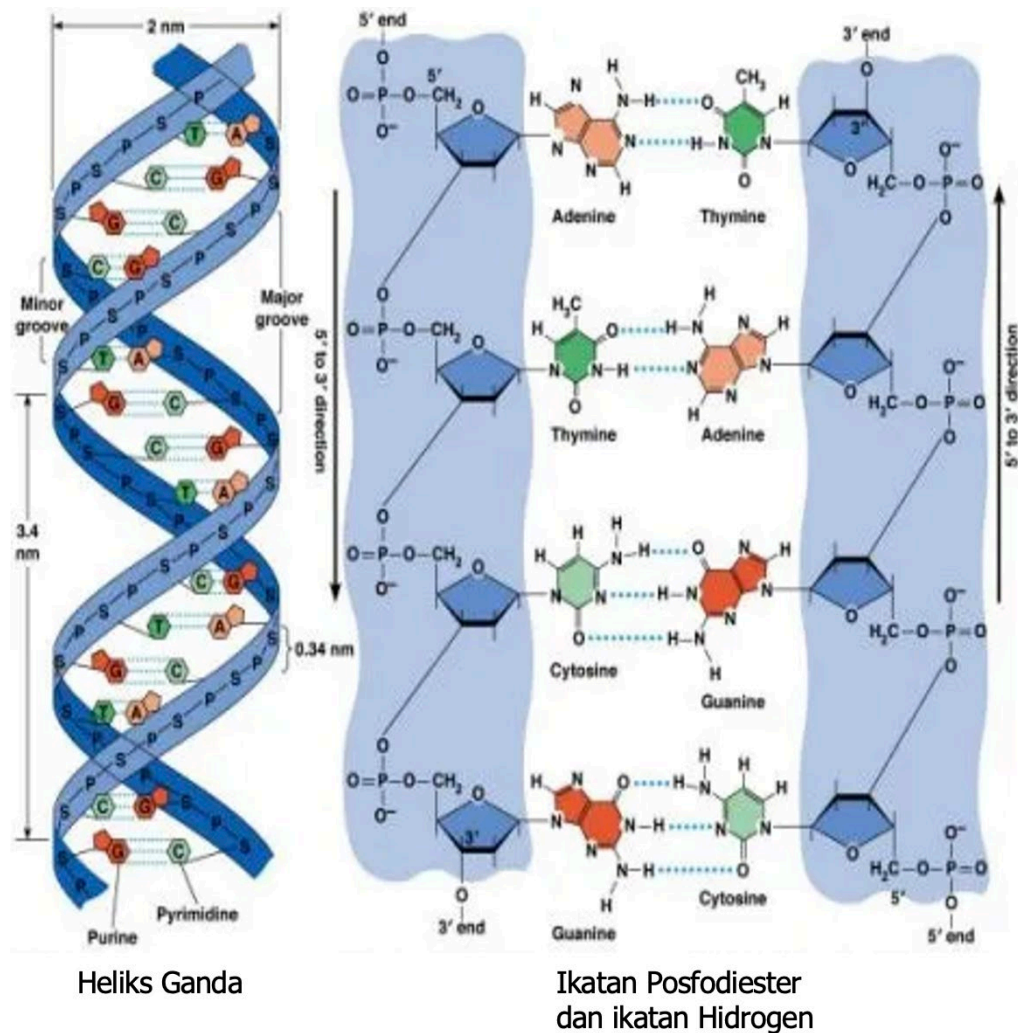
Struktur ADP



Struktur AMP



Salah satu sifat sel hidup adalah kemampuannya untuk bereproduksi, atau pengandaan diri. Sifat ini terkandung dalam molekul yang di sebut asam deoksiribonukleat (DNA). Sifat pengandaan dari makhluk hidup yang menonjol adalah stabilitas yang luar biasa dari informasi genetik yang tersimpan di dalam DNA. DNA merupakan biomolekul (polimer) yang mengandung informasi genetik. Sifat menonjol dari transfer informasi genetik adalah informasi genetik tersandi dalam bentuk urutan linier dari nukleotida unit penyusun DNA menjadi protein dalam proses translasi. Monomer nukleotida terdiri atas gugus fosfat, gula ribosa, dan basa nitrogen (golongan purin atau golongan pyrimidin). Terdapat empat jenis basa pada nukleotida yaitu basa golongan purin terdiri dari: Adenin (A), Guanin (G), sedangkan basa dari golongan pyrimidin terdiri dari basa Cytosin (C) dan Thymin (T). Adapun struktur DNA dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4 Asam Deoksiribonukleat

B. SEL

Sel merupakan unit struktural dan fungsional organisme hidup, tempat terjadinya reaksi-reaksi enzimatik pada makhluk hidup. Terdapat berbagai jenis sel yang sangat bervariasi dalam ukuran, bentuk dan fungsi khususnya. Meskipun berbeda dalam penampilannya berbagai jenis sel menunjukkan kesamaan ciri struktur dasar. Tiap sel dikelilingi oleh membran tipis yang membuatnya terpisah, sampai tingkat tertentu mampu mencukupi diri sendiri. Membran sel atau membran plasma atau membran sitoplasma bersifat permeabel-selektif, yang berfungsi mengangkut nutrisi dan garam yang dibutuhkan ke dalam sel.

Sejarah perkembangan Sel mulai pada tahun 1665, ketika Robert Hooke membuat dan menggunakan mikroskop, menyebut sel sebagai satuan kehidupan. Beliau adalah orang yang pertama kali mengamati sel gabus.



Gambar 5 Robert Hoek

Selanjutnya Antony van Leeuwenhoek (24 Oktober 1632 – 30 Agustus 1723) adalah ilmuwan Belanda yang berasal dari Delft, beliau dianggap sebagai ilmuwan mikrobiologi pertama. Risetnya terkenal atas pengembangan mikroskop dan kontribusinya terhadap didirikannya mikrobiologi. Beliau adalah orang pertama yang mengamati dan mendeskripsikan organisme bersel satu.



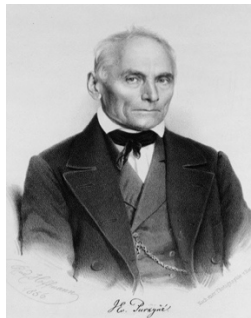
Gambar 6 Antony van Leeuwenhoek

Kemudian Schleiden & Schwann mengemukakan teori sel: semua makhluk hidup terdiri dari sel-sel. Beliau mengemukakan sel merupakan unit struktural dan fungsional terkecil dari semua makhluk hidup.



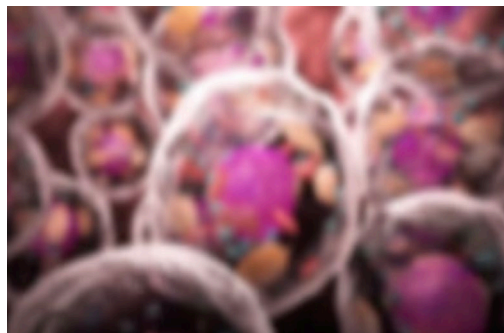
Gambar 7 Schleiden & Schwann

Selanjutnya Johannes Evangelista Purkinje (1839) mengenalkan istilah protoplasma zat yg pertama kali dibentuk, tersusun dari nukleus dan sitoplasma.



Gambar 8 Johannes Evangelista Purkinje

Sel harus berukuran kecil, karena kecepatan metabolismenya menjadi terbatas oleh kecepatan difusi molekul nutrient kesemua bagian sel. Sebagian besar sel berdiameter antara 1 sampai $100\mu\text{m}$. Adapun penjelasan sel dapat di lihat pada video berikut ini.



Gambar 9 Link Sel

Sumber: Nucleus Medical Media, 2015

Menurut system tiga domain yang diperkenalkan oleh Carl Woese (1928 sd. 2012) pohon kehidupan terdiri dari tiga domain.

1. Prokaryot
2. Eukaryot
3. Arkea

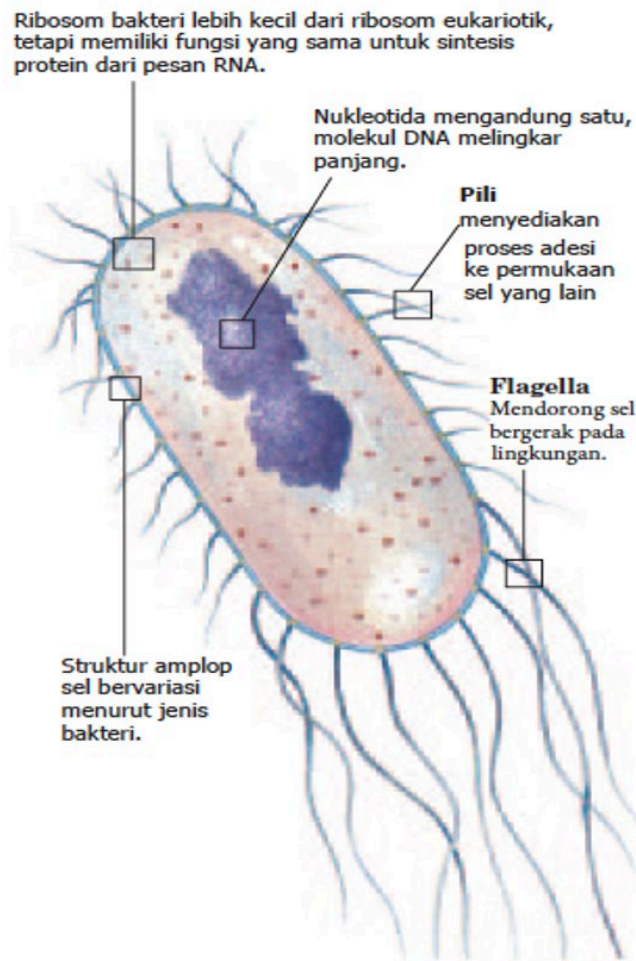
Sistem tiga domain menekankan prokaryot menjadi dua kelompok, yaitu *Eubacteria* (*Bacteria*) dan *Archaeobacteria* (*Archaea*). Woese berargumen bahwa, atas dasar perbedaan gen 16 S rRNA dua kelompok tersebut dan eukaryot muncul secara terpisah dari nenek moyang dengan genetik yang tidak berkembang dengan baik.

1. Sel Prokaryot

Sel terkecil yang paling sederhana dikenal sebagai prokaryot, golongan ini terdiri dari berbagai kelas mikro organisme sel tunggal yang biasa disebut bakteri. Sel prokaryot menyusun bagian yang amat penting dari keseluruhan biomassa bumi. Mungkin tiga perempat dari semua senyawa hidup di bumi terdiri dari organisme mikroskopis terutama prokaryot. Sel prokaryot sangat penting dalam mempelajari biokimia karena strukturnya yang sederhana, kecepatan dan kemudahan pertumbuhan sel, dan mekanisme yang relatif sederhana didalam produksi dan transmisi informasi genetik. Prokaryot bereproduksi secara aseksual yang amat sederhana. Sel prokaryot hanya memiliki satu kromosom, terdiri dari molekul DNA sulur ganda.

Tabel 1 Komponen Sel Bakteri

Struktur	Komposisi	Fungsi
Dinding Sel	Peptidoglikan	Dukungan mekanis
Membran Sel	Lipid dan protein	Penghalang permeabilitas
Nucleotida	DNA dan protein	Informasi genetik
Ribosom	RNA dan protein	Sintesis protein
Pili	Protein	Adhesi, konjugasi
Flagella	Protein	Motilitas
Cytoplasma	Larutan	Tempat metabolisme

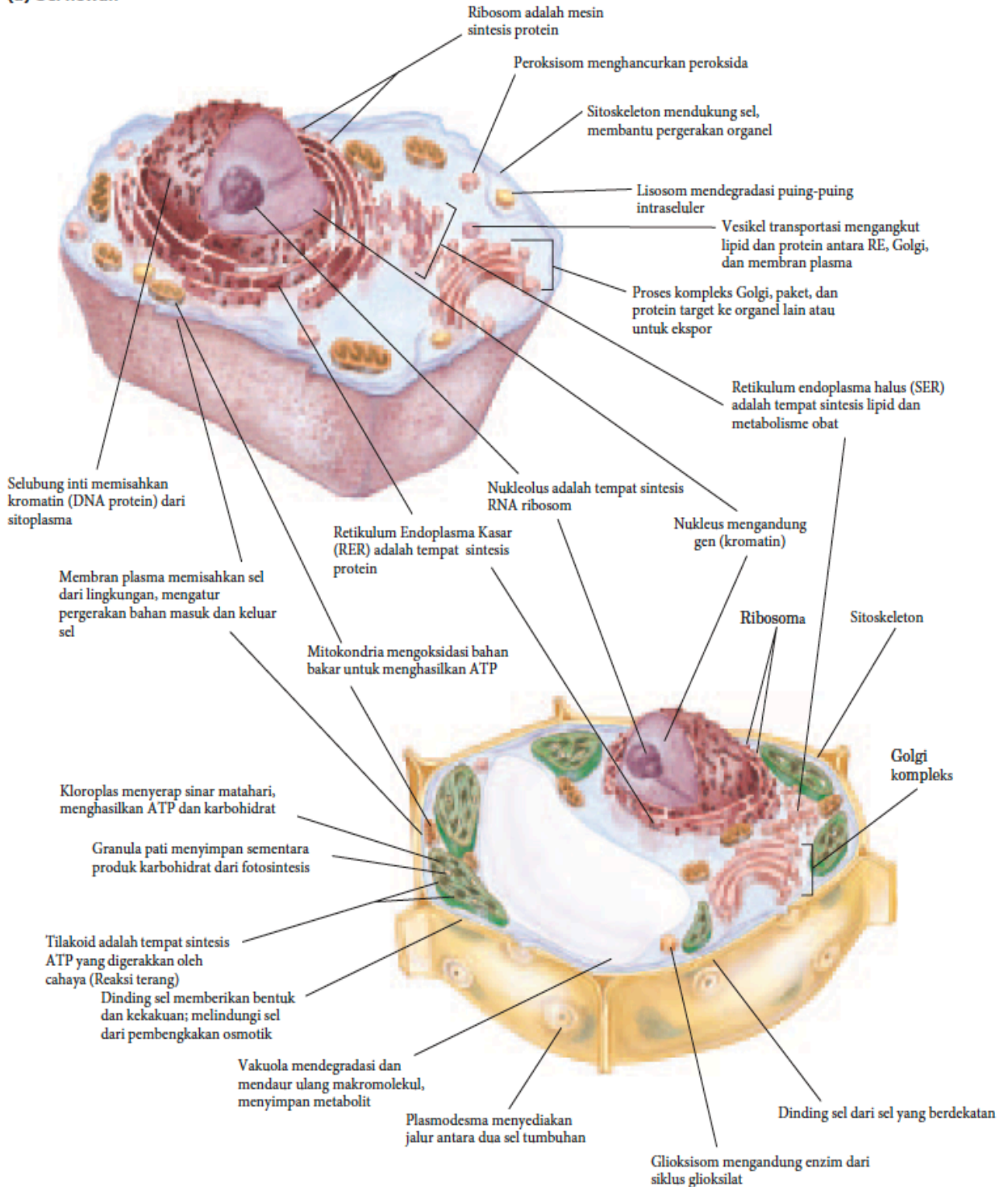


Gambar 10. Sel Prokaryot

2. Sel Eukaryot

Sel eukaryotik berukuran lebih besar, lebih kompleks, dan memperlihatkan kisaran ragam dan perbedaan yang lebih luas. Golongan ini merupakan jenis sel yang ditemukan pada semua hewan, tumbuhan, dan jamur bersel banyak. Sel eukaryot telah memiliki membran inti sel, memiliki sejumlah organel internal yang dikelilingi membran seperti: Tumbuhan, Hewan, Jamur. Inti sel mengandung hampir semua DNA di dalam sel eukaryot yang dikelilingi oleh selubung inti. Di dalam inti sel terdapat nukleus, kromatin, kromosom. Tiap spesies sel eukaryot mempunyai jumlah kromosom yang khas, pada sel somatik manusia terdapat 46. Setelah kromosom mengalami replikasi, kromosom anak memisah menuju sel anak, dalam proses mitosis yang merupakan serangkaian proses yang amat kompleks.

(a) Sel hewan



(b) Sel tanaman

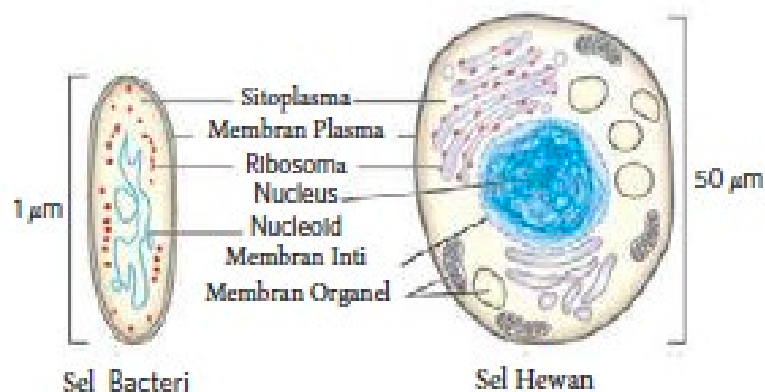
Gambar 11 Struktur Sel eukaryot
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Keterangan gambar: a) Perwakilan Sel Hewan, b) perwakilan sel tumbuhan. Sel tumbuhan biasanya berdiameter 10 hingga 100 mikro meter, lebih besar dari sel hewan, yang biasanya berkisar antara 5 hingga 30 mikor meter.

Tabel 2 Perbedaan Sel Hewan dan Tanaman

No	Nama Organel	Hewan	Tanaman
1	Sentriol	Ada	Tidak ada
2	Dinding Sel	Tidak ada	Ada
3	Vakuola	Kecil	Besar
4	Plastida	Tidak ada	Ada

Perbandingan secara umum antara sel bakteri dengan sel hewan



Gambar 12. Perbandingan Sel Bakteri dan Sel Hewan

3. Arkea

Membran Arkea berbeda dengan membran bakteri pada umumnya karena mengandung eter yang dengan lipid dan terikat pada gliserol. Dieter gliserol dan tetraeter digliseriol merupakan tipe lipid utama yang dijumpai pada membran sel Arkea. Arkea memiliki kemampuan dalam mengatur ketebalan membran selnya. Dinding sel Arkea mengandung asam muramat, D-asam amino, dan peptidoglikan. Beberapa spesies lain mungkin mengandung pseudopeptidoglikan, polisakarida, glikoprotein atau protein. Metabolisme Arkea bervariasi, ada yang kemoorganotrof dan adapula yang ototrof. Secara umum tipe metabolisme yang terdapat dalam Arkea mirip dengan yang ada pada Eubacteria.

Tabel 3 Perbedaan antara Arkeobacteria dan Eubacteria

Karakter	Arkeobacteria	Eubacteria
Dinding sel Dijumpai peptidoglikan yang mengandung asam muramat dan asam D-amino.	(-)	(+)
Lipid membran sitoplasma Asam-asam lemak rantai panjang terikat pada gliserol oleh ikatan ester. Alkohol rantai panjang bercabang (fitanol) terikat pada gliserol oleh ikatan ester.	(-) (+)	(+) (-)
Properti yang berhubungan dengan sintesis protein Asam amino pertama untuk memulai penyusunan rantai polipeptida baru berupa: Metionin N-Formilmetionin	(+) (-)	(-) (+)
Proses translasi sensitif terhadap kerja: Toksin difteri Khloramfenikol	(+) (-)	(-) (+)

Sumber: Pelczar et al., 1986

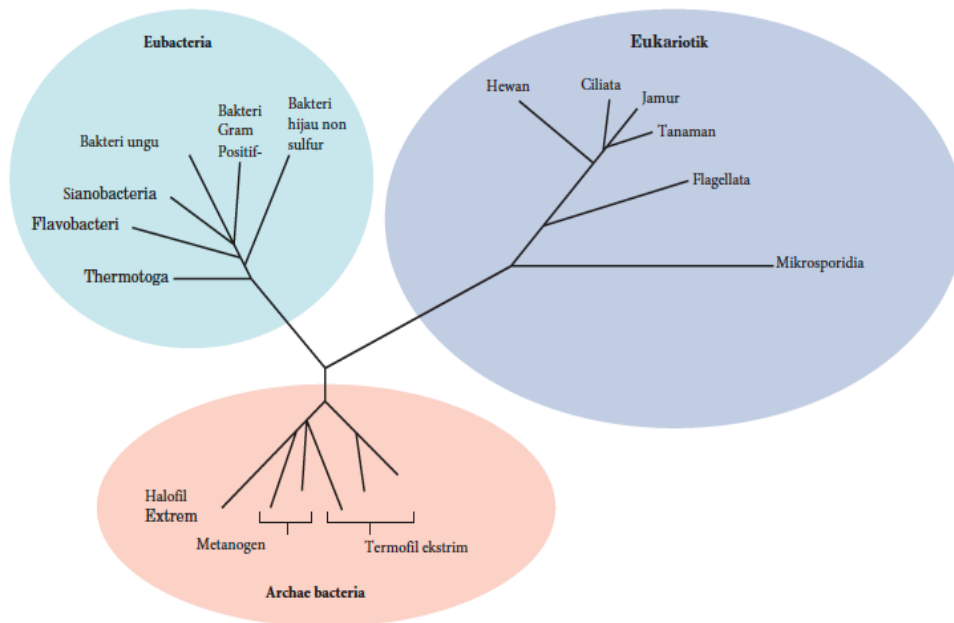
Salah satu contoh utama dari Arkea adalah kelompok bakteri metanogenik. Kelompok bakteri tersebut mampu membentuk metana melalui reduksi karbondioksida, bersifat anaerob obligat yang menggunakan elektron dari oksidasi hidrogen atau senyawa organik sederhana seperti asetat dan metanol. Bakteri metanogenik mampu mengkonversi substrat berupa CO₂, senyawa-senyawa metil, atau asetat menjadi gas metana. Proses konversi ini digambarkan sebagai suatu tipe respirasi anaerobik. Bakteri metanogenik tidak mampu menggunakan senyawa karbohidrat, protein atau senyawa organik kompleks lainnya. Seringkali kelompok bakteri ini berasosiasi dengan mikroorganisme lain yang berperan dalam menjaga konsentrasi oksigen yang rendah dan menyediakan karbondioksida serta asam-asam

lemak. Bentuk asosiasi ini antara lain dijumpai pada rumen. Beberapa contoh bakteri metanogenik, yaitu *Methanobacillus*, *Methanococcus*, dan *Methanosarcina*.

Halobacterium dan *Halococcus* merupakan anggota Arkea yang memiliki kemampuan metabolisme fototrofik untuk mensintesis ATP yang dilakukan oleh bakteri orhodopsin yang merupakan protein membran, dan memiliki sifat halofilik ditunjukkan oleh kemampuannya tumbuh jika tersedia sekurangnya 15% NaCl. *Sulfolobus* merupakan Arkea yang berperan dalam siklus sulfur sebagai agen pengoksidasi sulfur. *Sulfolobus* mampu tumbuh secara ototrofik menggunakan sulfur elemental sebagai sumber energi. Pada umumnya *Sulfolobus* adalah termofilik, dengan suhu optimum 70-750 C. Berdasarkan karakternya *Sulfolobus* sering dijumpai pada mata air panas dan lingkungan yang asam.

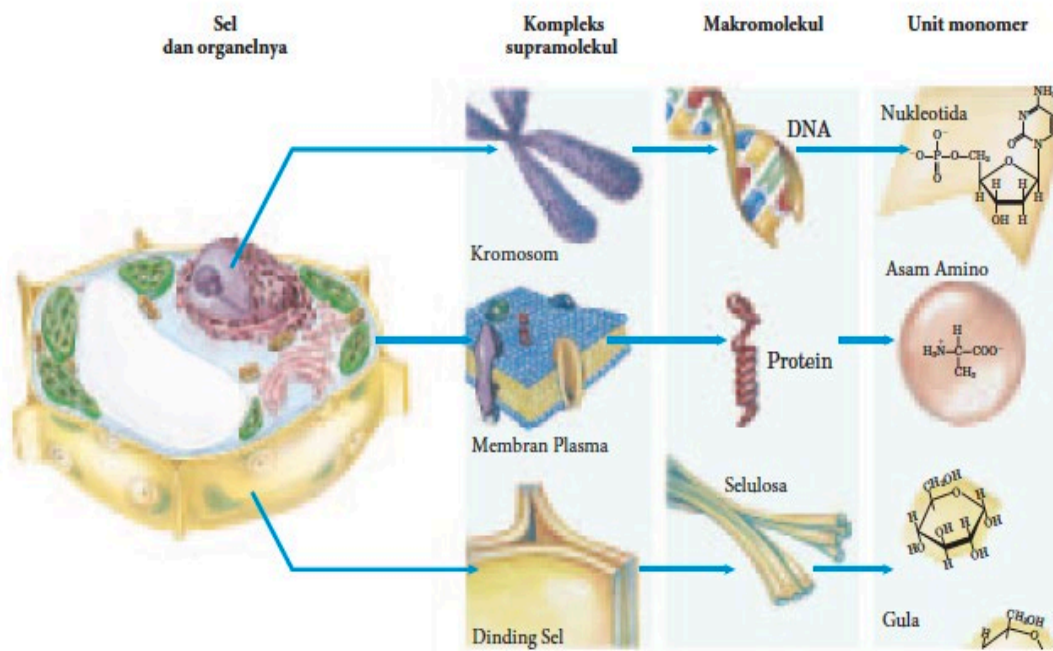
Arkea hipertermofilik merupakan bagian terbesar dari jasad prokaryotik termofilik yang dikenal. Keseluruhannya memerlukan senyawa sulfur tereduksi untuk metabolisme. Senyawa sulfur tereduksi digunakan sebagai akseptor elektron untuk melangsungkan respirasi anaerob. *Thermoplasma* merupakan prokaryot tanpa dinding sel dan mirip mikoplasma, *thermoplasma* merupakan jasad asidofilik, aerobik khemoorganotrof dan termofilik. Umumnya jasad ini dijumpai pada bekas tambang batubara. Membran selnya mengandung lipopolisakarida yang terdiri dari lipid dengan empat gugus eter, manosa, dan glukosa.

Kelompok fisiologis utama Arkeabacteria, yaitu: termofilik (termasuk termoasidofilik), pereduksi sulfat, metanogenik dan halofilik ekstrem. Kelompok fisiologis ini tidak berhubungan dengan kedudukan filogeninya. Pereduksi sulfat merupakan kelompok Arkea yang paling luas sebarannya. Perhatian banyak ditujukan pada kelompok ini mengingat kemampuannya dalam meningkatkan kandungan sulfur pada minyak bumi sehingga saat digunakan lebih banyak sulfur yang dilepaskan ke udara, meningkatnya biaya penyulingan minyak karena sulfida yang terbentuk akan menyebabkan komponen penyulingan mudah aus.



Gambar 13. Tiga Domain Kehidupan
 Sumber: Nelson & Cox, 2004

Golongan utama biomolekul penyusun sel adalah sebagai berikut: Karbohidrat, Protein, Air, Lipid dan Asam Nukleat. Selanjutnya hubungan antara Sel, Organel sel dan biomolekul penyusunnya dapat di lihat pada gambar berikut.



Gambar 14. Hubungan antara Sel dan Organel
 Sumber: Nelson & Cox, 2013

C. BAGIAN-BAGIAN SEL

1. Membran Sel

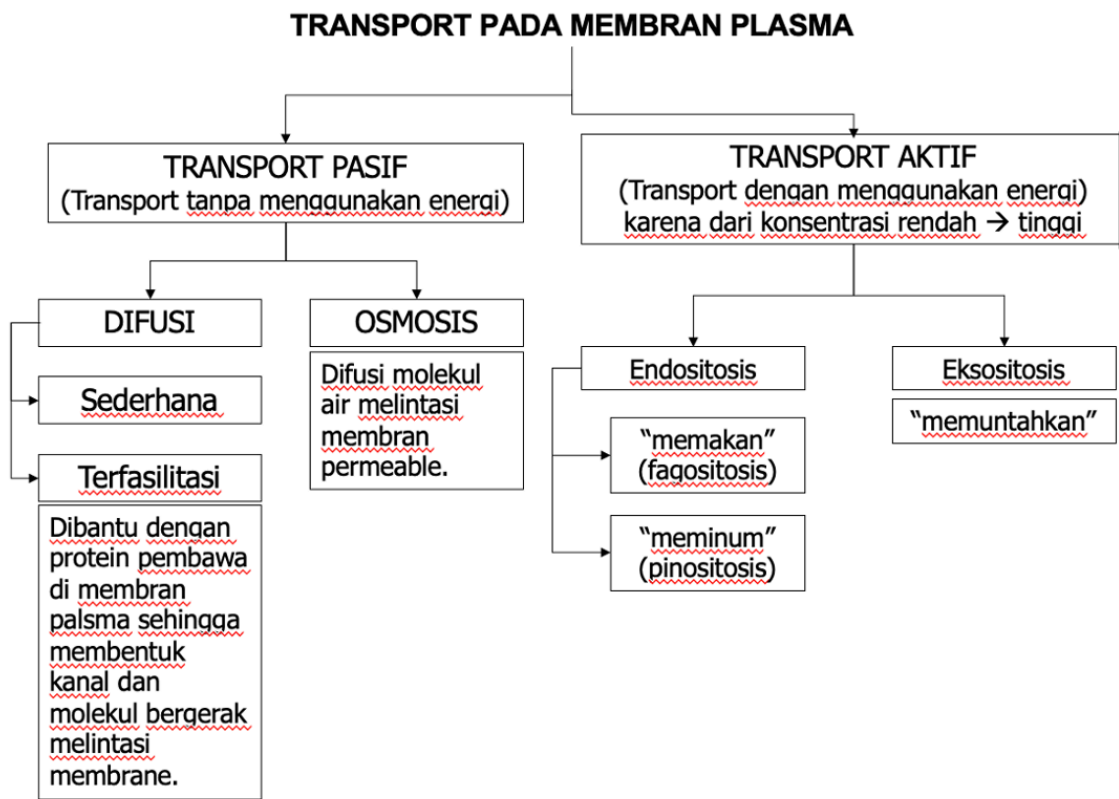
Pada dasarnya semua struktur fisika sel dibatasi oleh membran yang terutama terdiri atas lipid dan protein. Semua membran, baik membran sel, inti, retikulum endoplasma, mitokondria, lisosom, maupun kompleks golgi mempunyai struktur yang sama, yakni terdiri atas lipid, lapisan protein dan lapisan tipis lipopolisakarida, Protein dan lipopolisakarida yang terdapat pada permukaan membran membuatnya hidrofilik, yakni air dengan mudah terikat pada membran. Adanya lapisan lipopolisakarida pada permukaan luar membran menyebabkan tegangan permukaan luar berbeda dengan permukaan dalam, sehingga reaktivitas kimia permukaan dalam sel berbeda dengan permukaan luarnya. Sedangkan lipid yang terletak ditengah membran menyebabkan membran tidak dapat ditembus oleh zat-zat yang tidak larut dalam lipid.

Membran sel dilengkapi pori-pori agar zat yang tidak larut dalam lipid seperti air dan urea dapat melewati membran sel. Pori-pori pada membran disebabkan oleh adanya molekul protein besar yang merusak struktur lipid membran dan membentuk jalan dari satu sisi membran ke sisi lainnya. Karenanya, membran sel tidak hanya semi permiabel terhadap substansi yang mengelilinginya, tetapi juga kadang bersifat permeabel atau impermeabel. Transport melalui membran sel terdiri dari:

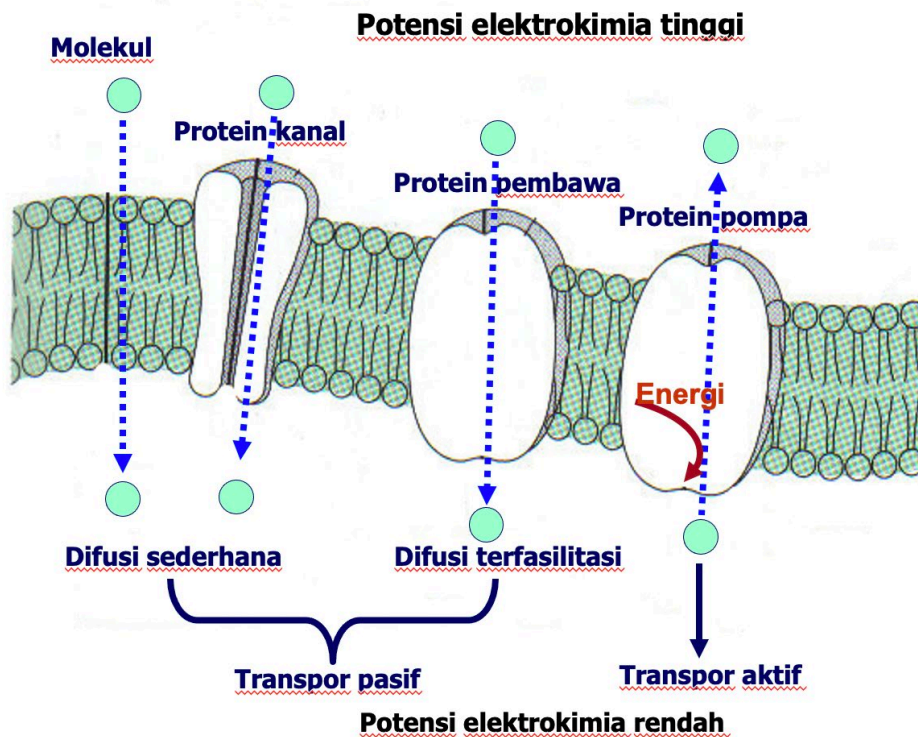
a. Transpor Aktif

Transport aktif adalah transport ion, senyawa atau molekul melalui membran sel dengan cara membutuhkan energi metabolisme untuk melakukan aktivitasnya. Transport aktif dilakukan sebagai upaya untuk mempertahankan konsentrasi ion dari keadaan keseimbangannya. Transport aktif suatu ion selalu melibatkan protein pembawa. Ion-ion yang ditransportasikan secara aktif antara lain ion Na^+ , H^+ , Ca^{2+} dan sebagainya. Transpor aktif yang sangat dikenal dengan baik adalah transportasi Na^+ dari dalam sel keluar sel, melawan perbedaan konsentrasi dan melawan perbedaan potensial listrik. Kedua perbedaan tersebut cenderung menyebabkan ion Na^+ masuk ke dalam sel. Transport jenis ini terjadi

melalui epitel usus, epitel tubulus ginjal, epitel kelenjar-kelenjar eksokrin, dan banyak membran lainnya.



Adapun transport aktif dan transport pasif dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 15 Transport Aktif dan Pasif

Adapun transport aktif terdiri dari:

1) Endositosis

Endositosis adalah transport makromolekul dan materi yang sangat kecil ke dalam sel dengan cara membentuk vesikula baru dari membran plasma. Endositosis ini disebut fagositosis bilamana bahan yang diambil oleh sel tersebut berupa partikel padat dengan ukuran cukup besar. Endositosis disebut pinositosis bilamana bahan yang diambil oleh sel berupa cairan apakah didalamnya mengandung partikel berukuran kecil atau tidak. Kasus fagositosis dijumpai misalnya pada amuba, granulosis, dan makrofage. Pada proses fagositosis, sel membentuk pseudopoda yakni pemanjangan sitoplasma yang mengarah/mendekati partikel yang dituju. Mekanisme menggunakan alat gerak sel dan bergantung pada kalsium (ion Ca^{2+}). Sedangkan pinositosis terjadi hanya bila ada respon terhadap jenis zat tertentu yang bersentuhan dengan membran sel, yang paling sering adalah terhadap protein, karena pinositosis adalah satu-satunya cara protein dapat melewati membran sel.

2) Eksositosis

adalah mekanisme transport molekul besar seperti protein dan polisakarida melintasi membran plasma dari dalam ke luar sel (sekresi) dengan cara menggabungkan vesikula berisi molekul tersebut dengan membran plasma.

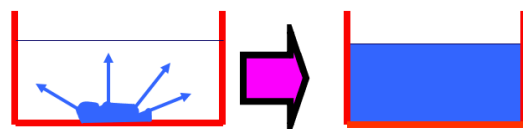
b. Transport Pasif

Transport pasif merupakan transport ion, molekul, dan senyawa yang tidak memerlukan energi untuk melewati membran plasma. Transport pasif mencakup osmosis dan difusi.

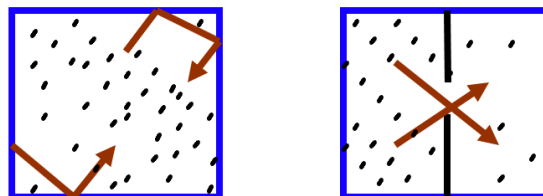
1) Difusi

Difusi adalah proses lewatnya partikel larutan air, atau gas melalui membran akibat perbedaan konsentrasi medium pergerakan molekul biasanya terjadi dari yang konsentrasinya tinggi ke konsentrasinya rendah. Difusi juga dapat terjadi dengan bantuan media transport. Mediator transport tersebut berperan dalam pengangkutan gula, asam amino, vitamin dan bahan lain dari luar sel ke dalam sel (sitoplasma). Difusi dengan media transport, dilakukan dengan

cara mengikat zat terlarut pada media sebelum transport ke dalam sel, kadang-kadang bergabung dengan transport aktif. Misalnya, pada transport molekul gula melewati epithelium usus, Na^+ bertindak sebagai media transport. Ion Na^+ mengikatkan afinitas terhadap glukosa, kemudian glukosa dan ion Na^+ dilepaskan oleh media transport ketika sudah berada pada permukaan membran bagian dalam. Selanjutnya ion Na^+ akan dikeluarkan dari dalam sel melalui proses transport aktif. Contoh lain difusi gabungan adalah alanin dan ion Na^+ . alanin diserap dari rongga usus melalui difusi. Jika lingkungan luar sel (rongga usus) tidak mengandung Na^+ , difusi alanin ke dalam sel berjalan secara lambat dan konsentrasi alanin di dalam sel tidak melebihi konsentrasi alanin di lingkungan luarnya. Tetapi ketika konsentrasi ion Na^+ di lingkungan luar cukup tinggi, maka konsentrasi alanin di dalam sel dapat mencapai 6 – 7 kali konsentrasi di luar sel.



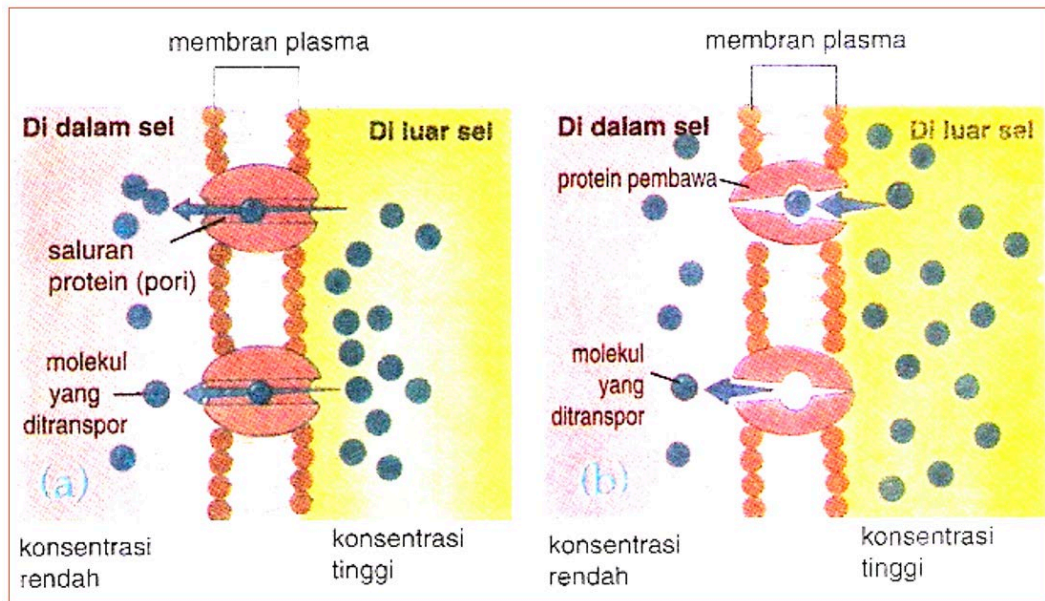
KRISTAL DALAM AIR



GAS DALAM RUANG

Gambar 16 Difusi Sederhana

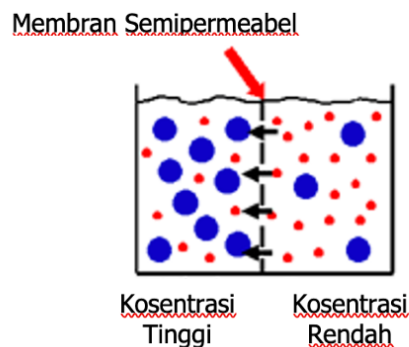
Difusi terfasilitasi terjadi dibantu dengan protein pembawa di membran plasma sehingga membentuk kanal dan molekul bergerak melintasi membrane. Adapun difusi terfasilitasi dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 17 Difusi Terfasilitasi

2) Osmosis

Osmosis adalah proses pergerakan air dari media yang konsentrasinya rendah ke media yang konsentrasinya tinggi melalui membran semi permeabel. Osmosis dapat dianggap sebagai suatu kasus spesial dari difusi, yang mana air adalah pelarut dan difusi dari zat pelarut dibatasi oleh membran permeabel. Efek osmosis: Jika konsentrasi larutan sel lebih rendah dibandingkan konsentrasi lingkungan sekitarnya, maka air akan segera bergerak ke luar meninggalkan sel secara otomatis, akibatnya sel menyusut dan mati (Plasmolisis). Jika konsentrasi larutan sel lebih tinggi dibandingkan konsentrasi lingkungan sekitarnya, maka air akan segera bergerak masuk ke dalam sel secara otomatis, akibatnya sel membengkak dan pecah, kecuali pada sel tumbuhan hanya menggelembung dan menegang (Turgid).

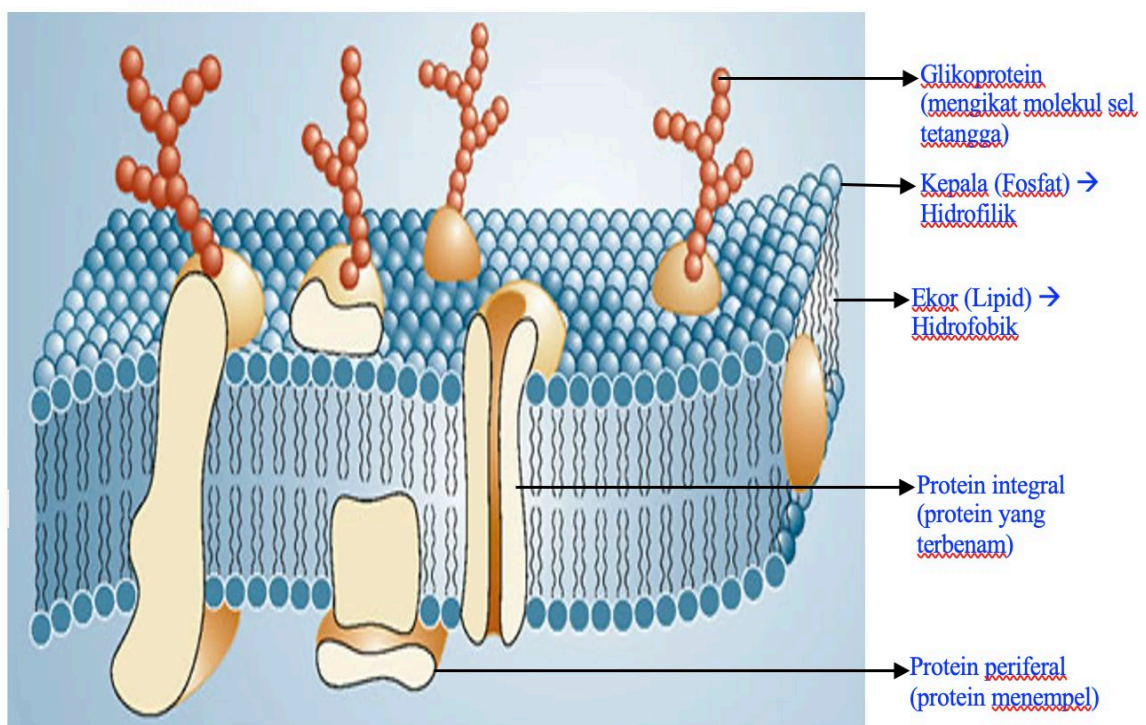


Gambar 18 Osmosis

2. Membran Plasma

Membran plasma bersifat semipermeabel (zat-zat tertentu saja yang dapat melewati membran plasma), hidup, dan sangat tipis. Komposisi kimia membran plasma yaitu lapisan luar dan dalam berupa molekul protein sedangkan bagian tengah molekul lemak, Membran plasma berfungsi untuk:

- Pelindung bagi sel-sel bagian dalam,
- Pengatur pertukaran zat yang keluar masuk ke dalam sel
- Melakukan seleksi terhadap zat yang boleh keluar dan masuk dari dalam atau luar sel (*selektif permeable*)
- Tersusun atas Karbohidrat, protein, dan lemak



Gambar 19 Membran Plasma

3. Inti Sel

Inti sel adalah pusat pengawasan atau regulasi sel, mengawasi reaksi-reaksi kimia yang terjadi dalam sel dan reproduksi sel. Inti mengandung asam dioksiribonukleat (DNA) yang umum disebut gen atau kromosom. Gen ini

menentukan sifat-sifat protein enzim sitoplasma, dan dengan jalan ini mengawasi aktivitas sitoplasma, inti sel berfungsi:

- Mengendalikan metabolisme sel
- Menyimpan informasi genetika berupa DNA
- Tempat penggandaan DNA

Letak inti pada sitoplasma biasanya ditengah, umumnya sel makhluk hidup mengandung 1 inti, bagian-bagian inti sel:

- A. Membran inti; membran inti memisahkan inti sel dari sitoplasma. Membran inti terdiri dari 2 lapisan membran dan pada daerah-daerah tertentu terdapat pori-pori yang berfungsi tempat transportasi.
- B. Nukleoplasma dan kromosom; inti sel mengandung nukleoplasma. Bahan kimia pada nukleoplasma yaitu larutan fosfat, gula ribose, protein, nukleotida dan asam nukleat. Pada nukleoplasma terdapat benang-benang kromatin yang tampak jelas pada saat terjadi pembelahan sel membentuk kromosom. Fungsi kromosom adalah mengandung material genetik yang berguna untuk mengontrol aktivitas hidup sel dan pewarisan sifat-sifat yang diturunkan.
- C. Nukleolus; setiap nukleolus mengandung nukleoli yang berbentuk bulat. Secara kimia nukleolus mengandung RNA dan protein. Nukleolus berfungsi untuk sintesa RNA ribosom.

4. Sitoplasma

Sitoplasma terisi oleh partikel-partikel dan organel kecil dan besar. Bagian cairan yang jernih dimana partikel-partikel tersebar, dinamakan hialoplasma; hialoplasma terutama mengandung protein yang terlarut, elektrolit, glukosa, dan dalam jumlah sedikit fosfolipid, kolesterol dan asam lemak teresterifikasi. Bagian sitoplasma yang tepat dibawah membran sel sering mengalami gelatinasi menjadi setengah padat yang dinamakan korteks atau ektoplasma. Sedangkan sitoplasma yang terdapat antara korteks dan membran inti berbentuk encer dan dinamakan endoplasma. Partikel-partikel besar dalam sitoplasma adalah butir-butir lemak netral, granula glikogen, ribosom, granula sekresi dan dua organel yang penting, mitokondria dan lisosom. Sitoplasma berfungsi:

- Merupakan cairan sel dalam sel

- Disebut juga dengan sitosol karena mirip dengan koloid
- Berfungsi sebagai tempat berlangsungnya metabolisme sel.
- Di dalamnya terdapat berbagai organel sel

5. Sitoskeleton

Sitoskeleton atau kerangka sel adalah jaring berkas-berkas protein yang menyusun sitoplasma dalam sel. Pada awalnya dianggap hanya terdapat di sel eukaryot, sitoskeleton ternyata juga dapat ditemukan pada sel prokaryot. Dengan adanya sitoskeleton, sel dapat memiliki bentuk yang kokoh, berubah bentuk, mampu mengatur posisi organel, berenang, serta merayap di permukaan.

6. Ribosom

Ribosom berbentuk granular dan mengandung RNA, disintesis gen dari kromosom kemudian dikeluarkan ke sitoplasma dalam bentuk ribosom granula. Bila ribosom melekat pada bagian luar retikulum endoplasma, maka disebut retikulum endoplasma granular (sehingga menjadikan retikulum endoplasma tersebut dinamakan reticulum endoplasma Kasar) berfungsi untuk sintesis protein.

7. Retikulum Endoplasma (RE)

Merupakan membran lipoprotein dan sitoplasma yang terletak antara membran inti dengan membran sitoplasma. Dengan adanya system endomembran ini, maka terbentuklah menghubungkan nukleus dengan bagian luar sel. Ada 2 macam retikulum endoplasma, yaitu :

- A. Retikulum Endoplasma kasar/granular; bila pada permukaan membran retikulum endoplasma ini ditemplei ribosom sehingga tampak berbintil-bintil. Retikulum endoplasma kasar merupakan penampung protein yang dihasilkan ribosom. Protein yang dihasilkan masuk kedalam rongga retikulum endoplasma. Dengan kata lain retikulum endoplasma kasar berfungsi untuk sintesis protein.
- B. Retikulum Endoplasma halus; bila pada membran retikulum endoplasma ini tidak ditemplei ribosom sehingga tampak halus. Sel-sel kelenjar mengandung

lebih banyak retikulum endoplasma dibandingkan sel-sel bukan kelenjar, fungsinya untuk sintesis lemak.

8. Badan Golgi

Berbentuk tumpukan kantong-kantong pipih yang sangat kompleks dan pada bagian dalam kantong-kantong tersebut terdapat ruang-ruang kecil atau vakuola. Membran badan golgi terbentuk dari lipoprotein. Badan golgi banyak terdapat pada sel-sel kelenjar seperti kelenjar ludah, hati, pankreas, dan hormon. Fungsi badan golgi adalah sebagai berikut:

- A. sebagai organ sekresi, karena mengeluarkan zat yang masih dibutuhkan yaitu berupa sekret dalam bentuk butiran getah
- B. membentuk enzim yang belum aktif (zimogent/proenzym)
- C. membentuk glikoprotein (musin/mucus/lendir)

9. Lisosom

Lisosom menghasilkan sistem pencernaan intrasel yang memungkinkan sel mencerna, dan membuang zat-zat atau struktur yang tidak diinginkan, khususnya struktur yang rusak atau asing, seperti bakteri. Lisosom berfungsi: Mencerna makromolekul secara intraseluler, Menghidrolisis lemak, protein, asam nukleat, polisakarida

10. Mitokondria

Mitokondria tempat terjadinya oksidasi nutrien oleh oksigen yang selanjutnya digunakan untuk melakukan fungsi sel. Jumlah mitokondria pada setiap sel berbeda-beda, tergantung pada jumlah energi yang diperlukan oleh setiap sel. Ukuran dan bentuknyapun berbeda-beda, ada yang berbentuk globular dan ada pula yang berbentuk filament. Mitokondria terdiri atas dari dua lapisan unit membran yaitu: membran luar dan membran dalam. Membran dalam banyak membentuk lapisan yang didalamnya melekat enzim-enzim oksidatif sel. Rongga dalam mitokondria juga banyak mengandung enzim-enzim terlarut yang penting untuk menyaring energi dari nutrien. Enzim-enzim ini bekerja bersama-sama dengan enzim oksidatif untuk oksidasi nutrient membentuk karbondioksida dan air.

Energi yang dilepas digunakan untuk sintesis zat-zat berenergi tinggi yang dinamakan adenosine trifosfat (ATP). ATP kemudian kemudian ditransfer keluar mitokondria, dan berdifusi keseluruh sel untuk melepaskan energinya bila mana diperlukan untuk melakukan fungsi sel.

11. Sentrosom

Umumnya sel hewan mengandung sentrosom yang letaknya pada sitoplasma dekat membran inti. Pada saat pembelahan mengandung 2 sentriol. Sebuah sentrosom terbentuk dari microtubul yang berfungsi menggerakkan kromosom pada saat pembelahan sel. Sentriol sendiri merupakan organel sel yang dapat dilihat ketika sel mengadakan pembelahan.

12. Flagel dan Silia

Pada makhluk hidup bersel satu misalnya pada protozoa ada yang memiliki alat gerak flagel dan silia. Struktur flagel terdiri dari 2 fibril yang dikelilingi oleh 9 fibril yang terletak disebelah luar. Sedangkan fibril keluarannya dari granula basal dan secara kimia terdiri dari tubulin dan protein dinein dan ATP.

13. Badan mikro:

- A. Peroksisom, terdapat pada sel hewan dan tumbuhan, berisi enzim katalase dan oksidase. Peroksisom adalah organel yang terbungkus oleh membran tunggal dari lipid dwilapis yang mengandung protein reseptor. Peroksisom berfungsi: Menghasilkan *enzim oksidatif* untuk membentuk H_2O_2 untuk merombak lemak, Menghasilkan *enzim katalase* untuk mengubah H_2O_2 menjadi H_2O dan O_2 .
- B. Glioksisom, hanya terdapat pada sel tumbuhan, berisi semua atau sebagian enzim dari daur glioksiat disamping katalase dan oksidase.

14. Mikrofilamen

Mikrofilamen berfungsi sebagai:

- a. Sebagai sitoskeleton dalam sel

- b. Berperan dalam pembelahan sel, pada Amoeba berfungsi dalam pembentukan Pseudopoda, gerakan sel dan gerakan sitoplasma.
- c. Membentuk alat gerak seperti silia dan flagella

15. Mikrotubul

Mikrotubul berfungsi:

- a. Mengendalikan gerakan kromosom dari daerah equator ke kutub masing-masing pada anaphase,
- b. Penyusun sentriol, flagel dan silia sehingga berperan dalam pergerakan sel.

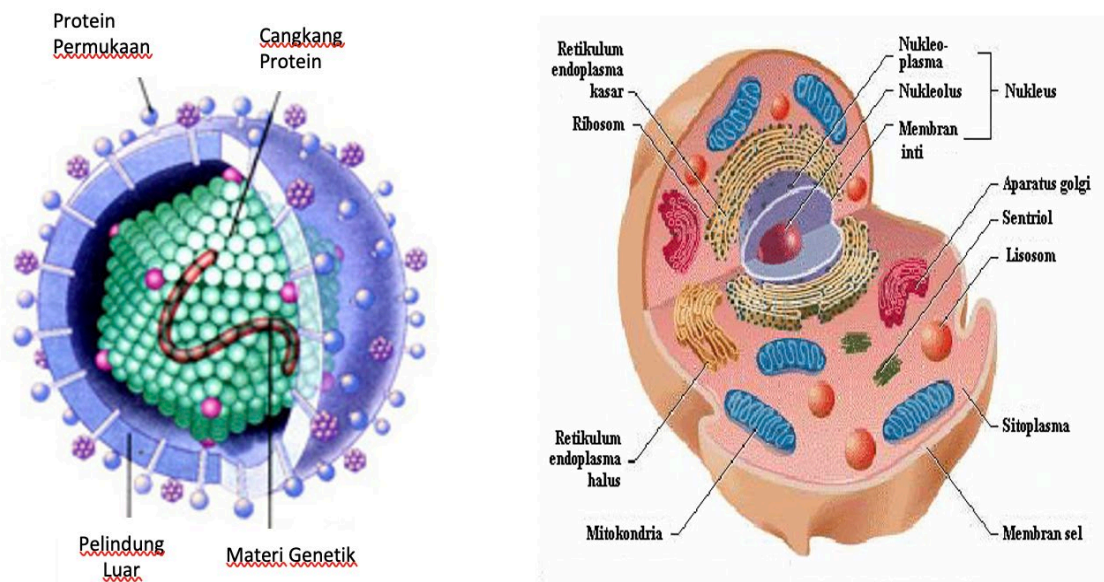
D. VIRUS

Virus adalah parasit intraseluler obligat yang berukuran antara 20-300 nm, bentuk dan komposisi kimianya bervariasi, tetapi hanya mengandung RNA atau DNA saja. Partikelnya secara utuh disebut virion yang terdiri dari kapsid yang dapat terbungkus oleh sebuah glikoprotein atau membran lipid, dan virus resisten terhadap antibiotik. Bentuk virus berbeda-beda ada yang : bulat, batang polihidris, dan seperti huruf T. Virus hanya dapat bereproduksi (hidup) didalam sel yang hidup dengan menginvasi dan memanfaatkan sel tersebut karena virus tidak memiliki perlengkapan seluler untuk bereproduksi sendiri. Virus merupakan parasit obligat intraseluler. Virus mengandung asam nukleat DNA atau RNA saja tetapi tidak kombinasi keduanya, dan yang diselubungi oleh bahan pelindung terdiri atas protein, lipid, glikoprotein, atau kombinasi ketiganya.

Istilah virus biasanya merujuk pada partikel-partikel yang menginfeksi sel-sel eukaryot (organisme multisel dan banyak jenis organisme sel tunggal) dan istilah bakteriofaga atau faga dipakai untuk virus yang menyerang jenis-jenis sel prokariot (bakteri dan organisme lain yang tidak berinti sel). Selama siklus replikasi dihasilkan banyak sekali salinan asam nukleat dan protein selubung virus. Protein-protein selubung tadi dirakit untuk membentuk kapsid yang membungkus dan menstabilkan asam nukleat virus terhadap lingkungan ekstra sel serta memfalsifikasi perlekatan penetrasi virus saat berkontak dengan sel-sel baru yang rentan. Infeksi virus dapat

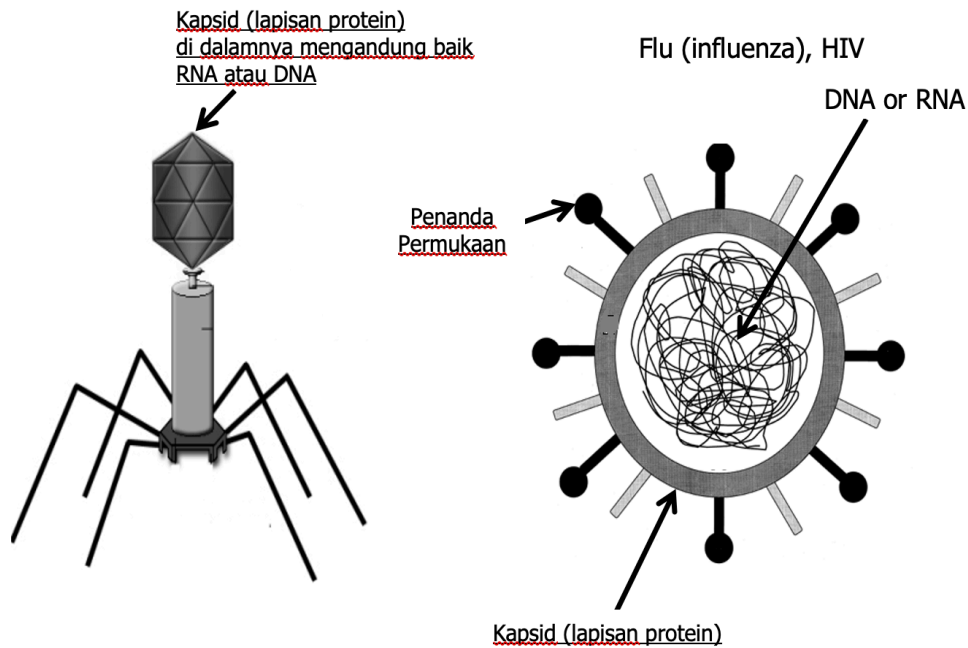
memiliki efek yang kecil atau bahkan tidak memiliki efek sama sekali pada sel inang tetapi dapat pula menyebabkan kerusakan atau kematian sel. Virus sering diperdebatkan statusnya sebagai makhluk hidup karena dia tidak dapat menjalankan fungsi biologisnya secara bebas. Oleh karena karakteristiknya yang khas ini, virus selalu terasosiasi dengan penyakit tertentu, baik pada manusia (mis : virus HIV, DHF), pada hewan (mis : virus flu burung), atau pada tanaman (mis : virus mozaik tembakau/TMV).

Virus tidak memiliki nukleus, tidak memiliki organel, tidak memiliki sitoplasma atau membran sel Non seluler.



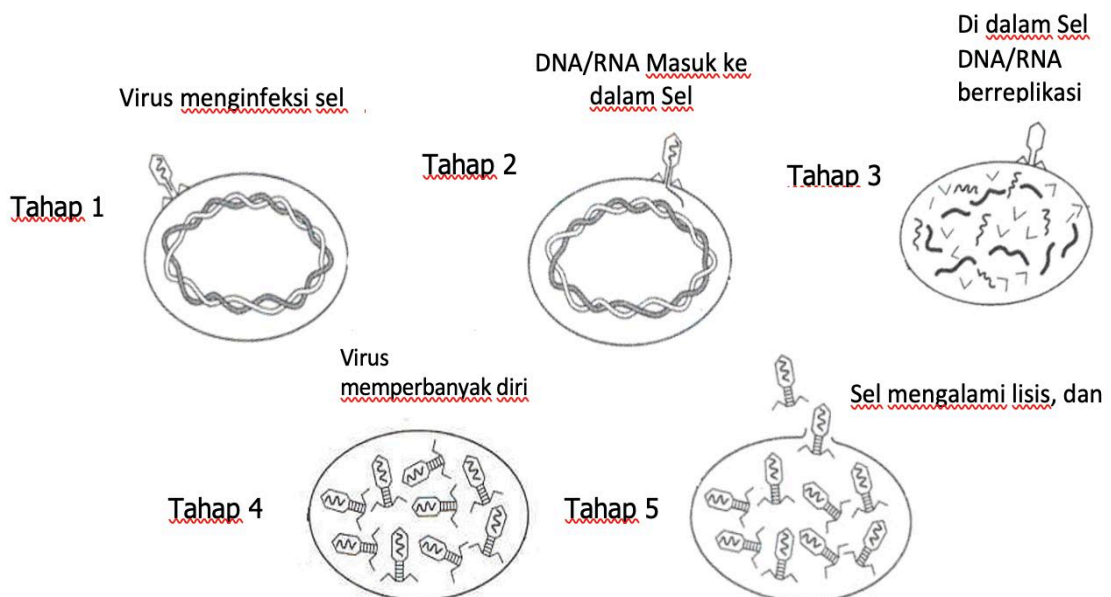
Gambar 20 Sel Virus dan Eukaryotik

Virus dengan RNA yang mentranskripsi menjadi DNA disebut retrovirus. Virus adalah parasit-organisme yang sepenuhnya bergantung pada organisme hidup lain (inang) untuk keberadaannya sedemikian rupa sehingga merugikan organisme itu. Sebagai contoh Bakteriofag merupakan virus yang menginfeksi bakteri.



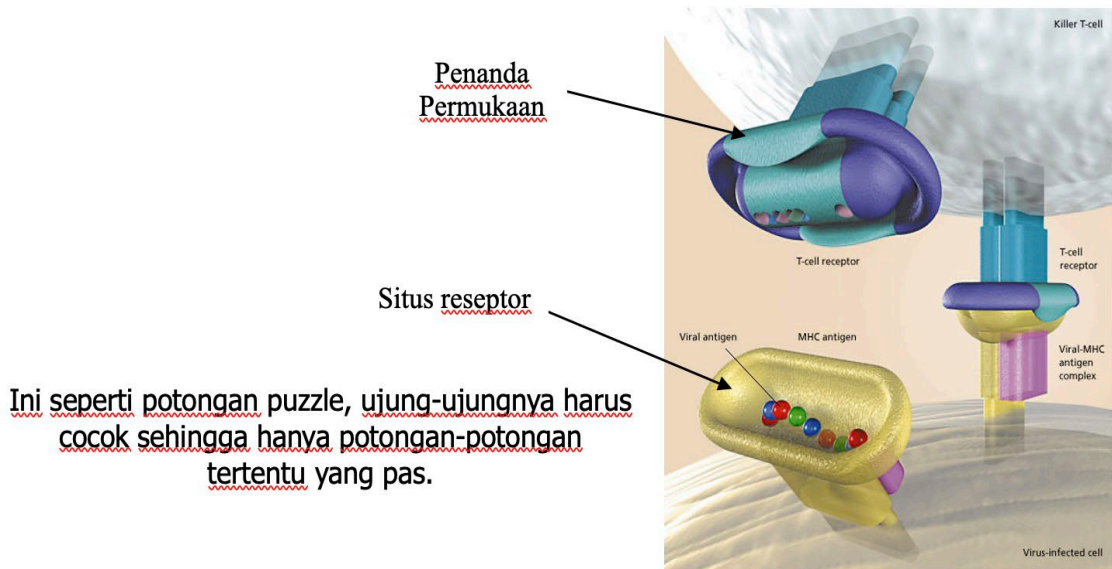
Gambar 21 Virus (Bakteriofag, Influenza)

Virus tidak dapat berkembang biak dengan sendirinya, ia harus menyerang sel inang dan mengambil alih aktivitas sel, yang pada akhirnya menyebabkan penghancuran sel dan membunuhnya. (Virus memasuki sel, membuat salinan dirinya sendiri dan menyebabkan sel pecah melepaskan lebih banyak virus.)



Gambar 22 Perbanyak Virus pada Sel Inangnya.

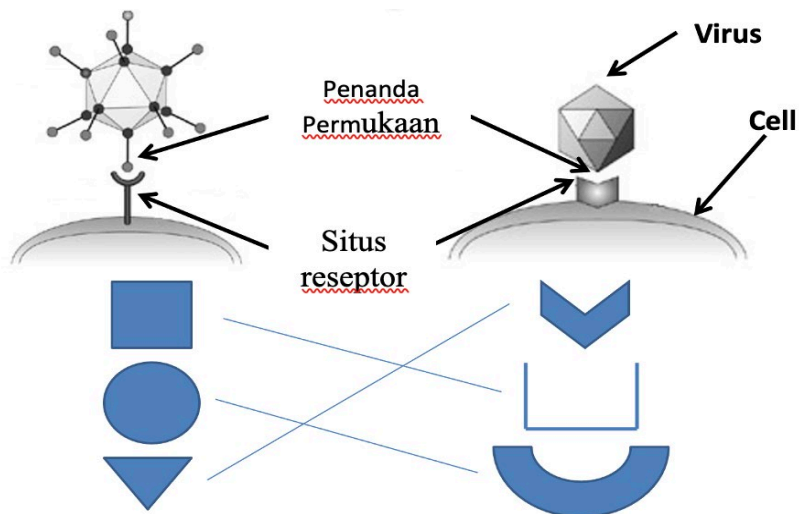
Virus tertentu hanya dapat menyerang jenis sel tertentu, mereka dikatakan spesifik, Contoh: Virus rabies hanya menyerang sel otak atau saraf.



Ini seperti potongan puzzle, ujung-ujungnya harus cocok sehingga hanya potongan-potongan tertentu yang pas.

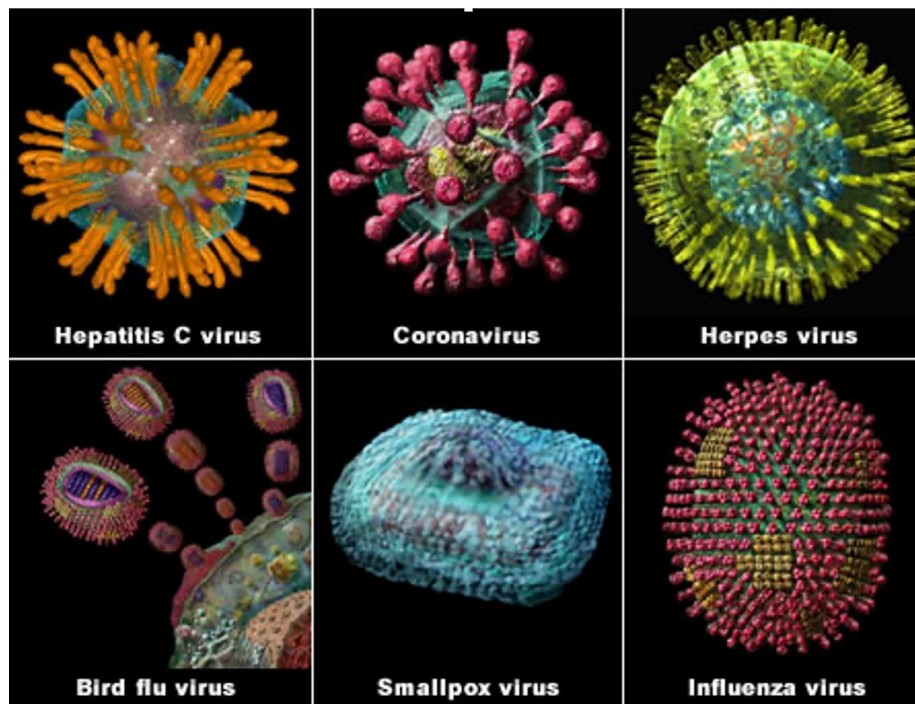
Gambar 23 Spesifikasi Virus

Virus mengenali sel yang dapat diinfeksi dengan mencocokkan penanda permukaannya dengan situs reseptor pada sel.



Gambar 24. Penanda permukaan Virus

Penyakit Manusia yang disebabkan oleh virus: Kutil, Pilek, Influenza (flu), Cacar, Ebola, Herpes, AIDS, Cacar Air, Rabies dan lain-lain. Virus mengganggu keseimbangan/keseimbangan normal tubuh. Virus dapat dicegah dengan vaksin, tetapi tidak diobati dengan antibiotik. Beberapa jenis virus dapat dilihat sebagai berikut.

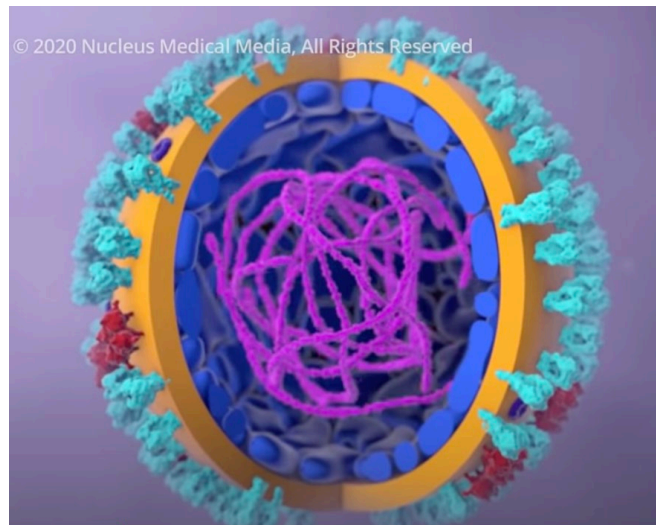


Gambar 25 Beberapa jenis Virus

Tabel 4 Perbedaan virus dengan sel makhluk hidup lainnya adalah sebagai berikut.

N0.	Karakter	Virus	Sel Hidup
1	Struktur	Memiliki RNA atau DNA (tengah), selubung protein (kapsid)	Membran sel, sitoplasma, materi genetik, organel
2	Reproduksi	Salinan itu sendiri hanya di dalam replikasi sel inang	Aseksual atau Seksual
3	Materi Genetik	DNA atau RNA	DNA dan RNA
4	Pertumbuhan dan perkembangan	Tidak	Ya, Organisme Multiseluler
5	Mendapatkan dan Menggunakan Energi	Tidak	Ya
6	Respon terhadap Lingkungan	Tidak	Ya
7	Berubah seiring waktu	Tidak	Ya

Salah satu penjelasan tentang virus seperti SAR-COV-2 dapat dilihat dalam link video berikut ini.



Gambar 26 SAR-COV-2
Sumber: HAI, 2020

Apa itu Virus Corona & COVID-19 (Corona Virus Disease 2019)

Coronavirus adalah keluarga besar virus, beberapa menyebabkan penyakit pada manusia, dan lainnya menyebabkan penyakit pada hewan, seperti kelelawar, unta, dan musang. Virus corona pada manusia menyebabkan beberapa penyakit, seperti flu, sindrom pernapasan akut parah (SARS). Coronavirus sebelumnya termasuk SARS-CoV dan MERS-CoV yang juga merupakan sindrom pernapasan akut. *Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2* (SARS-Cov-2) adalah penyakit pernapasan yang disebabkan oleh coronavirus, yang disebut SARS-associated coronavirus (SARS-CoV). SARS-CoV-2 adalah jenis baru dari coronavirus yang sebelumnya belum pernah diidentifikasi pada manusia. Coronavirus adalah virus berselubung, berukuran kecil berdiameter 65–125 nm dan mengandung RNA untai tunggal sebagai bahan nukleat, dengan ukuran mulai dari 26 hingga 32 kbs.

Virus penyebab COVID-19 yang dikenal sebagai SARS-CoV-2 pertama kali muncul di Wuhan, China, pada akhir tahun 2019. Wabah ini telah menyebar ke seluruh China ke negara-negara lain di seluruh dunia. Pada akhir Januari, virus corona baru telah dinyatakan sebagai darurat kesehatan masyarakat yang menjadi perhatian internasional oleh WHO. Gejala yang paling sering dilaporkan termasuk demam, batuk kering dan kelelahan, dalam kasus ringan orang mungkin hanya pilek atau sakit tenggorokan. Dalam kasus yang paling parah, orang dengan virus dapat mengalami kesulitan bernapas, dan pada akhirnya dapat mengalami kegagalan organ, beberapa kasus berakibat fatal. Prinsip umum pencegahan dan pengendalian infeksi untuk mencegah atau membatasi penularan COVID-19 adalah dengan menerapkan prinsip 3M yaitu:

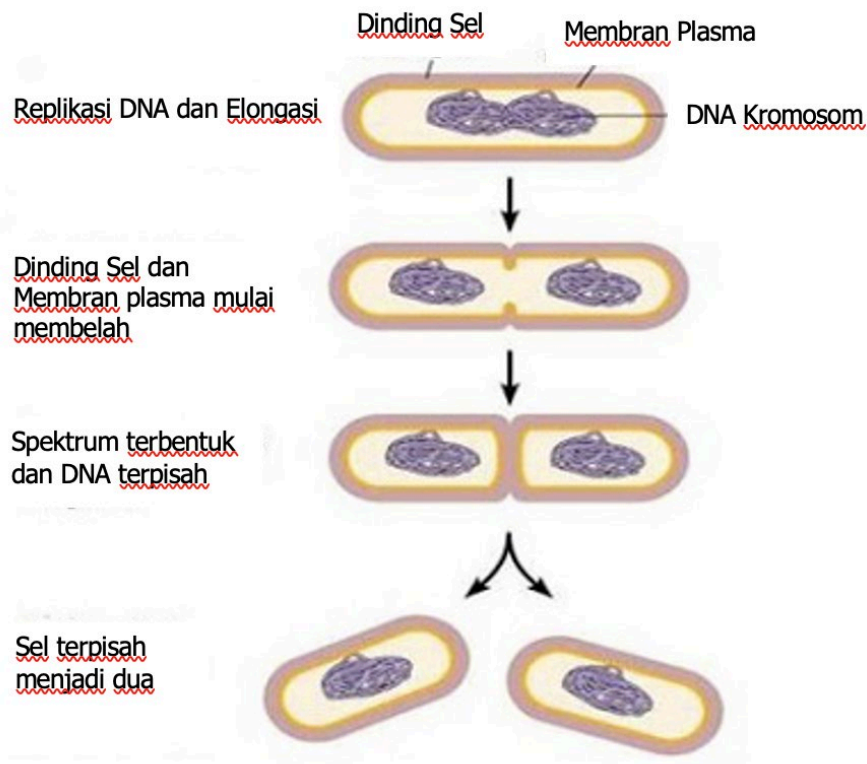
- A. Menjaga Jarak fisik selama wabah COVID-19
- B. Mencuci tangan memakai sabun dengan air mengalir
- C. Memakai masker standar yang dikeluarkan oleh pemerintah.

Gejala klinis rata-rata masa inkubasi adalah 4 hari dengan rentang waktu 2 sampai 7 hari. Masa inkubasi dengan menggunakan distribusi lognormal yaitu berkisar antara 2,4 sampai 15,5 hari. Gejala umum di awal penyakit adalah demam, kelelahan atau myalgia, batuk kering. Serta beberapa organ yang terlibat seperti pernapasan (batuk, sesak napas, sakit tenggorokan, hemoptisis atau batuk darah, nyeri dada), gastrointestinal (diare, mual, muntah), neurologis (kebingungan dan sakit kepala). Namun tanda dan gejala yang sering dijumpai adalah demam (83-98%), batuk (76-82%), dan sesak napas atau dyspnea (31-55%). Pasien dengan gejala yang ringan akan sembuh dalam waktu kurang lebih 1 minggu, sementara pasien dengan gejala yang parah akan mengalami gagal napas progresif karena virus telah merusak alveolar dan akan menyebabkan kematian. Kasus kematian terbanyak adalah pasien usia lanjut dengan penyakit bawaan seperti kardiovaskular, hipertensi, diabetes mellitus, dan parkinson. Seperempat pasien yang dirawat di rumah sakit Wuhan memiliki komplikasi serius berupa aritmia, syok, cedera ginjal akut dan acute respiratory distress syndrome (ARDS).

E. REPRODUKSI SEL

Memperbanyak diri atau reproduksi merupakan salah satu ciri makhluk hidup, yaitu memproduksi individu baru yang sama dengan induknya. Reproduksi tingkat sel merupakan dasar dari reproduksi makhluk hidup, bahkan bagi makhluk uniselular dengan reproduksi sel sudah menyempurnakan proses siklus hidupnya. Pada eukariot sel terbagi menjadi sel vegetatif dan sel generatif, dan siklus hidupnya juga dapat dilaksanakan melalui siklus vegetatif (aseksual) atau secara generatif (seksual). Kedua siklus tersebut memerlukan sistem reproduksi sel yang berbeda, yaitu reproduksi vegetatif dan reproduksi seksual (generatif). Pada prokaryot walaupun ada proses mirip seksual, namun reproduksi selnya hanya satu jenis, yaitu reproduksi vegetatif.

Reproduksi prokaryot dengan cara pembelahan biner, bakteri memperbanyak diri melalui pembelahan sel secara biner, di mana satu sel akan memperbanyak diri menjadi dua sel. Oleh karena bakteri merupakan makhluk bersel tunggal maka sel baru yang terbentuk dari pembelahan tersebut sudah merupakan makhluk hidup baru. Jadi, panjang daur hidup bakteri sama dengan panjang daur hidup sel. Sebelum melakukan pembelahan, sel dewasa akan melakukan sintesis bahan-bahan yang diperlukan untuk membuat sel baru. Kromosom yang tadinya terdapat bebas di dalam plasma, pada awal pembelahan sel akan menempel pada membran sel, dan kemudian bersamaan dengan pembesaran ukuran sel berlangsung sintesis DNA atau penggandaan kromosom. Setelah dua kromosom baru selesai dibentuk, dan sel telah mencapai pembesaran maksimum maka akan terjadi pembelahan sel dan terbentuklah dua sel baru.



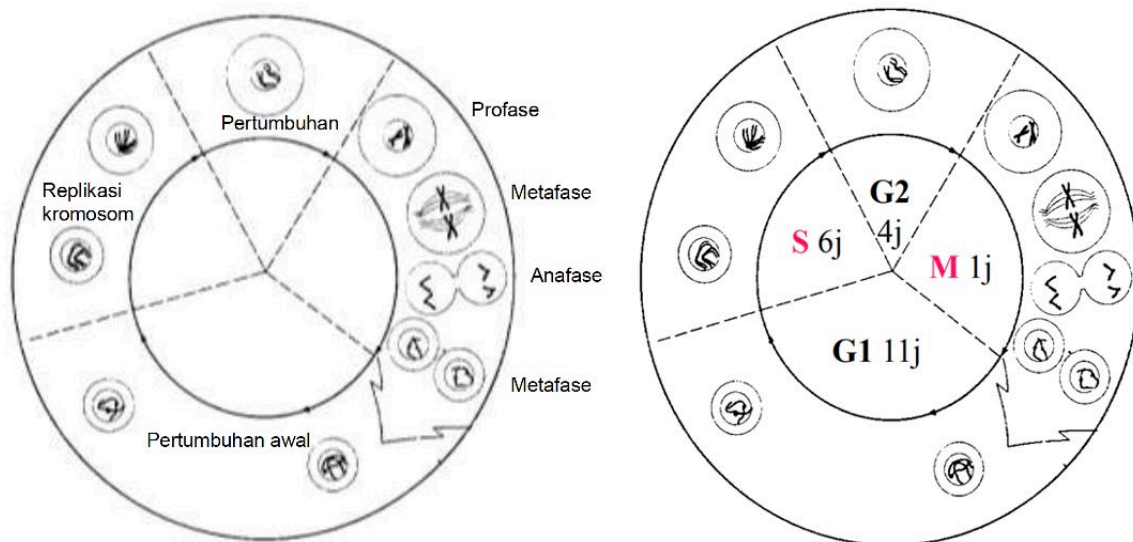
Gambar 27 Pembelahan Biner

Reproduksi virus memerlukan sel inang, Virus karena keterbatasan perangkat yang ada pada tubuhnya, mengharuskan dirinya menjadi parasit (atau parasit obligat) agar dapat bermetabolisme dan berkembang biak. Virus akan menyuntikkan bahan genetiknya ke dalam sel inang, kemudian bahan genetik tersebut akan mengambil alih peran bahan genetik sel inang dalam mengendalikan metabolisme sel. Dengan diambilnya kendali maka metabolisme di dalam sel akan berubah menjadi proses yang mendukung perkembangbiakan virus. Untuk mempelajari proses reproduksi virus kita bahas, sebagai model siklus yang berlangsung pada bakteriofage. Bakteriofaga (sering dipanggil faga) ialah virus yang menyerang bakteri sebagai sel inangnya. Terdapat dua jenis siklus hidup bakteriofaga, yaitu daur litik dan daur lisogenik. Pada daur litik virus akan menginfeksi bahan genetiknya, dan kemudian langsung memperbanyak diri dalam sel inang dan selanjutnya virus-virus baru itu akan keluar dari sel inang dan menginfeksi sel baru (Lihat pada pembahasan virus). Sedangkan pada daur lisogenik virus setelah menginfeksi sel inang tidak langsung berkembang biak, melainkan berintegrasikan

bahan genetiknya dengan kromosom inang. Selanjutnya, virus yang telah terinfeksi tersebut akan terbawa dalam proses reproduksi sel inang.

Pada daur litik, faga akan menyuntikkan asam nukleat ke dalam sel, kemudian asam nukleat virus akan memproduksi enzim yang akan merusak DNA sel inang. Selanjutnya, kromosom virus akan mengambil alih peranan kromosom sel inang, dalam mengendalikan proses metabolisme sel. Dengan memanfaatkan perangkat yang dipunyai sel inang (seperti sistem enzimatik, ribosom), bahan genetik serta mantel protein virus kemudian diperbanyak. Selanjutnya, dilakukan penyusunan virus utuh dari komponen-komponennya yang baru disintesis. Pada tahap akhir, virus-virus akan merusak dinding sel inang (dengan cara lisis) dan virus-virus baru akan terhambur keluar siap untuk menginfeksi sel berikutnya.

Reproduksi sel eukariot mencakup kelompok terbesar dari makhluk hidup; meliputi makhluk bersel tunggal dan bersel ganda. Pada eukariot bersel tunggal seperti khamir, sebagaimana pada bakteri, reproduksi sel sudah merupakan reproduksi sel makhluk hidup.



Gambar 28 Siklus reproduksi sel eukaryote

Pada eukariot bersel ganda, seperti tumbuhan, reproduksi sel merupakan satu bagian dari proses pertumbuhan dan perkembangan. Pada titik tumbuh, seperti pada

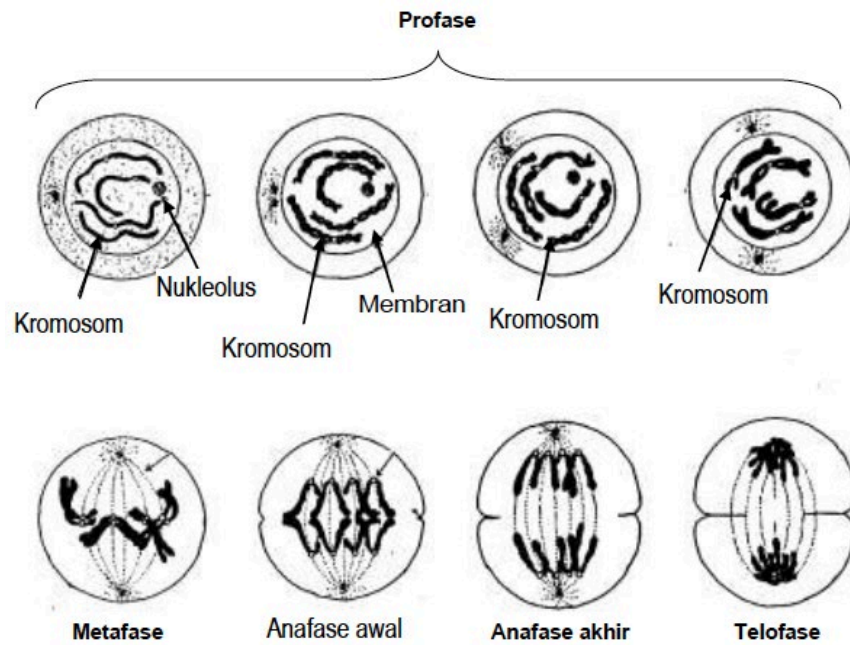
ujung akar atau pucuk, akan terjadi pembelahan sel secara berkelanjutan. Siklus reproduksi sel eukariot terbagi ke dalam empat tahap sebagai berikut $G1 \rightarrow S \rightarrow G2 \rightarrow M$. Tahap awal ketika sel akan melakukan pembelahan (periode G1) sel akan memperbesar diri dan aktif melakukan sintesis bahan-bahan yang diperlukan untuk pembelahan sel. Selanjutnya sel akan mensintesis atau menggandakan bahan genetiknya (periode S) sehingga setiap kromosom menjadi dua kali lipat. Persiapan akhir pembelahan (periode G2) sel akan tumbuh kembali mencapai ukuran maksimum dan mensintesis perangkat-perangkat mitosis. Setelah seluruh perangkat telah disiapkan sel kemudian akan membelah (periode M) menghasilkan sel-sel baru.

Pada periode M terdapat dua cara pembelahan, yaitu mitosis dan meiosis yang satu dengan yang lain mempunyai tujuan yang berbeda. Mitosis merupakan cara untuk memperbanyak sel, pembelahan suatu sel menghasilkan dua sel anak yang sama dengan sel induknya. Sedangkan meiosis merupakan cara untuk menghasilkan sel gamet dari sel induk gamet. Sel-sel gamet yang dihasilkan dapat berbeda satu dari yang lain dan juga berbeda dari sel induk gamet.

Pada makhluk bersel ganda terdapat dua jenis sel, yaitu sel badan (sel somatik), dan sel nutfah (sel generatif). Sel nutfah merupakan sel penyusun jaringan induk yang akan menghasilkan sel-sel gamet. Sel nutfah terdapat pada organ-organ penghasil gamet, seperti anter dan putik. Sel somatik ialah sel yang menyusun semua jaringan di luar jaringan nutfah. Reproduksi pada sel somatik berlangsung pada proses pertumbuhan, dan dilakukan dengan cara mitosis. Reproduksi pada sel nutfah berlangsung pada saat produksi sel gamet, dilakukan dengan cara meiosis. Mitosis juga terjadi pada proses pembentukan gamet yaitu bila diperlukan untuk memperbanyak sel-sel gamet hasil meiosis.

Reproduksi Vegetatif melalui mitosis, secara garis besar mitosis dapat dibagi ke dalam 4 tahap, yaitu profase, metafase, anafase, dan telofase. Interfase merupakan tahapan antara dua pembelahan sel; periode ini mencakup tahapan G1, S, dan G2. Pada tahap ini sel ditandai oleh hadirnya membran yang membungkus inti. Kromosom tidak tampak karena pada tahap ini kromosom terdapat dalam bentuk

molekul DNA yang tidak menggulung sehingga terlalu halus untuk dapat dilihat di bawah mikroskop cahaya. Apabila sel akan membelah diri maka sel akan melakukan sintesis DNA atau reproduksi kromosom, periode S, dan melakukan pembesaran ukuran sel periode G2 yang selanjutnya sel akan masuk ke dalam periode pembelahan sel.



Gambar 29 Tahapan Mitosis

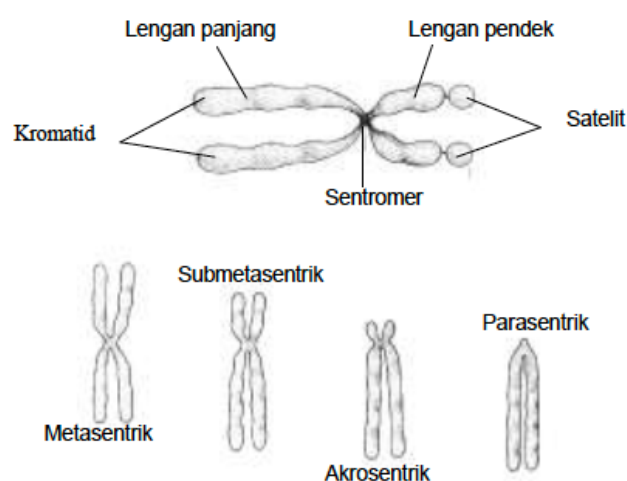
Selanjutnya secara lengkap proses mitosis dapat dilihat animasinya pada tayangan video berikut ini.



Gambar 30 Video Mitosis
Sumber: NDSU Vcell, 2019

Profase, Pada tahap ini terjadi kondensasi kromosom yang sebelumnya telah digandakan pada interfase atau periode S. Kondensasi kromosom berlangsung

melalui proses penggulangan DNA sehingga terjadi penebalan dan pemendekan ukuran kromosom sehingga pada akhir proses penggulangan kromosom menjadi lebih pendek dan tebal; tiap kromosom terpisah satu sama lain. Bentuk seperti ini akan mempermudah pergerakan kromosom dalam pembelahan sel. Profase dapat dibagi menjadi 3 tahap, yaitu awal, tengah, dan akhir. Profase awal ditandai dengan mulai tampaknya serat-serat kromatin. Pada profase tengah sudah terlihat pemisahan kromosom yang satu dengan yang lain, kromosom sudah mempunyai bentuk yang tebal dan pendek. Proses penggulangan DNA akan berjalan terus dan pada tahap profase akhir, kromosom akan mempunyai ketebalan serta pemendekan maksimum. Oleh karena kromosom telah digandakan pada periode S maka pada profase akhir terlihat semua kromosom sudah menjadi dua kali lipat. Namun, masing-masing kromosom anak masih disatukan pada satu titik yang disebut sentromer. Kedua kromosom anakan yang masih disatukan oleh sentromer disebut kromatid. Letak sentromer merupakan ciri khas dari setiap kromosom. Berdasarkan posisi sentromernya, kromosom dikelompokkan menjadi metasentrik (sentromer terletak di tengah kromosom); parasentrik (sentromer terletak di ujung kromosom); submetasentrik (sentromer dekat pada salah satu ujung kromosom). Pada kromosom tertentu terdapat penyempitan sekunder, (penyempitan primer ialah sentromer) sehingga terdapat bentuk bulat bola pada ujung kromosom yang disebut sebagai satelit. Satelit digunakan sebagai salah satu ciri kromosom.



Gambar 31 Morfologi Kromosom pada Saat Pembelahan Sel

Metafase, ditandai dengan lenyapnya membran inti, kemudian muncul serat-serat halus dari dua kutub yang berlawanan. Serat tersebut akan menempel pada

sentromer dan menarik kromosom ke arah dua kutub yang berlawanan. Daya tarik yang seimbang menyebabkan kromosom akan terletak pada bidang yang terdapat di tengah sel. Bidang imajinasi tersebut dinamakan bidang ekuator dan posisi kromosom pada bidang ekuator merupakan ciri tahap metafase. Metafase merupakan tahap yang paling cocok untuk studi kromosom karena akibat posisinya yang terbesar menyebabkan jumlah kromosom dapat dihitung dengan tepat, dan bentuk kromosom dapat dipelajari dengan seksama.

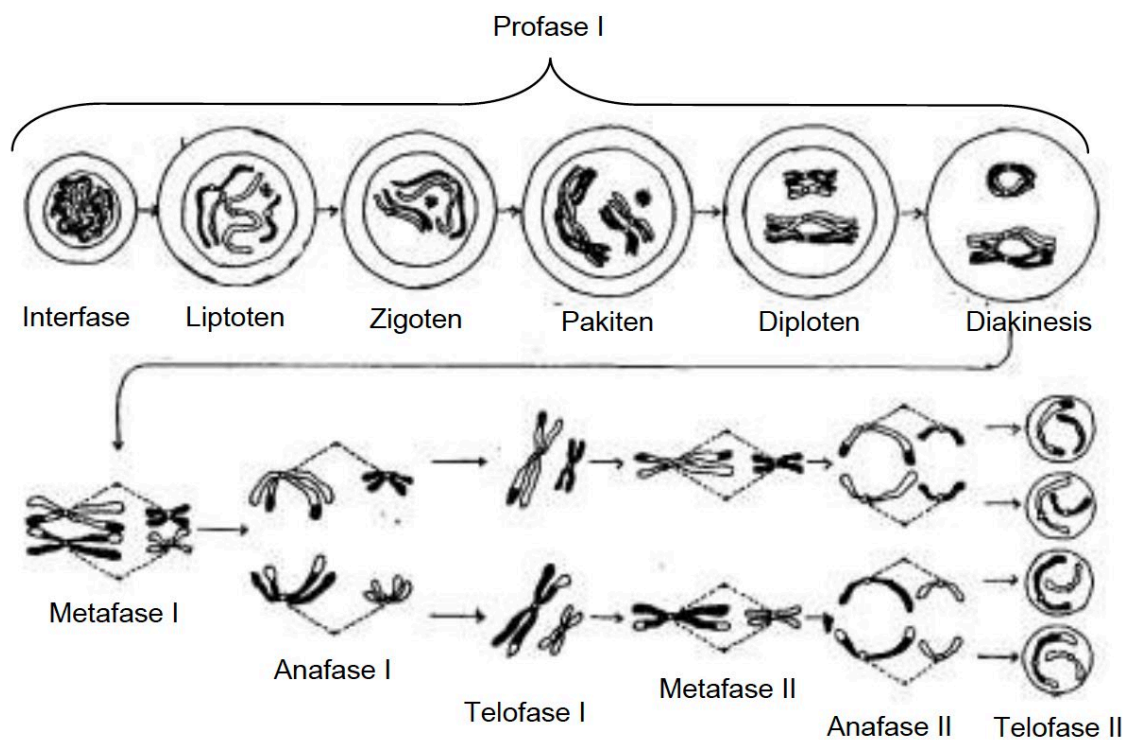
Anafase, daya tarik benang-benang akan menyebabkan kedua kromatid anak akan terlepas dari ikatan sentromer, menjadi dua kromosom baru. Kedua kromosom baru itu akan bermigrasi ke dua kutub yang berlawanan.

Telofase, Pada tahap akhir ini, kromosom-kromosom baru sudah terpisah dan berkumpul pada kutub yang berbeda. Kemudian, membran inti akan muncul membungkus dua kelompok kromosom yang sudah terpisah itu dalam dua inti baru. Setelah terbentuk dua inti, kemudian akan terjadi pemisahan sitoplasma, dengan pembentukan dinding yang memisahkan kedua inti menjadi dua sel baru. Dengan terbentuknya dua sel baru maka berakhirilah periode mitosis dan sel kembali ke tahap interfase atau lebih tepatnya masuk ke periode G1. Pada periode ini sel akan membesar sampai mencapai ukuran sel dewasa.

Reproduksi generatif melalui meiosis, berlangsung pada sel atau jaringan nutfah, pada saat pembentukan sel gamet. Proses meiosis pada dasarnya mirip dengan mitosis, kecuali pada meiosis, sebelum terjadinya pemisahan kromatid telah terjadi pemisahan pasangan kromosom homolog. Pada sel somatik diploid setiap kromosom mempunyai pasangannya, yang disebut pasangan homolog. Setiap kromosom mempunyai struktur yang sama dengan pasangan homolognya. Adanya pasangan kromosom homolog ini berasal dari perkawinan atau penggabungan gamet dari kedua induknya. Kebalikannya pada saat pembentukan gamet, melalui meiosis, pasangan kromosom homolog dipisahkan lagi. Secara garis besar meiosis dapat dibagi ke dalam dua periode pembelahan sel; pembelahan I dan pembelahan II atau sering disebut meiosis I dan meiosis II. Pada setiap periode pembelahan tersebut terdapat tahap yang lebih kecil yang mirip tahapan yang ada pada mitosis; yaitu

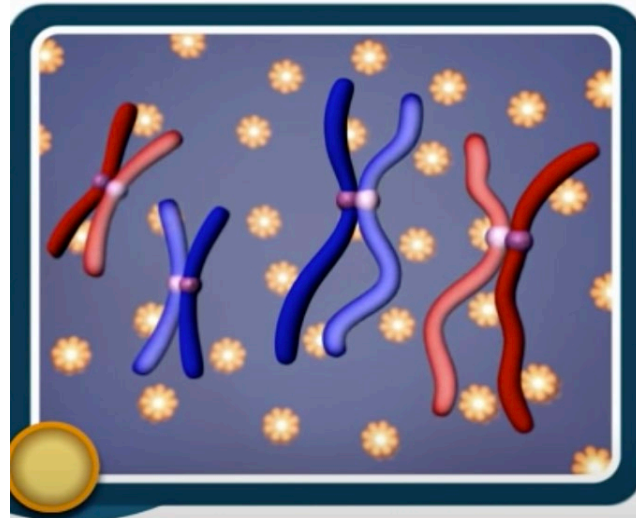
Profase I; metafase I; anafase I; telofase I; untuk meiosis I, serta profase II, metafase II, anafase II, dan tolefase II untuk meiosis II. Sebelum profase II atau setelah telofase I, kadang-kadang sel berada dalam tahapan interfase tetapi sering juga tanpa adanya fase antara tersebut.

Profase I. Seperti pada mitosis, tahap ini merupakan periode kondensasi DNA atau kromosom untuk mendapatkan struktur yang pendek. Profase I dapat dibagi menjadi tahapan leptonema; zigonema; pakinema; diplonema, dan diakinesis. Pada periode leptonema kondensasi DNA berjalan, menghasilkan benang yang tebal. Proses penebalan berjalan terus dan kromosom mulai berpasangan dengan homolognya. Adanya perpasangan kromosom homolog menunjukkan bahwa meiosis sudah memasuki tahap zigonema. Pada periode pakinema, semua kromosom yang telah mempunyai pasangan akan terus memendek sehingga setiap pasangan kromosom terlihat terpisah dari pasangan yang baru. Pasangan dua kromosom homolog disebut bivalen.



Gambar 32 Tahap-tahapan Meosis

Selanjutnya secara lengkap proses meiosis dapat dilihat animasinya pada tayangan video berikut ini.



Gambar 33 Video Meosis
Sumber: NDSU Vcell, 2019

Penggulungan kromosom akan berjalan terus sampai akhirnya tiap kromosom nampak dalam bentuk kromatid yang disatukan oleh sentromer. Penampakan dua kromatid merupakan tanda tahapan diplonema. Pada perpasangan bivalen akan terlihat ada empat kromatid yang berpasangan, setiap dua kromatid disatukan oleh satu sentromer, dan disebut kromatid. Dua kromatid lainnya yang tidak disatukan oleh sentromer disebut kromatid tidak bertetangga. Dalam satu bivalen, dua kromatid bertetangga dapat saling melilit dan bertukar ruas satu dengan yang lain. Pertukaran ruas kromatid dari dua kromosom homolog disebut pindah silang. Pindah silang ini sangat bermanfaat bagi organisme, yaitu dalam bentuk kombinasi baru (rekombinan) pada saat pembentukan turunan-turunan persilangan sehingga diperoleh keragaman genetik.

Metafase I. Serat gelendong keluar dari kutub yang berlawanan dan mengait pada sentromer dari kromosom homolog yang telah berpasangan. Akibat daya tarik dari kedua kutub maka semua bivalen terletak pada bagian tengah sel, yaitu pada bidang ekuatorial. Perpasangan kromosom homolog ini tidak terjadi pada mitosis.

Anafase I: Dimulai dengan bergerakinya kromosom yang homolog ke dua kutub yang berlawanan akibat tarikan benang gelendong. Berbeda dengan yang terjadi pada

mitosis, pada tahap ini yang berpisah adalah pasangan kromosom homolog, dengan dua kromatid bersaudara masih tetap terikat pada sentromernya. Pada mitosis yang berpisah adalah kromatidnya. Jadi, pada fase ini terjadi pemisahan gugus ploidi kromosom sehingga pada kedua kutub akan berkumpul masing-masing satu ploidi kromosom.

Telofase I: Tahapan ini ditandai dengan tibanya kromosom yang bermigrasi di dua kutub yang berbeda. Pada setiap kutub akan berkumpul satu gugus ploidi kromosom, yang merupakan separuh jumlah gugus ploidi kromosom sel induk. Setiap kromosom pada saat ini berada dalam bentuk dua kromatid bersaudara yang terikat pada sentromernya. Pengumpulan gugus kromosom pada kedua kutub merupakan ciri berakhirnya tahap meiosis I. Proses yang terjadi antara meiosis I dan meiosis II berbeda-beda untuk setiap organisme (tergantung spesiesnya). Pada spesies tertentu, misalnya pada manusia, setelah telofase I terdapat interfase yang ditandai dengan munculnya inti sel yang membungkus dua kelompok kromosom, sedangkan pada spesies lain setelah telofase I langsung terjadi meiosis II.

Tahapan profase II kadang-kadang tidak ditemukan, dimana setelah telofase I dilanjutkan pembelahan kedua yang terlihat dengan munculnya benang gelendong yang menarik kromatid pada sentromernya ke dua kutub yang berbeda. Akibat tarikan serat yang seimbang kromosom akan terletak pada bidang ekuator (metafase II), dan tarikan yang berlawanan itu kemudian akan menyebabkan dua kromatid bersaudara berpisah dan bergerak ke arah yang berlawanan, hal ini merupakan anafase II.

Pada tahap akhir, yaitu telofase II, kromosom berkumpul pada kutub-kutub yang berbeda, dan membran inti muncul membungkus kelompok kromosom tersebut. Pada saat ini kromosom yang terdapat pada setiap kelompok sudah bukan gabungan kromatid lagi. Setelah melewati dua kali pembelahan maka dari satu sel akan dihasilkan empat sel dengan masing-masing sel mengandung kromosom separuh jumlah sel awal. Kelompok empat sel yang dihasilkan dari satu sel melalui meiosis disebut tetrad.

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan pertama biokimia 1 pada pokok bahasan pondasi biokimia yang telah disajikan, kemudian amatilah peristiwa atau kejadian sehari-hari disekeliling saudara yang berhubungan dengan karakteristik makhluk hidup. Bagaimanakah karakteristik beberapa makhluk hidup disekitar lingkungan saudara?

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, kemudian amatilah makhluk hidup disekeliling saudara, bahaslah bersama kelompok saudara: bagaimana makhluk hidup dapat melangsungkan kehidupannya? Bagaimana makhluk hidup mendapatkan energi? bahaslah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan.

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang karakteristik makhluk hidup. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang bagaimana makhluk hidup dapat melangsungkan kehidupannya. Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

4. APLIKASI

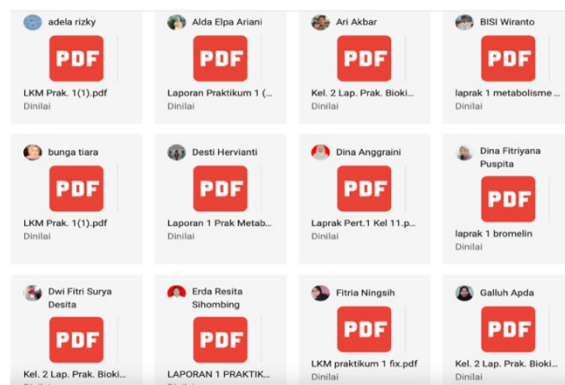
Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang karakteristik makhluk hidup. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di upload, cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal-hal berikut ini.

- a. Bagaimana karakteristik Makhluk Hidup?
- b. Bagaimana makhluk hidup dapat memperoleh energi?

- c. Bagaimana bagian-bagian penyusun makhluk hidup dapat berinteraksi?
- d. Gambarkan dan Jelaskan Perbedaan sel Prokaryot dan Eukaryot?
- e. Gambarkan dan jelaskan perbedaan sel hewan dan sel tumbuhan?
- f. Bagaimana virus dapat melangsungkan kehidupannya?

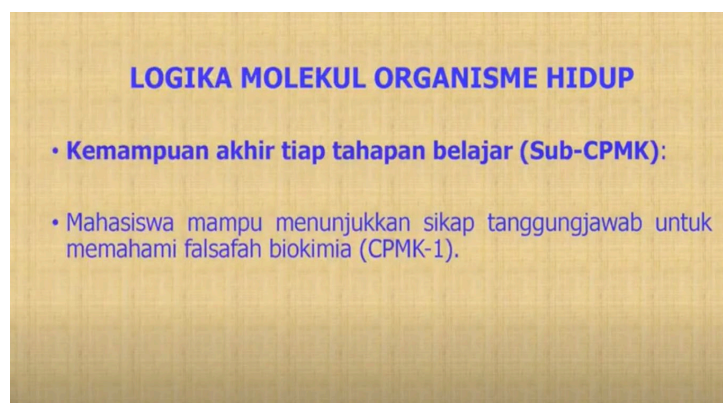
REFLEKSI

Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 1 Pondasi Biokimia". Selanjutnya laporan tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id> Laporan 1 pondasi biokimia minimal memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar Pustaka. Contoh submit laporan1 Pondasi Biokimia.



Gambar 34. Submit Laporan 1 Pondasi Biokimia

Materi perkuliahan pokok bahasan pondasi biokimia dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.



Gambar 35 Paparan materi Pondasi Biokimia

Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di disubmit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

1. Tuliskan dan Jelaskan karakteristik makhluk hidup
2. Tuliskan Struktur:
 - a. Adenosin triposfat (ATP)
 - b. Adenosin diposfat (ADP)
 - c. Adenosin monoposfat (AMP)
 - d. Sitosin triposfat
3. Tuliskan dan Jelaskan fungsinya masing-masing Komposisi Biomolekul utama pada makhluk hidup.
4. Tuliskan, gambarkan dan Jelaskan Perbedaan sel Prokaryot dan Eukaryot
5. Tuliskan, gambarkan dan jelaskan perbedaan sel hewan dan sel tumbuhan
6. Tuliskan dan jelaskan masing-masing fungsi organel sel
7. Jumlah molekul terlarut di dalam sel terkecil mikoplasma merupakan sel terkecil yang di ketahui, berbentuk bulat dan berdiameter kira-kira $0,33 \mu\text{m}$. Karena ukuranya yang kecil mikoplasma mudah menembus filter yang di rancang untuk menyaring bakteri. Salah satu spesies, *Mycoplasma pneumoniae*, merupakan organisme penyebab penyakit, terutama jenis pneumonia.
 - (a) D-Glukosa merupakan nutrien penghasil energi utama pada sel mikoplasma , Konsentrasi senyawa ini , di dalam sel mikoplasma kira-kira $1,0 \text{ mM}$. Hitunglah jumlah molekul glukosa di dalam sebuah sel $6,02 \times 10^{23}$ Volume benda bulat $= \frac{4}{3} \pi r^3$.
 - (b) Cairan intraseleuler sel mikoplasma mengandung 10 g heksokinase (BM 100.000) per liter. Hitunglah konsentrasi molar heksoksine, enzim pertama yang diperlukan untuk metabolisme glukosa yang menghasilkan energi.
8. Komponen E. coli Sel E . coli berbentuk batang kira kira $2 \mu\text{m}$ panjang nya dan $0,8 \mu\text{m}$ diameternya. Volume benda berbentuk silinder $= \mu r^2 h$, h = panjang.

- (a) Jika densitas rata-rata *E. coli* (terutama terdiri dari air) $1,1 \text{ g/cm}^3$, berapakah berat sebuah sel *E. coli*?
- (b) Dinding sel pelindung pada *E. coli* mempunyai ketebalan 10 nm. Hitunglah persentase volume dinding dari volume total bakteri?
- (c) *E. coli* tumbuh dan berkembang biak dengan cepat karena mengandung sampai 15.000 ribosom (diameter 18 nm) yang melangsungkan sintesa protein. Berapa persen dari total volume sel yang di tempati oleh ribosom? (bentuk ribosom: bulat).
9. Informasi Genetik di dalam DNA *E. coli*. Informasi genetik yang terkandung di dalam DNA terdiri dari rangkaian linier kata-kata sandi yang berurutan, dikenal sebagai kodon. Tiap kodon merupakan urutan spesifik dari tiga nukleotida (tiga nukleotid berpasangan di dalam untai ganda DNA), dan masing-masing bersandian dengan unit asam amino tunggal di dalam suatu protein. Berat molekul DNA *E. coli* mencapai kira-kira $2,5 \times 10^9$. Berat molekul rata-rata dari sepasang nukleotida adalah 660, dan tiap pasangan nukleotida mengambil tempat kira-kira 0,34 nm disepanjang rantai DNA.
- (a) Dengan informasi ini, hitunglah panjang suatu molekul DNA *E. coli*. Bandingkan panjang molekul DNA dengan ukuran nyata sel. Bagaimanakah molekul ini dapat menempatkan diri di dalam sel?
- (b) Anggaph rata-rata protein di dalam *E. coli* terdiri dari rangkaian 400 asam amino. Berapa jumlah maksimum protein yang dapat disandi oleh molekul DNA suatu *E. coli*?
10. Kecepatan yang Tinggi dari Metabolisme Bakteri. Sel bakteri mempunyai kecepatan metabolisme yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sel hewan. Pada keadaan ide, satu bakteri akan berlipat ganda ukurannya, dan membelah diri dalam 20 menit, sedangkan waktu yang diperlukan oleh sel hewan mencapai 24 jam. Kecepatan tinggi dan metabolisme bakteri membutuhkan nisbah luas permukaan terhadap volume sel yang tinggi.
- (a) Mengapa nisbah permukaan terhadap volume berpengaruh terhadap kecepatan metabolisme maksimum?
- (b) Hitunglah nisbah permukaan terhadap volume bagi bakteri *Neisseria gonorrhoeae* yang berbentuk bulat dengan diameter $0,5 \mu\text{m}$ (bakteri

penyebab penyakit gonorrhoe). Bandingkan dengan nisbah permukaan terhadap volume bagi amuba yang berbentuk globular, suatu sel eukaryotic dengan diameter $150 \mu\text{m}$.

(c) Dugalah nisbah permukaan terhadap volume bagi manusia berbobot 70 kg. (Petunjuk: perlakukan manusia sebagai suatu bentuk bulat dengan beberapa bentuk silinder). Bandingkan dengan nisbah permukaan terhadap volume bagi suatu bakteri.

11. Virus adalah parasit intraseluler obligat yang berukuran antara 20-300 nm, bentuk dan komposisi kimianya bervariasi, tetapi hanya mengandung RNA atau DNA saja. Jelaskan bagaimana mekanisme virus dalam menginfeksi sel inangnya?
12. Virus biasanya merujuk pada partikel-partikel yang menginfeksi sel-sel eukariota (organisme multisel dan banyak jenis organisme sel tunggal) dan istilah bakteriofaga atau faga dipakai untuk virus yang menyerang jenis-jenis sel prokariota (bakteri dan organisme lain yang tidak berinti sel). Jelaskan perbedaan sel eukariota dan Virus?
13. Reproduksi prokaryot dengan cara pembelahan biner, bakteri memperbanyak diri melalui pembelahan sel secara biner, di mana satu sel akan memperbanyak diri menjadi dua sel. Jelaskan system reproduksi dari prokaryot?.
14. Pada eukariot bersel tunggal seperti khamir, sebagaimana pada bakteri, reproduksi sel sudah merupakan reproduksi sel makhluk hidup. Jelaskan system reproduksi dari eukariot?.
15. Reproduksi virus memerlukan sel inang, Virus karena keterbatasan perangkat yang ada pada tubuhnya, mengharuskan dirinya menjadi parasit (atau parasit obligat) agar dapat bermetabolisme dan berkembang biak. Jelaskan system reproduksi dari virust?.

DAFTAR PUSTAKA

1. Al-Mossawi, A.H., Al-Garawi, Z.S. 2018. *Qualitative tests of amino acids and proteins and enzyme kinetics*. Baghdad: Mustansiriyah University.
2. Gade, M. (2014). Struktur, Fungsi Organel Dan Komunikasi Antar Sel. *Al Ulum Seri Sainstek*, 1(2) pp. 1-9.
3. HAI. 2020. Corona Virus Covid-2019. Sydney: Clinical Excellence Commission.
4. Irianto, A. (2008) *Mikrobiologi Lingkungan*. In: Tinjauan Umum Mikrobiologi Lingkungan. Universitas Terbuka, Jakarta, pp. 1-41.
5. Jusuf, M. (2008) *Genetika*. In: Biologi dan Reproduksi Sel. Universitas Terbuka, Jakarta, pp. 14-24.
6. Levani, Y., Prastya, A.D., Mawaddatunnadila, S. 2021. Coronavirus Disease 2019 (COVID-19): Patogenesis, Manifestasi Klinis dan Pilihan Terapi. *Jurnal Kedokteran dan Kesehatan*, 17(1) hal 44-57.
7. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
8. Nucleus Medical Media. (2015). Biology: Cell Structure. <https://youtu.be/URUJD5NEXC8>, diakses pada tanggal 1 Juli 2020.
9. NDSU VCell. (2019). Meiosis. <https://youtu.be/-DLGfd-Wpr4>, diakses pada tanggal 15 Juli 2020.
10. NDSU VCell. (2019). Mitosis. <https://youtu.be/C6hn3sA0ip0>, diakses pada tanggal 15 Juli 2020.
11. Nucleus Medical Media. (2020). COVID-19 Animation: What Happens If You Get Coronavirus?. <https://youtu.be/5DGwOJXSxqg>, diakses pada tanggal 26 September 2020.
12. Pelczar, M.J. Jr., Chan, E.C.S. & Krieg, N.R. (1986). *Microbiology*. NewYork: McGrawHill Book Co.
13. Ramus, V. 2020. *Qualitative Tests for Proteins*. <https://www.youtube.com/watch?v=6YPWipP-Qe8&feature=youtu.be> (diakses pada tanggal 15 Oktober 2020).
14. Subroto, E., dkk. 2020. The Analysis Techniques Of Amino Acid And Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).

15. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
16. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2022. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
17. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2022. Paparan materi Pondasi Biokimia. <https://youtu.be/Xeo1J55wru8>, Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
18. Suprobowati, O.D., Kurniati, I. 2018. *Virologi*. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
19. Thenawidjaja, M. 1990. *Dasar-dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
20. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
21. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
22. Won Chan Kim. *Principles of Biochemistry*. <https://www.kaznaru.edu.kz> . diakses pada tanggal 25 september 2020.

BAB 2 BIOMOLEKUL

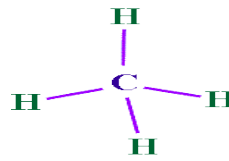
1. ORIENTASI

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya (CPMK2), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan biomolekul dalam makhluk hidup (Sub-CPMK2). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

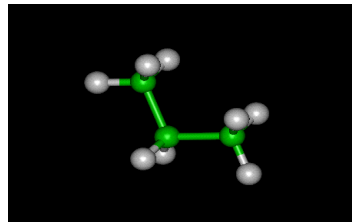
A. Senyawa Karbon

Biomolekul adalah molekul-molekul berbeda penyusun makhluk hidup yang saling berinteraksi sebagai logika molekuler keadaan hidup. Pada umumnya biomolekul adalah senyawa karbon. Biomolekul memiliki banyak gugus fungsional seperti gugus hidroksil, amino, keton, karboksil, amida dan lain-lain. Semua biomolekul mengandung rantai atau cincin karbon. Karbon memiliki 4 elektron kulit terluar (valensi = 4) Oleh karena itu dapat membentuk ikatan kovalen, karenanya memiliki ikatan yang kuat. Diantaranya kemampuan atom karbon untuk membentuk ikatan tunggal, ganda dengan sesamanya, yang memungkinkan pembentukan struktur kerangka yang sangat bervariasi: struktur linier, bercabang dan siklik yang mengikat berbagai jenis gugus fungsional. Banyak biomolekul yang berada dalam bentuk asimetri atau khiral, yang disebut enansiomer.

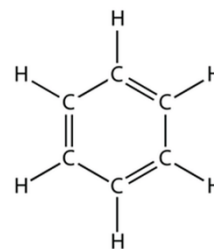
- Keterikatan atom karbon



- Rantai tunggal

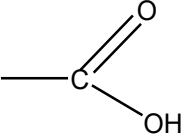
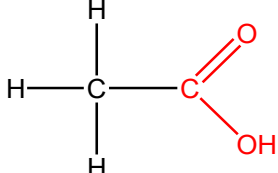
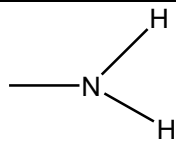
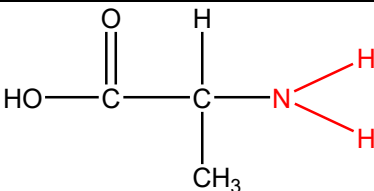
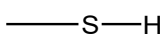
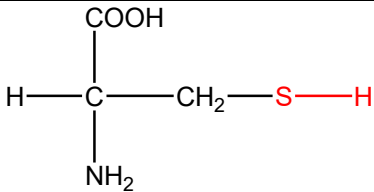
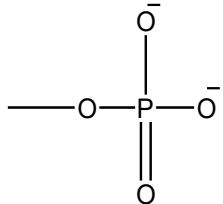
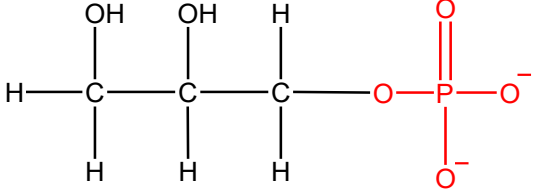
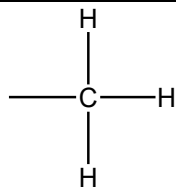
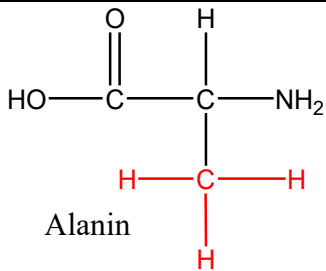


- Cincin

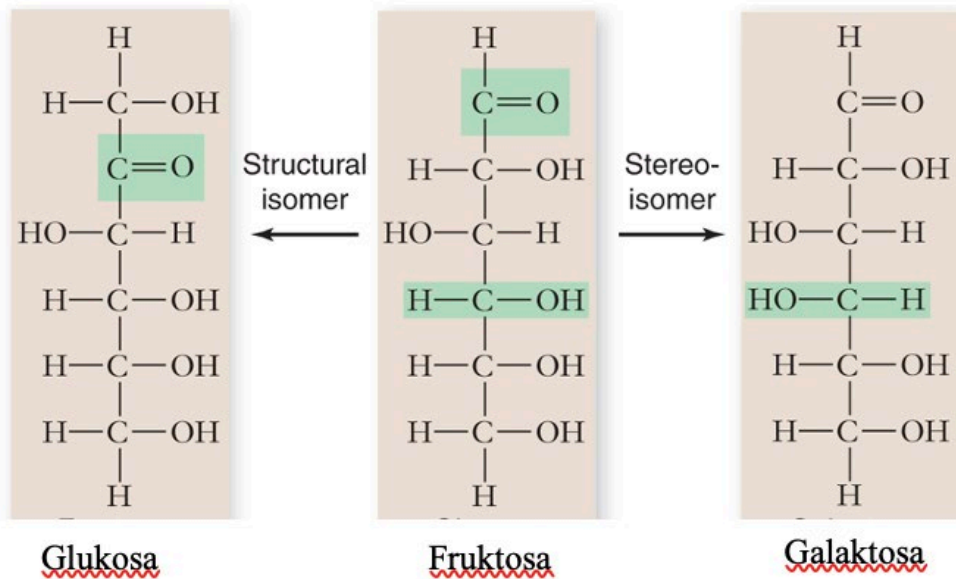


Tabel 5 Gugus fungsional senyawa organik

Gugus Fungsi	Rumus Struktur	Contoh	Ditemukan di
Hidroksil	-OH	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{OH} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \\ \text{Etanol} \end{array} $	Karbohidrat, Protein, Asam nukleat, Lipid
Karbonil	$ \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ -\text{C}- \end{array} $	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{O} \\ \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H} \\ \text{Asetaldehida} \end{array} $	Karbohidrat, Asam nukleat

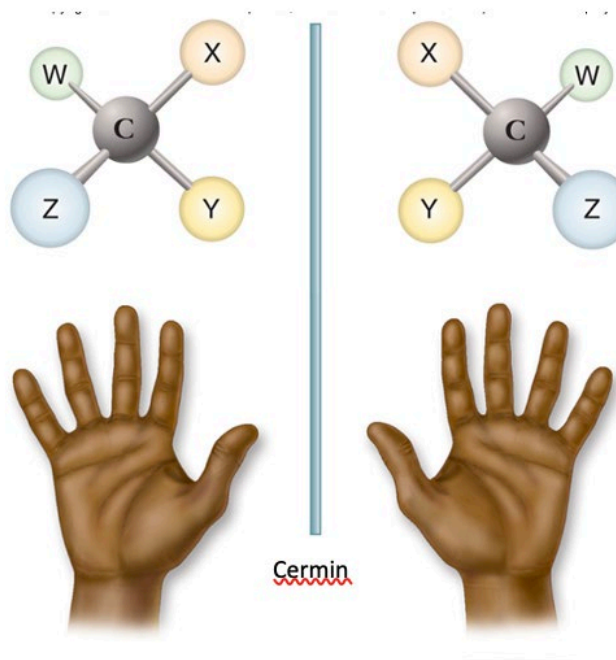
Karboksil		 Asam Asetat	Protein, Lipid
Amino		 Alanin	Protein, Asam nukleat
Sulfhidril		 Sistein	Protein
Fosfat		 Gliserol fosfat	Asam nukleat
Metil		 Alanin	Protein

Isomer memiliki rumus molekul yang sama tetapi strukturnya berbeda



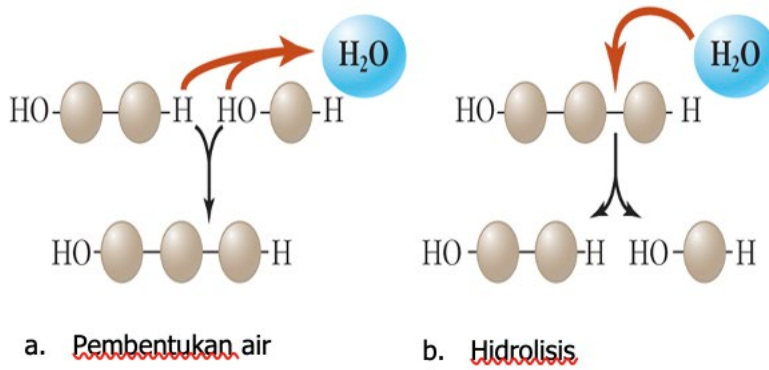
Enantiomer adalah bayangan cermin satu sama lain, salah satu enansiomer tersebut mengandung C yang terikat pada 4 gugus berbeda dan disebut molekul kiral. Molekul kiral dapat memutar cahaya terpolarisasi ke kanan (bentuk D) atau ke kiri (bentuk L) molekul

Contoh: asam amino (bentuk L) gula (bentuk D)



Gambar 36 Kiralitas

Manomer dan Polimer: reaksi pembentukan dan penguraian Air



	Struktur Selular.	Polimer.	Manomer.
<u>Karbohidrat</u>	 <u>Biji pati dalam Kloroplas</u>	 <u>Pati</u>	 <u>Monosakarida</u>
<u>Asam Nukleat</u>	 <u>Kromosom</u>	 <u>Untai DNA</u>	 <u>Nukleotida</u>
<u>Protein</u>	 <u>Filamen Intermediet</u>	 <u>Peptida</u>	 <u>Asam Amino</u>
<u>Lipid</u>	 <u>Sel Adiposa dan tetesan lemak</u>	 <u>Trigliserida</u>	 <u>Asam Lemak</u>

Gambar 37 Polimer dan Manomernya
Sumber: Nelson & Cox, 2015

Kebanyakan senyawa organik didalam sel hidup terdiri dari empat jenis utama biomolekul yaitu sebagai berikut.

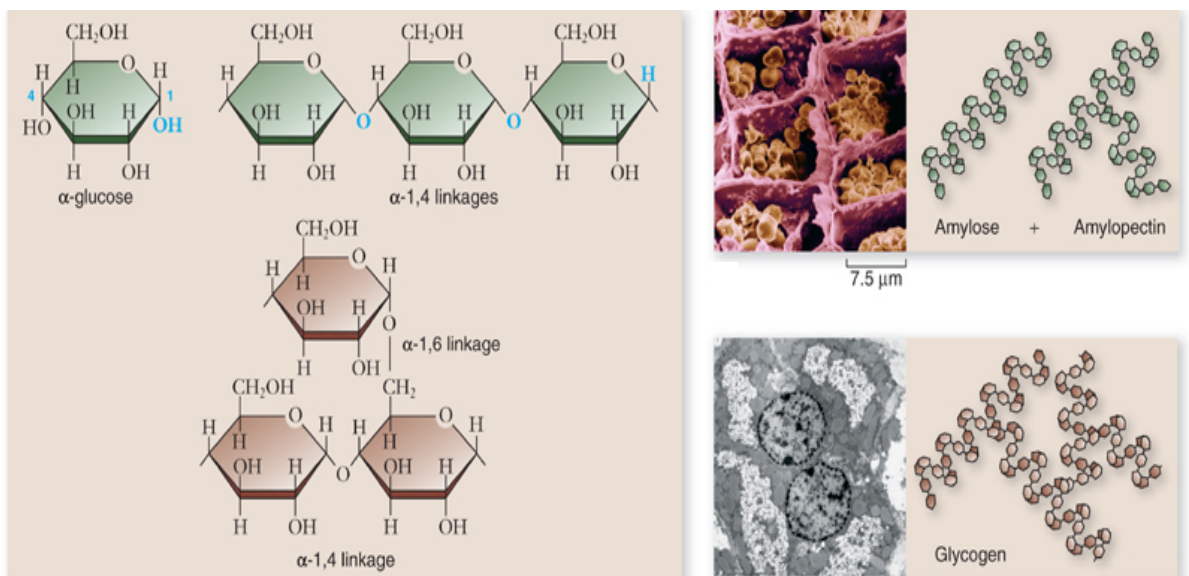
1. Polisakarida
2. Lipid
3. Protein
4. Asam Nukleat

B. Polisakarida

Biomolekul polisakarida terdiri dari karbohidrat dan selulosa. Biomolekul polisakarida merupakan polimer yang dibentuk dari monomer monosakarida. Karbohidrat terbentuk dari manomer α -D-Glukosa melalui ikatan 1,4 α -D-Glikosidik. Sedangkan selulosa terbentuk dari manomer β -D Glukosa melalui ikatan 1,4 β -D Glikosidik.

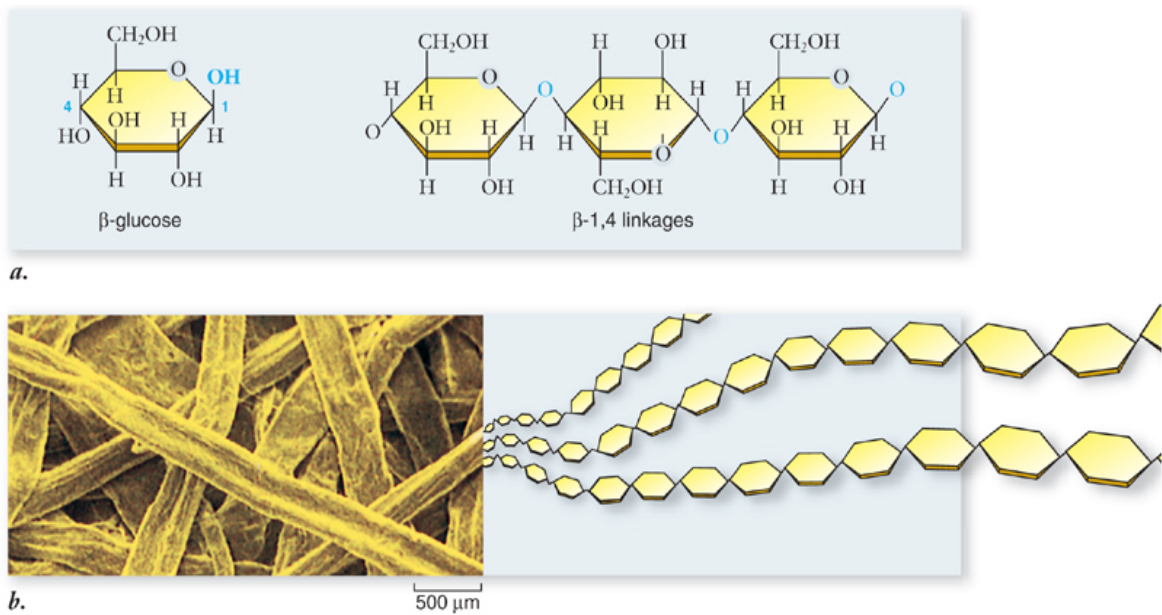
Fungsi Utama Karbohidrat adalah sebagai sumber energi, sebagai pembentuk membran sel. Sedangkan fungsi utama dari selulosa adalah sebagai unsur structural pada bagian luar sel.

Struktur pati dan struktur Glikogen



Gambar 38 Polisakarida
Sumber: Nelson & Cox, 2015

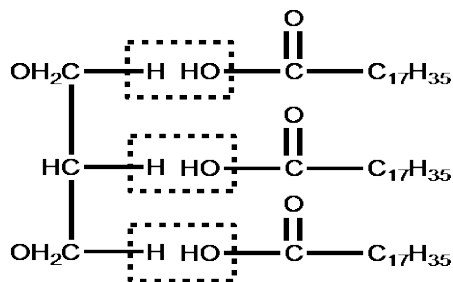
Struktur Selulosa



Gambar 39 Selulosa
Sumber: Nelson & Cox, 2013

C. LIPID

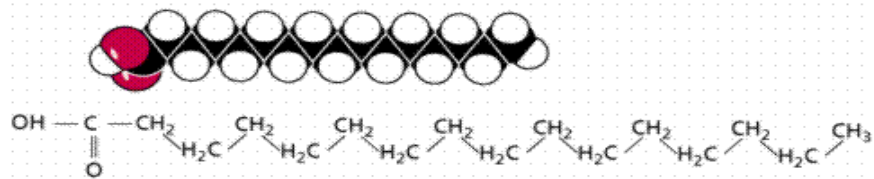
Biomolekul Lipid merupakan polimer yang dibentuk oleh asam-asam lemak dan gliserol. Inti pusat gliserol yang terikat hingga 3 rantai asam lemak.



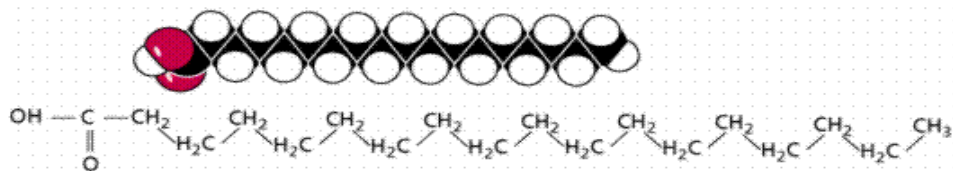
Asam lemak di bagi menjadi 2 golongan yaitu Asam lemak jenuh dan asam lemak tak jenuh. Asam lemak jenuh pada rantai karbonnya hanya memiliki ikatan tunggal sedangkan asam lemak tak jenuh pada rantai karbonnya memiliki ikatan rangkap. Dibawah ini beberapa contoh asam lemak jenuh dan asam lemak tak jenuh sebagai berikut.

Contoh asam lemak jenuh:

Asam Palmitat

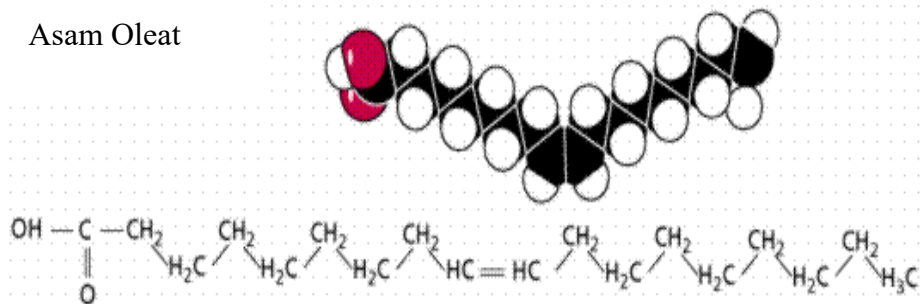


Asam Stearat

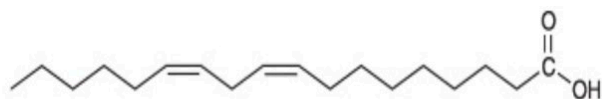


Contoh asam lemak tak jenuh

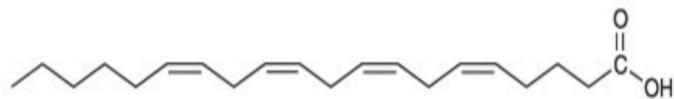
Asam Oleat



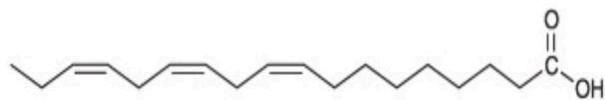
Asam Linoleat



Asam Arachidonat



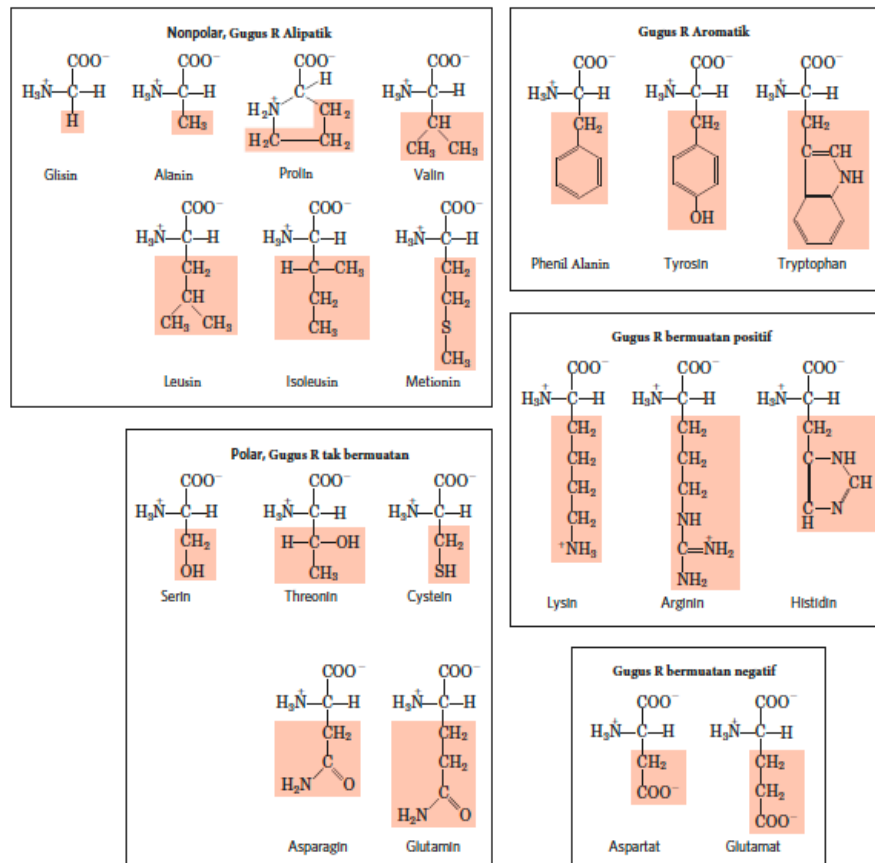
Asam Linolenat



Fungsi Utama Lipid adalah sebagai sumber energi, membentuk sebagian besar membran sel termasuk: Membran plasma, Membran inti, Retikulum Endoplasma (RE), Badan Golgi.

D. Protein

Protein merupakan biomolekul yang sangat penting bagi organisme hidup. Biomolekul protein dibentuk oleh 20 jenis asam amino melalui ikatan peptida.



Gambar 40 Asam Amino

Struktur Protein terdiri dari:

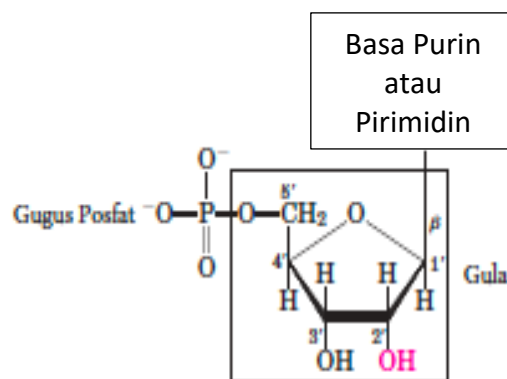
- Struktur Primer
- Struktur Sekunder
- Struktur Tersier
- Struktur Kwarterner

Biomolekul protein berfungsi pembentuk membran sel, sebagai biokatalisator, nutrient, protein transport, protein kontraktif, protein structural, protein pengatur.

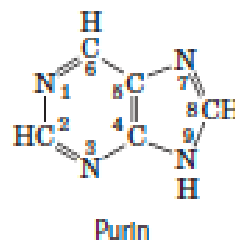
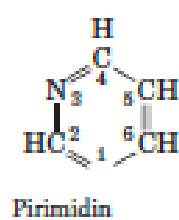
E. Asam Nukleat

Biomolekul asam nukleat terdiri dari Asam deoksiribosa (DNA) dan Ribonuklease (RNA). Biomolekul DNA dan RNA dibentuk dari mono nukleotida. Mono nukleotida dibentuk oleh gula deoksiribosa, basa nitrogen dan gugus fosfat. Basa nitrogen pada DNA terdiri dari 2 golongan yaitu purin dan pirimidin. Basa Purin terdiri dari Adenin dan Guanin, dan basa Pirimidin terdiri dari Sitosin dan Timin. Basa nitrogen pada RNA sama seperti basa nitrogen pada DNA, hanya basa Timin pada DNA, diganti Urasil. Sedangkan gula 2 deoksi ribosa pada DNA, diganti gula Ribosa pada RNA.

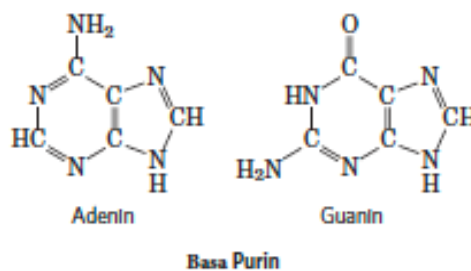
- Struktur DNA

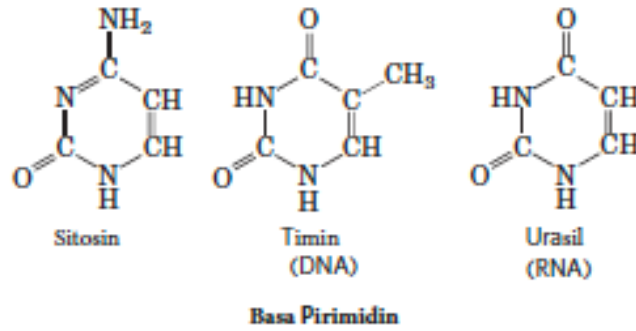


- Struktur Pirimidin dan Purin

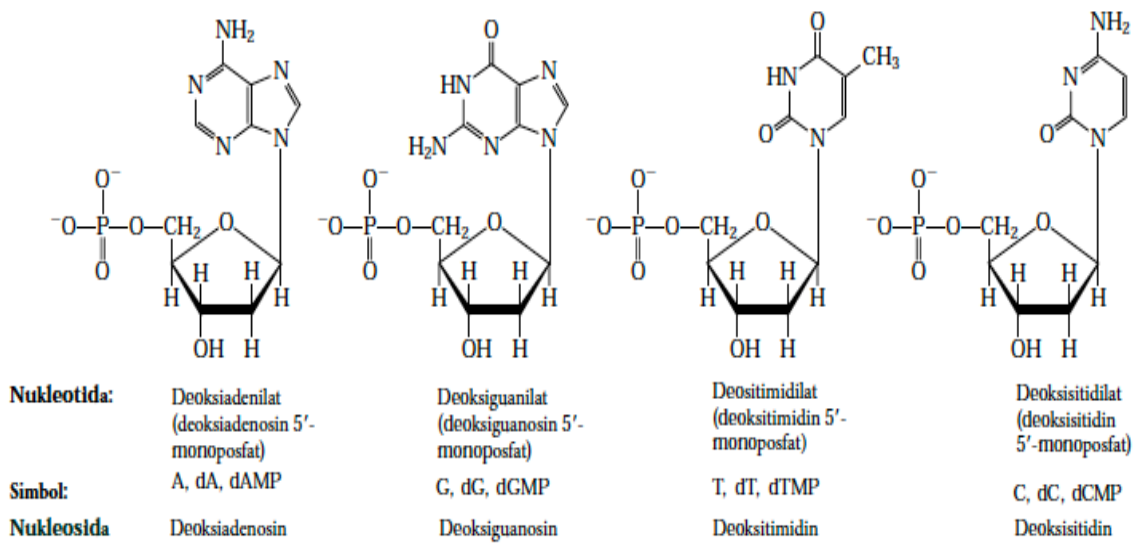


- Basa Nitrogen



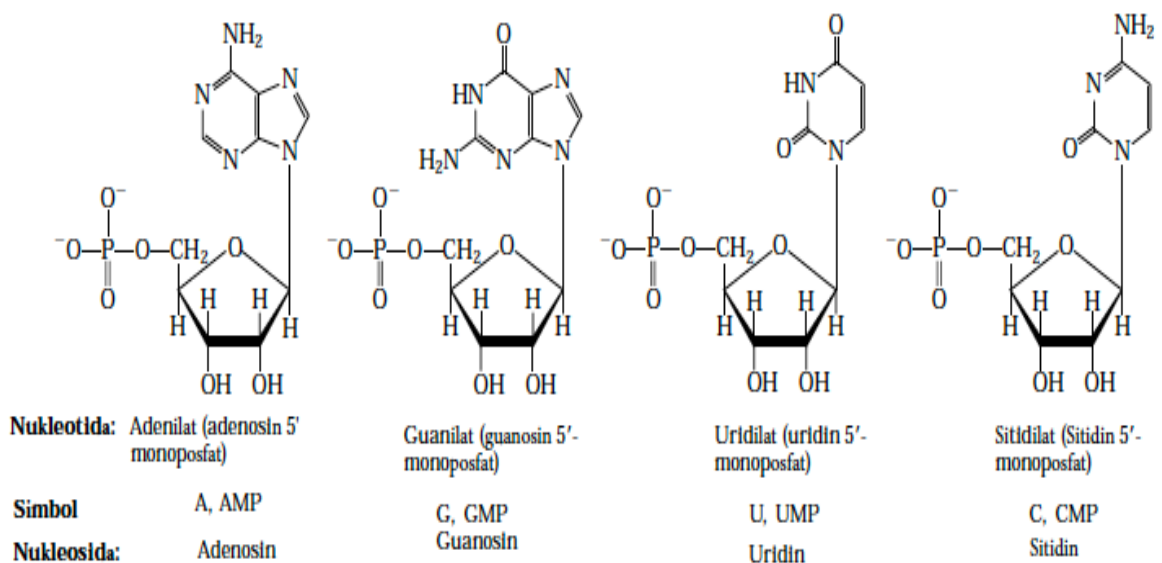


Deoksiribonukleotida



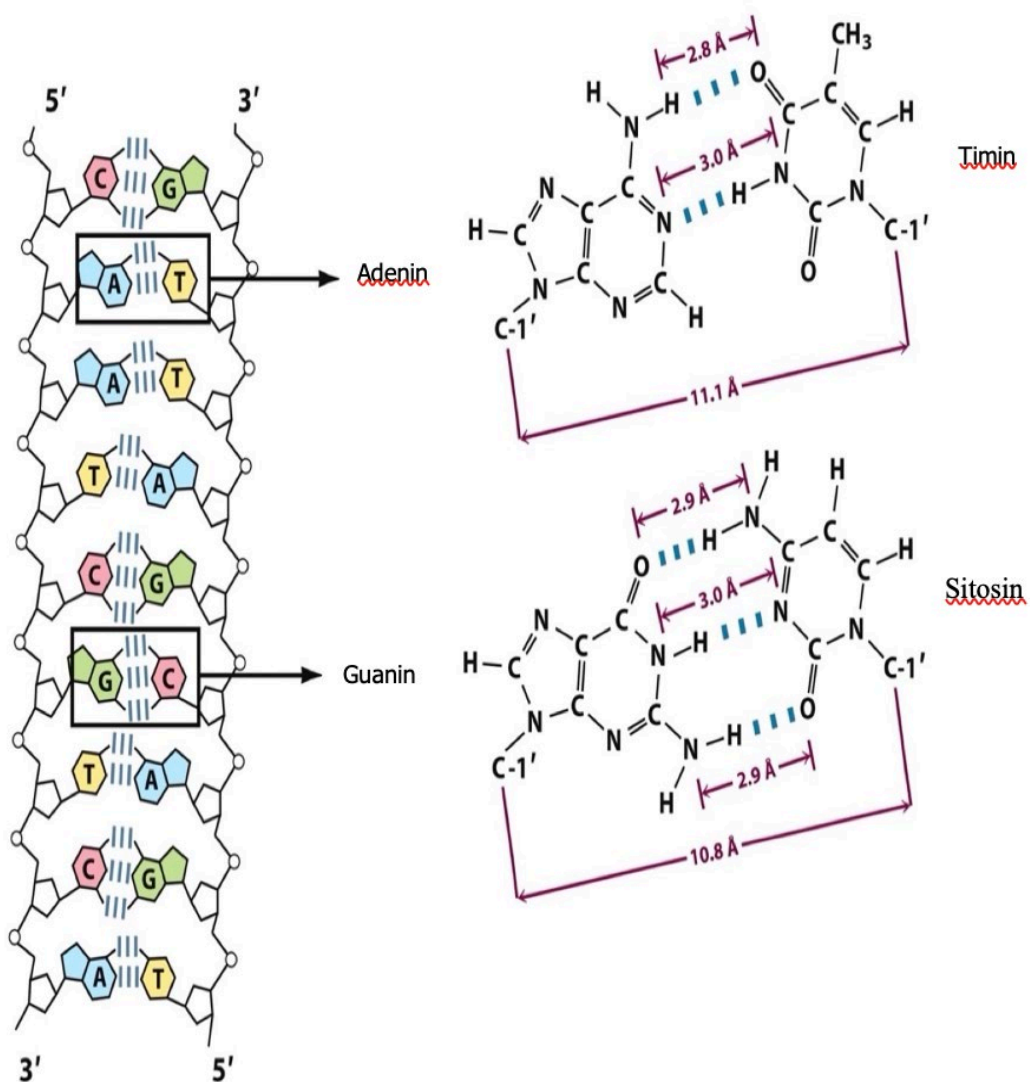
Gambar 41 Deoksiribonukleotida

Ribonukleotida

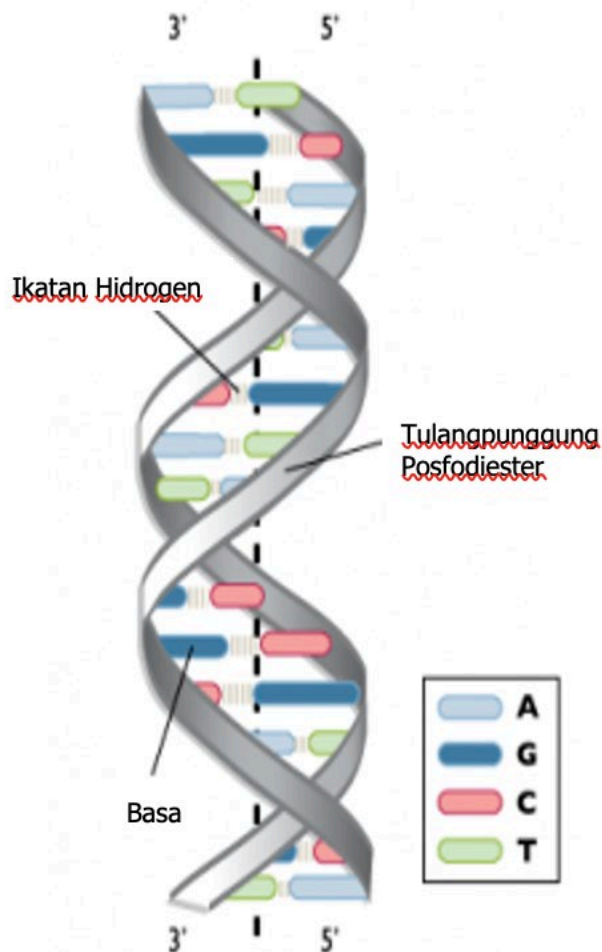


Gambar 42 Ribonukleotida

Fungsi utama biomeleku DNA adalah pembawa sifat keturunan dan fungsi utama RNA adalah sebagai alat untuk sintesa protein. Molekul DNA merupakan polimer nukleotida yang dibentuk oleh mononukleotida melalui ikatan fosfo diester. Ikatan fosfodiester memanjang dari arah 5' ke 3'. Molekul DNA merupakan heliks ganda, yang dihubungkan melalui ikatan hidrogen antara heliksnya. Ikatan hidrogen ini terbentuk dari pasangan-pasangan basa DNA, yaitu basa Adenin berikatan hidrogen dengan basa Timin, dan basa Sitosin berikatan hidrogen dengan Guanin. Ikatan hidrogen yang terbentuk dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 43 Ikatan Hidrogen basa DNA.



Gambar 44 Double heliks DNA.

F. Air

Air adalah zat yang paling melimpah dalam sistem kehidupan, membuat 70% atau lebih dari berat sebagian besar organisme. Organisme hidup pertama di bumi pasti muncul di lingkungan berair, dan perjalanan evolusi telah dibentuk oleh sifat-sifat media berair tempat kehidupan dimulai.

Sifat fisika dan kimia air, seperti gaya tarik menarik antara molekul air dan sedikit kecenderungan air untuk terionisasi sangat penting untuk struktur dan fungsi biomolekul. Molekul air dan produk ionisasinya, H^+ dan OH^- , sangat mempengaruhi struktur, perakitan sendiri, dan sifat semua komponen seluler, termasuk protein, asam nukleat, dan lipid. Interaksi nonkovalen yang bertanggung jawab atas kekuatan dan spesifisitas "pengenalan" di antara biomolekul sangat dipengaruhi oleh sifat air sebagai pelarut, termasuk

kemampuannya untuk membentuk ikatan hidrogen dengan dirinya sendiri dan dengan zat terlarut. Adapun sifat-sifat air sebagai pelarut universal dapat dilihat pada tayangan video berikut ini:



Gambar 45 Air pelarut universal
Sumber: RicochetScience <https://youtu.be/z5Vm56Pu4hU>

Ikatan hidrogen antara molekul air memberikan gaya kohesif yang membuat air menjadi cair pada suhu kamar dan padatan kristal (es) dengan susunan molekul yang sangat teratur pada suhu dingin. Biomolekul polar mudah larut dalam air karena mereka dapat menggantikan interaksi air-air dengan interaksi air-larutan yang lebih menguntungkan secara energi. Sebaliknya, biomolekul nonpolar kurang larut dalam air karena mengganggu interaksi air-air tetapi tidak dapat membentuk interaksi air-larutan. Dalam larutan berair, molekul nonpolar cenderung mengelompok bersama. Ikatan hidrogen dan interaksi ionik, hidrofobik (Yunani, "takut air"), dan van der Waals secara individual lemah, tetapi secara kolektif mereka memiliki pengaruh yang sangat signifikan pada struktur tiga dimensi protein, asam nukleat, polisakarida, dan lipid membran.

Air memiliki titik leleh, titik didih, dan panas penguapan yang lebih tinggi daripada kebanyakan pelarut umum lainnya. Sifat-sifat yang tidak biasa ini merupakan akibat dari gaya tarik menarik antara molekul air yang berdekatan yang memberikan air cair kohesi internal yang besar. Lihat struktur elektron molekul H_2O mengungkapkan penyebab tarik-menarik antarmolekul ini. Setiap

atom hidrogen dari molekul air berbagi pasangan elektron dengan atom oksigen pusat. Geometri molekul ditentukan oleh bentuk orbital elektron terluar dari atom oksigen, yang mirip dengan orbital ikatan sp^3 karbon. Orbital ini menggambarkan tetrahedron, dengan atom hidrogen di masing-masing dua sudut dan pasangan elektron yang tidak digunakan bersama di dua sudut lainnya. Sudut ikatan H—O—H adalah 104,58, sedikit kurang dari 109,58 dari tetrahedron sempurna karena berdesakan oleh orbital atom oksigen yang tidak berikatan. Inti oksigen menarik elektron lebih kuat daripada inti hidrogen (proton); yaitu, oksigen lebih elektronegatif. Ini berarti bahwa elektron bersama lebih sering berada di sekitar atom oksigen daripada hidrogen. Hasil dari pembagian elektron yang tidak sama ini adalah dua dipol listrik dalam molekul air, satu di sepanjang masing-masing ikatan H—O;

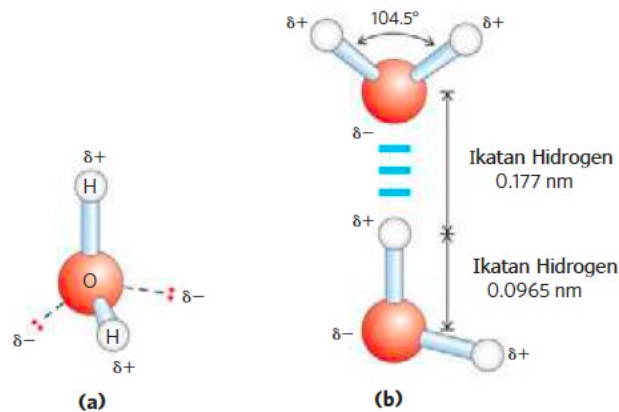
Tabel 6 Titik Leleh, Titik Didih, dan Panas Penguapan Beberapa Pelarut Umum

	Titik lebur(°C)	Titik didih (°C)	Panas penguapan (J/g)*
Air	0	100	2,260
Metanol (CH ₃ OH)	-98	65	1,100
Etanol (CH ₃ CH ₂ OH)	-117	78	854
Propanol (CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH)	-127	97	687
Butanol (CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ OH)	-90	117	590
Aseton (CH ₃ COCH ₃)	-95	56	523
Hexan (CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃)	-98	69	423
Benzena (C ₆ H ₆)	6	80	394
Butana (CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₃)	-135	-0.5	381
Chloroform (CHCl ₃)	-63	61	247

*Energi panas yang diperlukan untuk mengubah 1,0 g zat cair pada titik didihnya dan pada tekanan atmosfer menjadi wujud gasnya pada suhu yang sama. Ini adalah ukuran langsung dari energi yang dibutuhkan untuk mengatasi gaya tarik menarik antar molekul dalam fase cair.

Sumber: Nelson & Cox, 2013

Setiap atom hidrogen membawa muatan positif parsial ($\sigma +$), dan atom oksigen membawa muatan negatif parsial yang besarnya sama dengan jumlah dua muatan positif parsial ($2\sigma -$). Akibatnya, ada gaya tarik elektrostatis antara atom oksigen dari satu molekul air dan hidrogen dari yang lain (gambar dibawah), yang disebut ikatan hidrogen. Ikatan hidrogen relatif lemah. Mereka dalam air cair memiliki energi disosiasi ikatan (energi yang dibutuhkan untuk memutuskan ikatan) sekitar 23 kJ/mol, dibandingkan dengan 470 kJ/mol untuk ikatan kovalen O—H dalam air atau 348 kJ/mol untuk ikatan kovalen C—C.

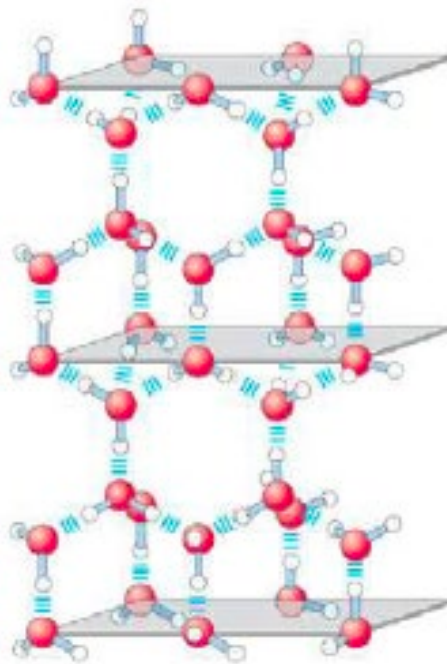
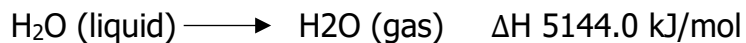
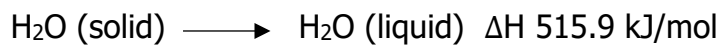


Gambar 46 Struktur molekul air

Struktur molekul air. (a) Sifat dipolar molekul H_2O ditunjukkan dalam model bola-dan-tongkat; garis putus-putus mewakili orbital non-ikatan. Ada susunan hampir tetrahedral dari pasangan elektron kulit terluar di sekitar atom oksigen; dua atom hidrogen memiliki muatan parsial positif (σ^+) dan atom oksigen memiliki muatan negatif parsial (σ^-). (b) Dua molekul H_2O bergabung dengan ikatan hydrogen, ikatan hydrogen lebih panjang dan lebih lemah daripada ikatan kovalen O-H.

Ikatan hidrogen adalah sekitar 10% kovalen, karena tumpang tindih dalam orbital ikatan, dan sekitar 90% elektrostatik. Pada suhu kamar, energi termal dari larutan berair (energi kinetik dari gerakan atom dan molekul individu) memiliki urutan besarnya yang sama dengan yang diperlukan untuk memutuskan ikatan hidrogen. Ketika air dipanaskan, peningkatan suhu mencerminkan gerakan yang lebih cepat dari molekul air individu. Pada waktu tertentu, sebagian besar molekul dalam air cair terikat hidrogen, tetapi masa hidup setiap ikatan hidrogen hanya 1 sampai 20 picoseconds ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$); ketika satu ikatan hidrogen putus, ikatan hidrogen lain terbentuk, dengan pasangan yang sama atau yang baru, dalam 0,1ps. Ungkapan yang tepat "kluster yang berkedip-kedip" telah diterapkan pada kelompok molekul air yang berumur pendek yang saling terkait oleh ikatan hidrogen dalam air cair. Jumlah dari semua ikatan hidrogen antara molekul H_2O memberikan kohesi internal yang besar pada air-cair. Jaringan diperpanjang molekul air terikat hidrogen juga membentuk jembatan antara zat terlarut (protein dan asam nukleat, misalnya) yang memungkinkan molekul yang lebih besar untuk berinteraksi satu sama lain melalui jarak beberapa nanometer tanpa bersentuhan secara fisik.

Susunan orbital yang hampir tetrahedral di sekitar atom oksigen memungkinkan setiap molekul air untuk membentuk ikatan hidrogen dengan sebanyak empat molekul air yang berdekatan. Namun, dalam air-cair pada suhu kamar dan tekanan atmosfer, molekul air tidak teratur dan bergerak terus menerus, sehingga setiap molekul membentuk ikatan hidrogen dengan rata-rata hanya 3,4 molekul lainnya. Di es, di sisi lain, setiap molekul air tetap dalam ruang dan membentuk ikatan hidrogen dengan empat molekul air lainnya untuk menghasilkan struktur kisi yang teratur. Ikatan hidrogen menjelaskan titik leleh air yang relatif tinggi, karena banyak energi panas diperlukan untuk memutuskan proporsi ikatan hidrogen yang cukup untuk mengacaukan kisi kristal es. Ketika es mencair atau air menguap, panas diambil oleh sistem:



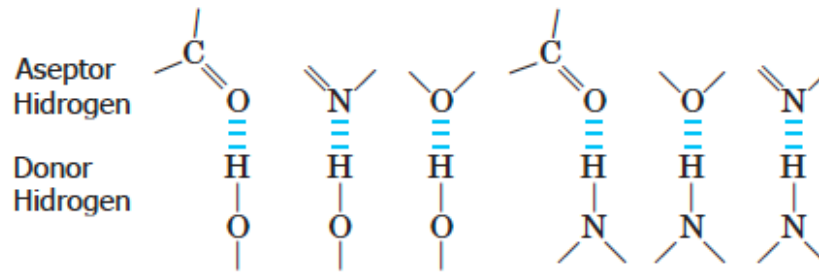
Gambar 47 Ikatan hidrogen dalam es.

Sumber: Nelson & Cox, 2013

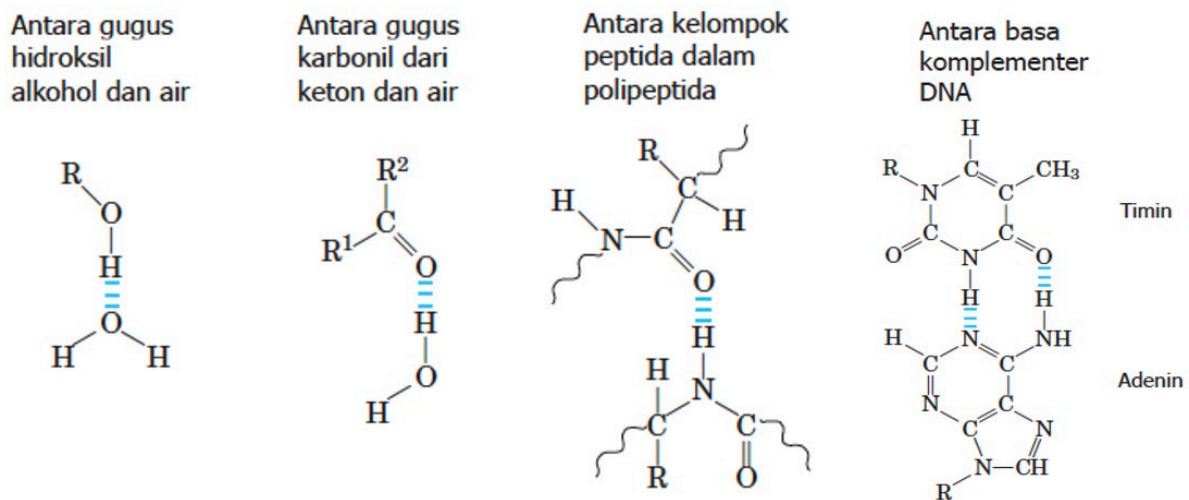
Dalam es, setiap molekul air membentuk empat ikatan hidrogen, maksimum yang mungkin untuk molekul air, menciptakan kisi kristal biasa. Sebaliknya, dalam air cair pada suhu kamar dan tekanan atmosfer, setiap molekul air berikatan hidrogen dengan rata-rata 3,4 molekul air lainnya. Struktur kisi kristal ini membuat es kurang padat daripada air cair, dan dengan demikian es mengapung di atas air cair.

Selama pelelehan atau penguapan, entropi sistem air meningkat ketika susunan molekul air yang sangat teratur dalam es rileks menjadi susunan ikatan hidrogen yang kurang teratur dalam air cair atau ke dalam keadaan gas yang sepenuhnya tidak teratur. Pada suhu kamar, pencairan es dan penguapan air terjadi secara spontan; kecenderungan molekul air untuk berasosiasi melalui ikatan hidrogen sebanding dengan dorongan energik menuju ketidakteraturan. Ingatlah bahwa perubahan energi bebas (ΔG) harus bernilai negatif agar suatu proses terjadi secara spontan: $\Delta G = \Delta H - T \Delta S$, di mana ΔG mewakili gaya penggerak, ΔH perubahan entalpi dari pembentukan dan pemutusan ikatan, dan ΔS perubahan ketidakteraturan. Karena ΔH positif untuk pelelehan dan penguapan, jelas peningkatan entropi (ΔS) yang membuat ΔG negatif dan mendorong perubahan ini.

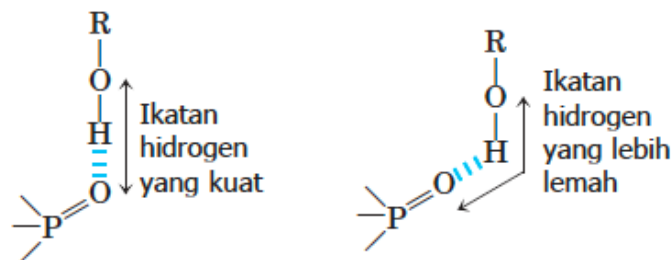
Ikatan hidrogen tidak unik untuk air, mereka mudah terbentuk antara atom elektronegatif (akseptor hidrogen, biasanya oksigen atau nitrogen) dan atom hidrogen yang terikat secara kovalen dengan atom elektronegatif lain (donor hidrogen) dalam molekul yang sama atau yang lain. Atom hidrogen yang terikat secara kovalen dengan atom karbon tidak berpartisipasi dalam ikatan hidrogen, karena karbon hanya sedikit lebih elektronegatif daripada hidrogen dan dengan demikian ikatan C-H hanya bersifat polar sangat lemah. Perbedaan tersebut menjelaskan mengapa butanol ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}_2\text{OH}$) titik didih yang relatif tinggi yaitu 117°C , sedangkan butana ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}_3$) memiliki titik didih hanya $-0,5^\circ\text{C}$. Butanol memiliki gugus hidroksil polar dan dengan demikian dapat membentuk ikatan hidrogen antarmolekul. Biomolekul yang tidak bermuatan tetapi polar seperti gula mudah larut dalam air karena efek stabilisasi ikatan hidrogen antara gugus hidroksil atau karbonil oksigen dari gula dan molekul air polar. Alkohol, aldehida, keton, dan senyawa yang mengandung ikatan N—H semuanya membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air dan cenderung larut dalam air.



Gambar 48 Ikatan hidrogen umum dalam sistem biologis. (Akseptor hidrogen biasanya oksigen atau nitrogen; donor hidrogen adalah atom elektronegatif lain)



Gambar 49 Beberapa ikatan hidrogen yang penting secara biologis



Gambar 50 Arah ikatan hidrogen

Gaya tarik antara muatan listrik parsial paling besar ketika tiga atom yang terlibat dalam ikatan (dalam hal ini O, H, dan O) terletak pada garis lurus. Ketika bagian ikatan hidrogen dibatasi secara struktural (ketika mereka adalah bagian dari molekul protein tunggal, misalnya), geometri ideal ini tidak mungkin dan ikatan hidrogen yang dihasilkan lebih lemah.

Ikatan hidrogen paling kuat ketika molekul-molekul terikat berorientasi untuk memaksimalkan interaksi elektrostatik, yang terjadi ketika atom hidrogen dan dua atom yang membaginya berada dalam garis lurus, yaitu, ketika atom akseptor sejajar

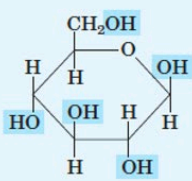
dengan ikatan kovalen antara atom donor dan H. Susunan ini menempatkan muatan positif ion hidrogen secara langsung di antara dua muatan negatif parsial. Ikatan hidrogen dengan demikian sangat terarah dan mampu menahan dua molekul atau gugus yang terikat hidrogen dalam susunan geometris tertentu. Sifat ikatan hidrogen ini memberikan struktur tiga dimensi yang sangat tepat pada molekul protein dan asam nukleat, yang memiliki banyak ikatan hidrogen intramolekul.

Air adalah pelarut polar, hal ini dengan mudah melarutkan sebagian besar biomolekul, yang umumnya bermuatan atau senyawa polar, senyawa yang mudah larut dalam air bersifat hidrofilik (Yunani, "suka air"). Sebaliknya, pelarut nonpolar seperti kloroform dan benzena adalah pelarut yang buruk untuk biomolekul polar tetapi dengan mudah melarutkan mereka yang hidrofobik molekul nonpolar seperti lipid dan lilin. Air melarutkan garam seperti NaCl dengan menghidrasi dan menstabilkan ion Na^+ dan Cl^- , melemahkan interaksi elektrostatis di antara mereka dan dengan demikian menetralkan kecenderungan mereka untuk berasosiasi dalam kisi kristal. Air juga mudah melarutkan biomolekul bermuatan, termasuk senyawa dengan gugus fungsi seperti asam karboksilat terionisasi ($-\text{COO}_2^-$), terprotonasi seperti amina ($-\text{NH}_3^+$), dan ester fosfat atau anhidrida. Air menggantikan ikatan hidrogen terlarut yang menghubungkan biomolekul satu sama lain dengan ikatan hidrogen air-terlarut, sehingga menyaring interaksi elektrostatis antara molekul terlarut. Air efektif dalam menyaring interaksi elektrostatis antara ion terlarut karena memiliki konstanta dielektrik yang tinggi, sifat fisik yang mencerminkan jumlah dipol dalam pelarut. Kekuatan, atau gaya (F), interaksi ionik dalam larutan tergantung pada besarnya muatan (Q), jarak antara gugus muatan (r), dan konstanta dielektrik (ϵ , yang tidak berdimensi) pelarut. di mana interaksi terjadi:

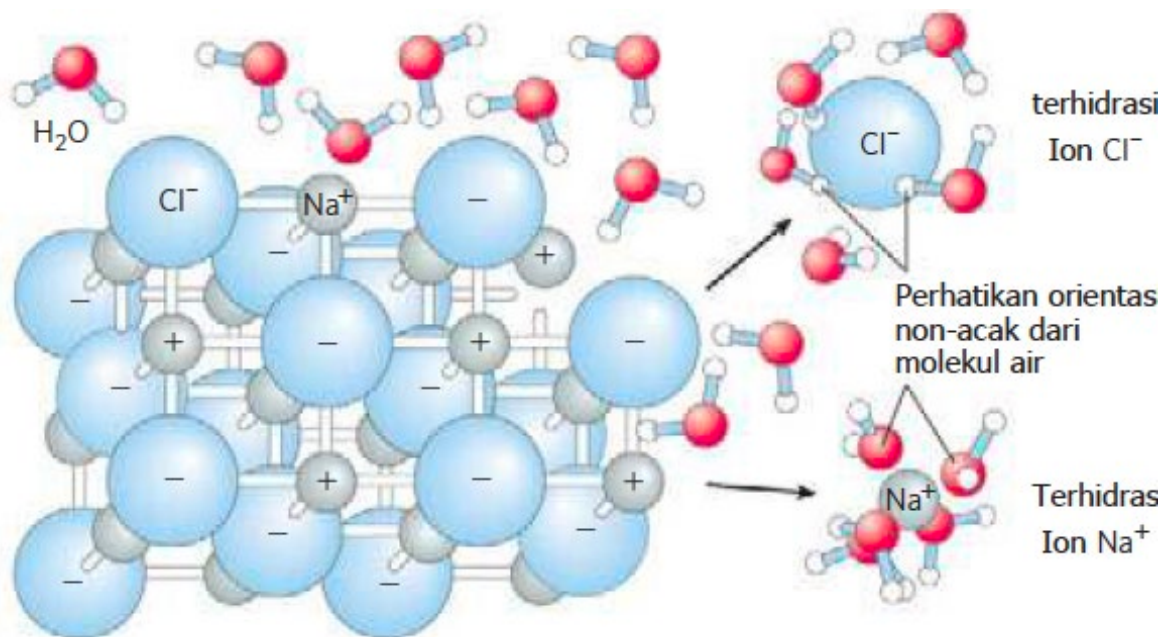
$$F = \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon r^2}$$

Untuk air pada 25°C, ϵ adalah 78,5 dan untuk pelarut benzena yang sangat nonpolar, ϵ adalah 4,6. Dengan demikian, interaksi ionik antara ion terlarut jauh lebih kuat di lingkungan yang kurang polar. Ketergantungan pada r^2 sehingga tarikan atau tolakan ionik hanya beroperasi pada jarak pendek dalam kisaran 10 hingga 40 nm bila pelarutnya adalah air.

Tabel 7 Beberapa Contoh Biomolekul Polar, Nonpolar, dan Amphipathic (Ditampilkan sebagai Bentuk Ionik pada pH 7)

Polar		Nonpolar	
Glukosa		Lilin khas	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_6-\text{CH}_2-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{CH}_2$ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}_2$
Glisin	$^+\text{NH}_3-\text{CH}_2-\text{COO}^-$	Amfipatik	Fenil alanin
Aspartat	$^+\text{NH}_3$ $-\text{OOC}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{COO}^-$		
Laktat	$\text{CH}_3-\text{CH}(\text{OH})-\text{COO}^-$	Pospatidilkolin	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{CH}_2-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{CH}_2$ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CH}_2-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{CH}$ $\text{CH}_2-\text{O}-\text{P}(=\text{O})(\text{O}^-)-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{N}^+(\text{CH}_3)_3$
Gliserol	$\text{HOCH}_2-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2\text{OH}$		

Gugus Polar
 Gugus Non Polar



Gambar 51 Air sebagai pelarut
Sumber: Nelson & Cox, 2013

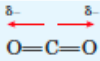
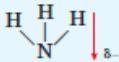
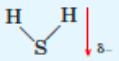
Air melarutkan banyak garam kristal dengan menghidrasi ion komponennya. Kisi kristal NaCl terganggu saat molekul air mengelompok di sekitar ion Cl^- dan Na^+ . Muatan ionik sebagian dinetralkan, dan gaya tarik elektrostatis yang diperlukan untuk pembentukan kisi melemah.

Saat garam seperti NaCl larut, ion Na^+ dan Cl^- yang meninggalkan kisi kristal memperoleh kebebasan gerak yang jauh lebih besar. Peningkatan entropi sistem yang dihasilkan sebagian besar bertanggung jawab atas kemudahan melarutkan

garam seperti NaCl dalam air. Dalam termodinamika, pembentukan larutan terjadi dengan perubahan energi bebas yang menguntungkan: $\Delta G = \Delta H - T \Delta S$, di mana ΔH memiliki nilai positif kecil dan $T \Delta S$ nilai positif besar; sehingga ΔG negatif. Molekul gas penting seperti CO_2 , O_2 , dan N_2 adalah nonpolar. Dalam molekul O_2 dan N_2 , elektron digunakan bersama oleh kedua atom. Dalam CO_2 , setiap ikatan $\text{C}=\text{O}$ bersifat polar, tetapi kedua dipol berlawanan arah dan saling meniadakan. Pergerakan molekul dari fase gas yang tidak teratur ke dalam larutan berair membatasi gerakan mereka dan gerakan molekul air dan oleh karena itu menunjukkan penurunan entropi. Sifat nonpolar dari gas-gas ini dan penurunan entropi ketika mereka memasuki larutan bergabung membuat mereka sangat sulit larut dalam air. Beberapa organisme memiliki "protein pembawa" yang larut dalam air (hemoglobin dan mioglobin, misalnya) yang memfasilitasi pengangkutan O_2 . Karbon dioksida membentuk asam karbonat (H_2CO_3) dalam larutan air dan diangkut sebagai ion HCO_3^- (bikarbonat), baik bebas bikarbonat sangat larut dalam air (~ 100 g/L pada 25°C)—atau terikat pada hemoglobin. Tiga gas lainnya, NH_3 , NO , dan H_2S , juga memiliki peran biologis dalam beberapa organisme; gas-gas ini bersifat polar, mudah larut dalam air, dan terionisasi dalam larutan berair.

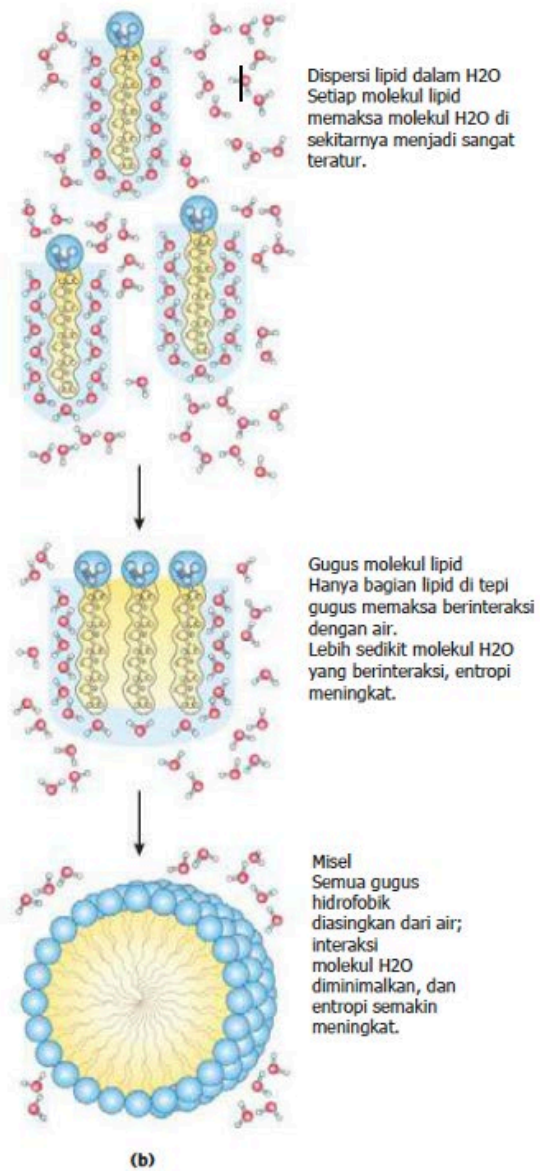
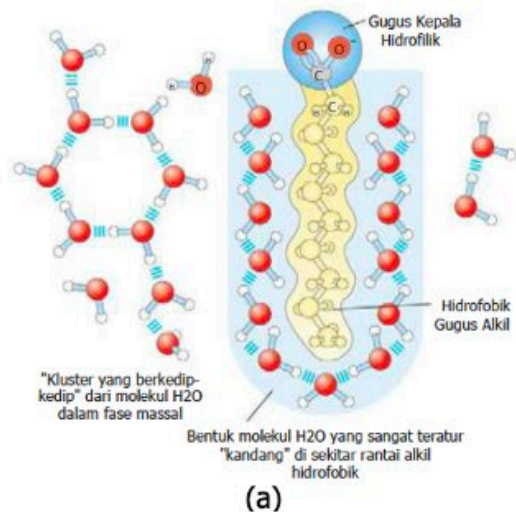
Ketika air dicampur dengan benzena atau heksana, dua fase terbentuk; tidak ada cairan yang larut dalam yang lain. Senyawa non-polar seperti benzena dan heksana bersifat hidrofobik mereka tidak dapat mengalami interaksi yang menguntungkan secara energetik dengan molekul air, dan mereka mengganggu ikatan hidrogen di antara molekul air.

Tabel 8 Kelarutan Beberapa Gas dalam Air

Gas	Struktur*	Polaritas	Kelarutan dalam air (g/L) [†]
Nitrogen	$\text{N}\equiv\text{N}$	Nonpolar	0.018 (40°C)
Oksigen	$\text{O}=\text{O}$	Nonpolar	0.035 (50°C)
Karbon Dioksida	 $\text{O}=\text{C}=\text{O}$	Nonpolar	0.97 (45°C)
Amonia		Polar	900 (10°C)
Hidrogen Sulfida		Polar	1,860 (40°C)

*Panah mewakili dipol listrik; ada muatan negatif parsial (δ^-) di kepala panah, muatan positif parsial (δ^+) tidak diperlihatkan di sini di ekor.

[†]Perhatikan bahwa molekul polar larut jauh lebih baik bahkan pada suhu rendah daripada molekul nonpolar pada suhu yang relatif tinggi (Sumber: Nelson & Cox, 2013).



Gambar 51 Senyawa amfipatik dalam larutan berair.

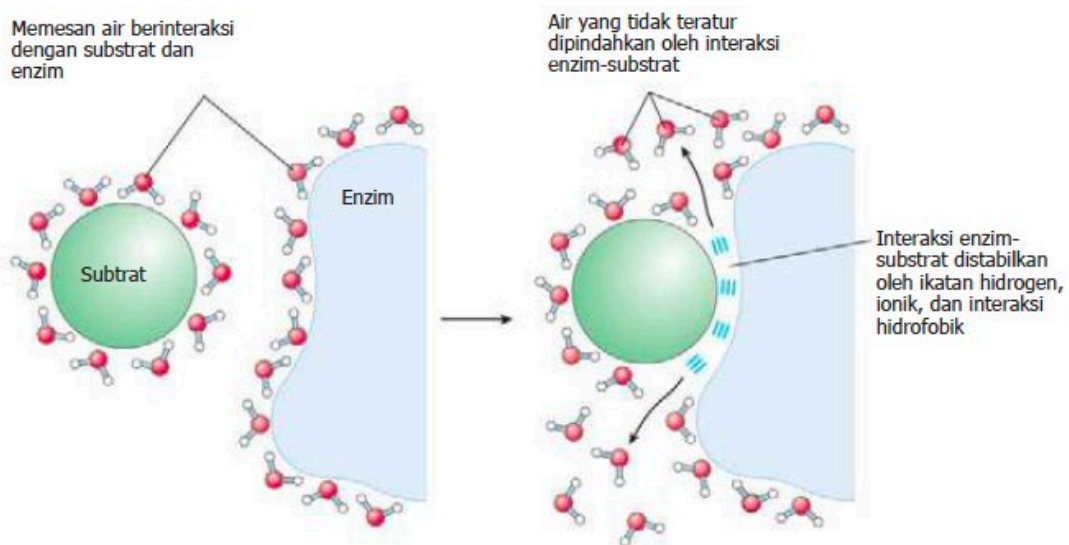
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Keterangan gambar (a) rantai Panjang asam lemak memiliki rantai alkil yang sangat hidrofobik, yang masing-masing dikelilingi oleh lapisan molekul air yang sangat teratur. (b) Dengan mengelompokkan bersama-sama dalam misel, molekul asam lemak mengekspos yang terkecil kemungkinan luas permukaan hidrofobik ke air, dan lebih sedikit molekul air dibutuhkan dalam cangkang air yang dipesan. Energi yang diperoleh membebaskan molekul air yang tidak bergerak menstabilkan misel.

Semua molekul atau ion dalam larutan air mengganggu ikatan hidrogen beberapa molekul air di sekitarnya, tetapi zat terlarut polar atau bermuatan (seperti NaCl) mengkompensasi ikatan hidrogen air-air yang hilang dengan membentuk interaksi zat terlarut-air yang baru. Perubahan bersih dalam entalpi (ΔH) untuk melarutkan zat terlarut ini umumnya kecil. Namun, zat terlarut hidrofobik tidak memberikan kompensasi seperti itu, dan karena itu penambahannya ke air dapat menghasilkan perolehan entalpi yang kecil; pemutusan ikatan hidrogen antara molekul air membutuhkan energi dari sistem, membutuhkan masukan energi dari sekitarnya. Selain membutuhkan masukan energi ini, melarutkan senyawa hidrofobik dalam air menghasilkan penurunan entropi yang terukur. Molekul air di sekitar zat terlarut nonpolar dibatasi dalam kemungkinan orientasinya karena mereka membentuk cangkang seperti sangkar yang sangat teratur di sekitar setiap molekul zat terlarut. Molekul air ini tidak terlalu berorientasi seperti pada klatrat, senyawa kristal dari zat terlarut non-polar dan air, tetapi efeknya sama dalam kedua kasus: urutan molekul air mengurangi entropi. Jumlah molekul air terurut, dan oleh karena itu besarnya penurunan entropi, sebanding dengan luas permukaan zat terlarut hidrofobik yang tertutup dalam sangkar molekul air. Perubahan energi bebas untuk melarutkan zat terlarut nonpolar dalam air dengan demikian tidak menguntungkan: $\Delta G = \Delta H - T \Delta S$, di mana ΔH memiliki nilai positif, ΔS memiliki nilai negatif, dan ΔG positif.

Senyawa amfipatik mengandung daerah yang bersifat polar (atau bermuatan) dan daerah yang nonpolar. Ketika senyawa amfipatik dicampur dengan air, daerah kutub, hidrofilik berinteraksi dengan baik dengan air dan cenderung larut, tetapi nonpolar, daerah hidrofobik cenderung menghindari kontak dengan air. Daerah nonpolar dari molekul mengelompok bersama untuk menyajikan hidrofobik terkecil

daerah ke pelarut berair, dan daerah kutub diatur untuk memaksimalkan interaksinya dengan pelarut. Struktur amfipatik yang stabil ini senyawa dalam air, yang disebut misel, mungkin mengandung: ratusan atau ribuan molekul. Gaya yang menahan daerah nonpolar dari molekul bersama-sama disebut interaksi hidrofobik. Kekuatan interaksi hidrofobik bukan karena adanya daya tarik intrinsik antara gugus nonpolar. Sebaliknya, hasil dari sistem mencapai stabilitas termodinamika terbesar dengan meminimalkan jumlah molekul air yang dibutuhkan untuk mengelilingi bagian hidrofobik dari molekul terlarut.



Gambar 52 Pelepasan air kompleks enzim-substrat.

Keterangan gambar: Saat terpisah, kekuatan enzim dan substrat molekul air tetangga ke dalam cangkang yang teratur. Pengikatan substrat ke enzim melepaskan beberapa air yang dipesan, dan peningkatan entropi yang dihasilkan memberikan dorongan termodinamika menuju pembentukan kompleks enzim-substrat.

Banyak biomolekul bersifat amfipatik; protein, pigmen, vitamin tertentu, dan sterol dan fosfolipid membran semuanya memiliki daerah permukaan polar dan nonpolar. Struktur yang terdiri dari molekul-molekul ini distabilkan oleh interaksi hidrofobik di antara daerah nonpolar. Interaksi hidrofobik antara lipid, dan antara lipid dan protein, adalah penentu paling penting dari struktur dalam membran biologis. Interaksi hidrofobik antara asam amino nonpolar juga menstabilkan struktur tiga dimensi protein. Ikatan hidrogen antara air dan zat terlarut polar juga menyebabkan keteraturan molekul air, tetapi efek energinya kurang signifikan dibandingkan dengan zat terlarut nonpolar. Gangguan molekul air yang dipesan adalah bagian dari kekuatan pendorong untuk mengikat substrat polar (reaktan) ke permukaan polar

komplementer dari suatu enzim: entropi meningkat ketika enzim menggantikan air yang dipesan dari substrat, dan ketika substrat menggantikan air yang dipesan dari permukaan enzim.

Interaksi van der Waals

Ketika dua atom tak bermuatan didekatkan, awan elektron di sekitarnya saling mempengaruhi. Variasi acak dalam posisi elektron-elektron di sekitar satu nukleus dapat menciptakan dipol listrik transien, yang menginduksi dipol listrik transien yang berlawanan di atom terdekat. Kedua dipol menarik satu sama lain dengan lemah, membawa kedua inti lebih dekat. Gaya tarik lemah ini disebut interaksi van der Waals (juga dikenal sebagai gaya London). Saat kedua inti semakin dekat, awan elektron mereka mulai saling tolak. Pada titik dimana gaya tarik netto maksimal, inti dikatakan dalam kontak van der Waals. Setiap atom memiliki radius van der Waals yang khas, ukuran seberapa dekat atom tersebut akan memungkinkan atom lain untuk mendekat. Dalam model molekuler "pengisi ruang" yang diperlihatkan dalam buku ini, atom-atom digambarkan dalam ukuran yang proporsional dengan jari-jari van der Waals.

Tabel 9 Jari-jari van der Waals dan Kovalen (Ikatan Tunggal) Jari-jari beberapa Unsur

Unsur	Jari-jari van der Waals (nm)	Jari-jari kovalen untuk ikatan tunggal (nm)
H	0.11	0.030
O	0.15	0.066
N	0.15	0.070
C	0.17	0.077
S	0.18	0.104
P	0.19	0.110
I	0.21	0.133

Catatan: jari-jari van der Waals menggambarkan dimensi atom yang mengisi ruang. Ketika dua atom bergabung secara kovalen, jari-jari atom pada titik ikatan lebih kecil daripada jari-jari van der Waals, karena atom-atom yang bergabung ditarik bersama oleh pasangan elektron bersama. Jarak antara inti dalam interaksi van der Waals atau ikatan kovalen kira-kira sama dengan jumlah masing-masing jari-jari van der Waals atau kovalen untuk dua atom. Jadi panjang ikatan tunggal karbon-karbon adalah sekitar 0,077 nm 1 0,077 nm 5 0,154 nm.

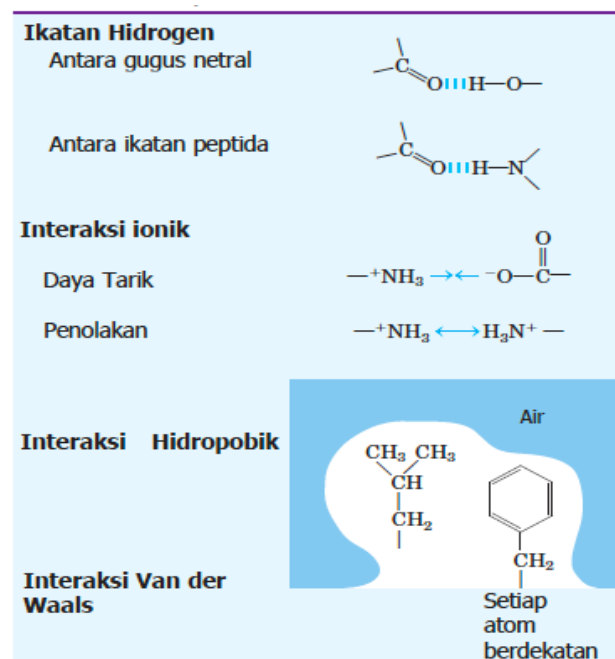
Interaksi nonkovalen yang telah digambarkan ikatan hidrogen dan interaksi ionik, hidrofobik, dan van der Waals, jauh lebih lemah daripada ikatan kovalen.

Masukan energi sekitar 350 kJ diperlukan untuk memutuskan satu mol (6×10^{23}) ikatan tunggal C—C, dan sekitar 410 kJ untuk memutuskan satu mol ikatan C—H, tetapi sedikitnya 4 kJ sudah cukup untuk memutus satu mol interaksi van der Waals yang khas. Interaksi hidrofobik jauh lebih lemah daripada ikatan kovalen, meskipun mereka secara substansial diperkuat oleh pelarut yang sangat polar (misalnya larutan garam pekat). Interaksi ionik dan ikatan hidrogen adalah variabel dalam kekuatan, tergantung pada polaritas pelarut dan keselarasan atom ikatan hidrogen, tetapi mereka selalu secara signifikan lebih lemah daripada ikatan kovalen. Dalam pelarut berair pada 25°C, energi panas yang tersedia dapat memiliki urutan yang sama besarnya dengan kekuatan interaksi lemah ini, dan interaksi antara molekul zat terlarut dan pelarut (air) hampir sama menguntungkannya dengan interaksi zat terlarut-zat terlarut. Akibatnya, ikatan hidrogen dan interaksi ionik, hidrofobik, dan van der Waals terus terbentuk dan putus.

Meskipun keempat jenis interaksi ini secara individu relatif lemah terhadap ikatan kovalen, efek kumulatif dari banyak interaksi semacam itu bisa sangat signifikan. Misalnya, pengikatan nonkovalen suatu enzim ke substratnya dapat melibatkan beberapa ikatan hidrogen dan satu atau lebih interaksi ionik, serta interaksi hidrofobik dan van der Waals. Pembentukan masing-masing ikatan lemah ini berkontribusi pada penurunan bersih energi bebas sistem. Kita dapat menghitung stabilitas interaksi nonkovalen, seperti ikatan hidrogen dari molekul kecil ke pasangan makromolekulnya, dari energi ikat, pengurangan energi sistem ketika terjadi pengikatan. Stabilitas, yang diukur dengan konstanta kesetimbangan dari reaksi pengikatan, bervariasi secara eksponensial dengan energi pengikatan. Untuk memisahkan dua biomolekul (seperti enzim dan substrat terikatnya) yang terkait secara nonkovalen melalui beberapa interaksi lemah, semua interaksi ini harus diganggu pada saat yang bersamaan. Karena interaksi berfluktuasi secara acak, gangguan simultan seperti itu sangat kecil kemungkinannya. Oleh karena itu, 5 atau 20 interaksi lemah memberikan stabilitas molekul yang jauh lebih besar daripada yang diharapkan secara intuitif dari penjumlahan sederhana energi ikat kecil.

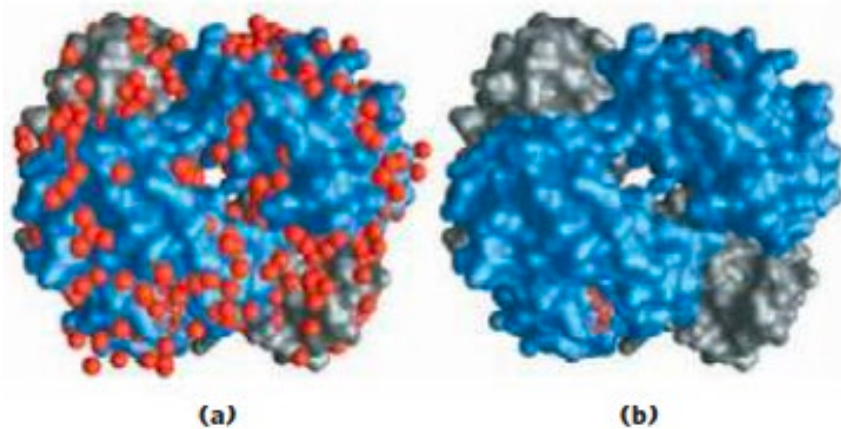
Makromolekul seperti protein, DNA, dan RNA mengandung begitu banyak tempat ikatan hidrogen potensial atau interaksi ionik, van der Waals, atau hidrofobik sehingga efek kumulatif dari banyak gaya pengikatan kecil bisa sangat besar. Untuk makromolekul, struktur yang paling stabil biasanya di mana interaksi lemah dimaksimalkan. Pelipatan rantai polipeptida atau polinukleotida tunggal menjadi bentuk tiga dimensi ditentukan oleh prinsip ini. Pengikatan antigen ke antibodi spesifik tergantung pada efek kumulatif dari banyak interaksi lemah. Seperti disebutkan sebelumnya, energi yang dilepaskan ketika enzim mengikat secara nonkovalen ke substratnya adalah sumber utama kekuatan katalitik enzim. Pengikatan hormon atau neurotransmitter ke protein reseptor selulernya adalah hasil dari beberapa interaksi lemah. Salah satu konsekuensi dari ukuran besar enzim dan reseptor (relatif terhadap substrat atau ligan mereka) adalah bahwa permukaannya yang luas memberikan banyak peluang untuk interaksi yang lemah. Pada tingkat molekuler, komplementaritas antara biomolekul yang berinteraksi mencerminkan komplementaritas dan interaksi lemah antara gugus polar, bermuatan, dan hidrofobik pada permukaan molekul.

Tabel 10 Empat Jenis Interaksi Nonkovalen ("Lemah") antar Biomolekul dalam Pelarut Berair



Sumber: Sumber: Nelson & Cox, 2013

Ketika struktur protein seperti hemoglobin ditentukan oleh kristalografi sinar-x, molekul air sering ditemukan terikat sangat erat sehingga merupakan bagian dari struktur kristal; hal yang sama berlaku untuk air dalam kristal RNA atau DNA. Molekul air terikat ini, yang juga dapat dideteksi dalam larutan berair dengan resonansi magnetik nuklir, memiliki sifat yang sangat berbeda dari air "massal" pelarut. Bagi banyak protein, molekul air yang terikat erat sangat penting untuk fungsinya. Dalam fotosintesis, misalnya, proton mengalir melintasi membran biologis saat cahaya menggerakkan aliran elektron melalui serangkaian protein pembawa elektron.

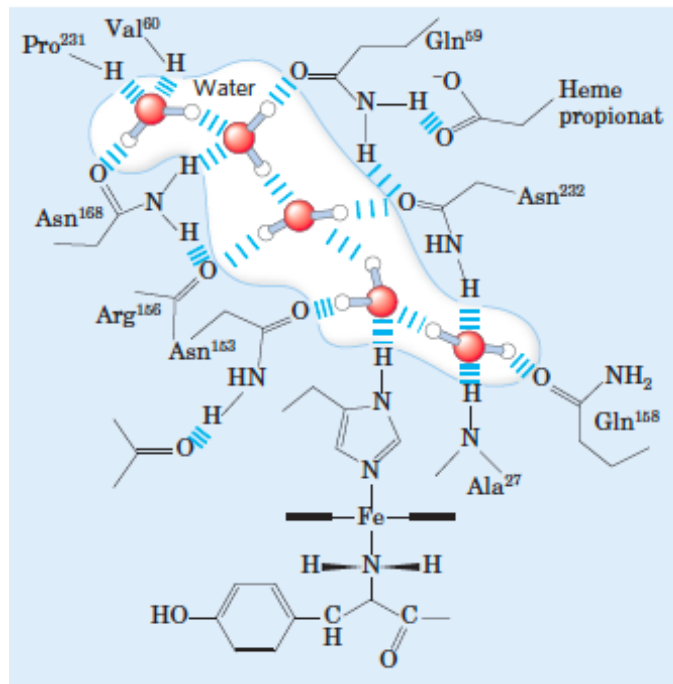


Gambar 53 Pengikatan air pada hemoglobin.
Sumber: Nelson & Cox, 2013

(PDB ID 1A3N) Struktur kristal hemoglobin, ditunjukkan (a) dengan molekul air terikat (bola merah) dan (b) tanpa molekul air. Molekul air terikat begitu kuat pada protein sehingga mempengaruhi pola difraksi sinar-x seolah-olah mereka adalah bagian tetap dari kristal. Dua subunit hemoglobin ditampilkan dalam warna abu-abu, dua subunit berwarna biru. Setiap sub-unit memiliki kelompok heme terikat (struktur tongkat merah), hanya terlihat di subunit dalam tampilan ini.

Salah satu protein ini, sitokrom f, memiliki rantai lima molekul air yang terikat yang dapat menyediakan jalur bagi proton untuk bergerak melalui membran melalui proses yang dikenal sebagai "proton hopping" (dijelaskan di bawah). Pompa proton lain yang digerakkan oleh cahaya, bacteriorhodopsin, hampir pasti menggunakan rantai molekul air terikat yang berorientasi tepat dalam pergerakan transmembran proton. Molekul air yang terikat erat juga dapat membentuk bagian penting dari situs pengikatan protein untuk ligan. Dalam protein pengikat arabinosa bakteri, misalnya,

lima molekul air membentuk ikatan hidrogen yang menyediakan ikatan silang kritis antara gula (arabinosa) dan residu asam amino di tempat pengikatan gula.

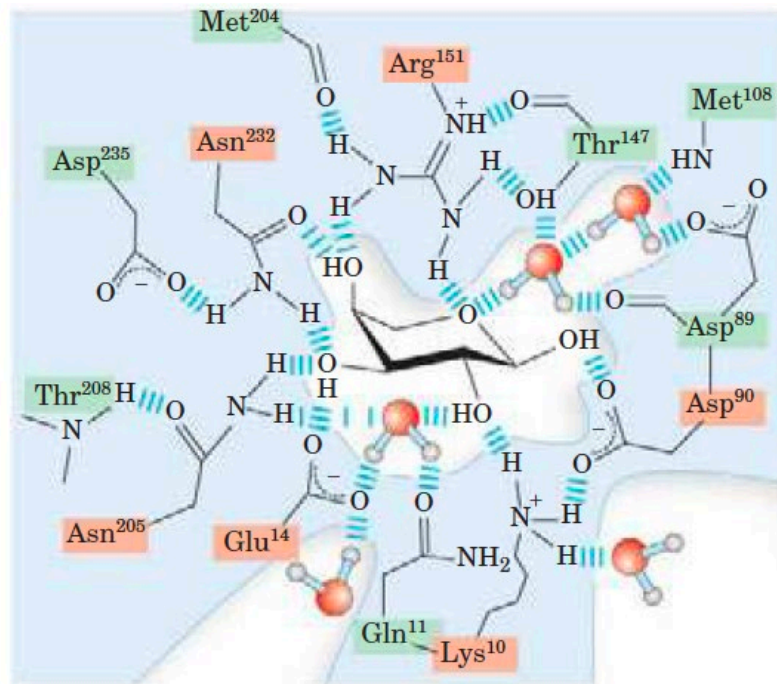


Gambar 54 Rantai air dalam sitokrom f.
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Air terikat dalam saluran proton dari protein membran sitokrom f, yang merupakan bagian dari mesin penangkap energi fotosintesis dalam kloroplas. Lima molekul air terikat hidrogen satu sama lain dan dengan gugus fungsi protein: atom tulang punggung peptida dari residu valin, prolin, arginin, dan alanin, dan rantai samping dari tiga asparagin dan dua residu glutamin. Protein memiliki heme terikat, ion besinya memfasilitasi aliran elektron selama fotosintesis. Aliran elektron digabungkan dengan pergerakan proton melintasi membran, yang mungkin melibatkan "loncatan proton" melalui rantai molekul air yang terikat ini.

Semua jenis zat terlarut mengubah sifat fisik tertentu pelarut, air: tekanan uapnya, titik didih, titik leleh (titik beku), dan tekanan osmotik. Ini disebut sifat koligatif (arti koligatif "terikat bersama"), karena efek zat terlarut pada keempat sifat memiliki dasar yang sama: konsentrasi air lebih rendah dalam larutan daripada dalam air murni. Pengaruh konsentrasi zat terlarut pada sifat koligatif air tidak tergantung

pada sifat kimia zat terlarut; itu hanya bergantung pada jumlah partikel zat terlarut (molekul atau ion) dalam jumlah air tertentu. Misalnya, senyawa seperti NaCl, yang terdisosiasi dalam larutan, memiliki efek pada tekanan osmotik yang dua kali lipat dari jumlah mol zat terlarut yang sama seperti glukosa.

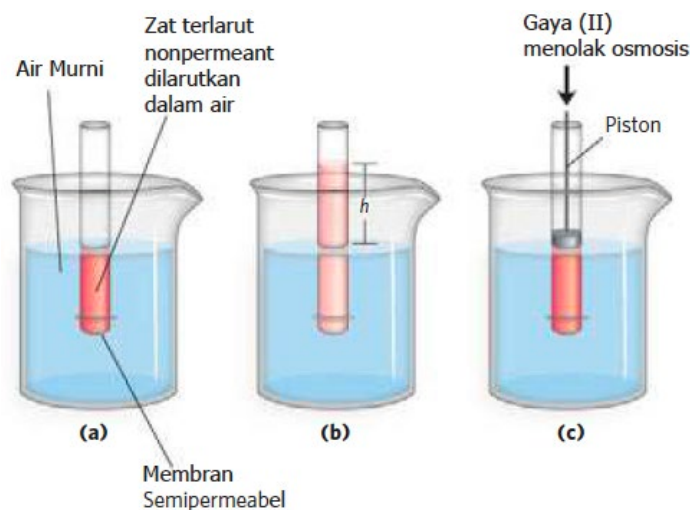


Gambar 55 Air yang terikat hidrogen sebagai bagian dari pengikatan gula protein (Sumber: Nelson & Cox, 2013).

Dalam protein pengikat L-arabinosa dari bakteri *E. coli*, lima molekul air merupakan komponen penting dari jaringan ikatan hidrogen interaksi antara gula arabinosa (pusat) dan setidaknya 13 residu asam amino di tempat pengikatan gula. Dilihat dalam tiga dimensi, gugus yang berinteraksi ini membentuk dua lapisan bagian yang mengikat; residu asam amino pada lapisan pertama dengan warna merah, yaitu: di lapisan kedua berwarna hijau.

Molekul air cenderung bergerak dari daerah konsentrasi air yang lebih tinggi ke salah satu konsentrasi air yang lebih rendah, sesuai dengan kecenderungan di alam agar suatu sistem menjadi tidak teratur. Ketika dua larutan berair berbeda dipisahkan oleh semipermeable membran (yang memungkinkan lewatnya air tetapi tidak molekul terlarut), molekul air berdifusi dari daerah konsentrasi air yang lebih tinggi ke daerah konsentrasi air yang lebih rendah menghasilkan tekanan osmotik. Tekanan osmotik diukur sebagai gaya yang diperlukan untuk menahan pergerakan air, didekati dengan persamaan van't Hoff: $\pi = icRT$.

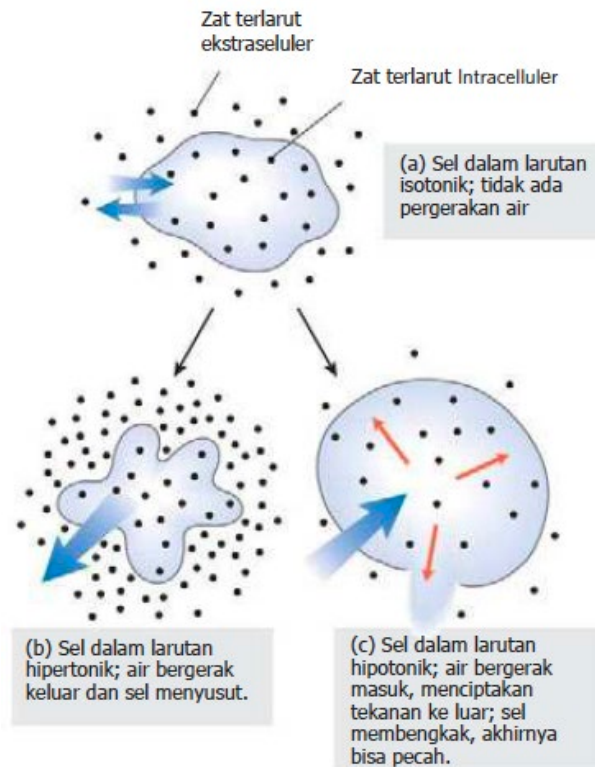
Dimana R adalah konstanta gas dan T adalah suhu mutlak, simbol i adalah faktor van't Hoff, yang merupakan ukuran sejauh mana zat terlarut terdisosiasi menjadi dua atau lebih spesies ionik. Istilah ic adalah osmolaritas larutan, produk dari faktor van't Hoff i dan konsentrasi molar zat terlarut c . Dalam larutan NaCl encer, zat terlarut terdisosiasi sempurna menjadi Na^+ dan Cl^- , menggandakan jumlah partikel zat terlarut, dan dengan demikian $i = 2$. Untuk semua zat terlarut nonpengion, $i = 1$. Untuk larutan beberapa (n) zat terlarut, adalah jumlah kontribusi masing-masing spesies: $\pi = RT(i_1c_1 + i_2c_2 + \dots + i_n c_n)$.



Gambar 56 Osmosis dan pengukuran tekanan osmotik.

(a) Keadaan awal. Tabung berisi larutan berair, gelas berisi air murni, dan membran semipermeabel memungkinkan lewatnya air tetapi tidak zat terlarut. Air mengalir dari gelas kimia ke dalam tabung untuk menyamakan konsentrasinya melintasi membran. (b) Keadaan akhir. Air telah pindah ke dalam larutan senyawa nonpermeant, mengencerkannya dan menaikkan kolom larutan di dalam tabung. Pada kesetimbangan, gaya gravitasi yang bekerja pada larutan di dalam tabung persis menyeimbangkan kecenderungan air untuk bergerak ke dalam tabung, di mana konsentrasinya lebih rendah. (c) Tekanan osmotik (π) diukur sebagai gaya yang harus diterapkan untuk mengembalikan larutan dalam tabung ke ketinggian air dalam gelas kimia. Gaya ini sebanding dengan tinggi, h , kolom di (b).

Osmosis, pergerakan air melintasi membran semipermeabel yang didorong oleh perbedaan tekanan osmotik, merupakan faktor penting dalam kehidupan sebagian besar sel. Membran plasma lebih permeabel terhadap air daripada sebagian besar molekul kecil, ion, dan makromolekul lainnya karena saluran protein dalam membran secara selektif memungkinkan lewatnya air.



Gambar 57 Pengaruh osmolaritas ekstraseluler pada pergerakan air melintasi membran plasma (Sumber: Nelson & Cox, 2013).

Ketika sel dalam keseimbangan osmotik dengan media sekitarnya-yaitu, sel dalam (a) media isotonik-dipindahkan ke (b) larutan hipertonik atau (c) larutan hipotonik, air bergerak melintasi membran plasma dalam arah yang cenderung menyamakan osmolaritas di luar dan di dalam sel.

Larutan osmolaritas yang sama dengan sitosol sel dikatakan isotonik relatif terhadap sel itu. Dikelilingi oleh larutan isotonik, sel tidak memperoleh atau kehilangan air. Dalam larutan hipertonik, larutan dengan osmolaritas lebih tinggi daripada sitosol, sel menyusut saat air bergerak keluar. Dalam larutan hipotonik, larutan dengan osmolaritas lebih rendah daripada sitosol, sel membengkak saat air masuk. Di lingkungan alaminya, sel umumnya mengandung konsentrasi biomolekul dan ion yang lebih tinggi daripada di sekitarnya, sehingga tekanan osmotik cenderung mendorong air ke dalam sel. Jika tidak diimbangi, pergerakan air ke dalam ini akan menggembungkan membran plasma dan akhirnya menyebabkan pecahnya sel (lisis osmotik). Beberapa mekanisme telah berkembang untuk mencegah bencana ini. Pada bakteri dan tumbuhan, membran plasma dikelilingi oleh dinding sel yang tidak

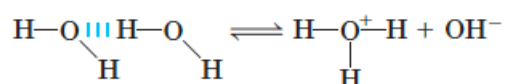
dapat dikembangkan dengan kekakuan dan kekuatan yang cukup untuk menahan tekanan osmotik dan mencegah lisis osmotik.

Meskipun banyak sifat pelarut air dapat dijelaskan dalam bentuk molekul H_2O yang tidak bermuatan, derajat kecil ionisasi air menjadi ion hidrogen (H^+) dan ion hidroksida (OH^-) juga harus diperhitungkan. Seperti semua reaksi reversibel, ionisasi air dapat dijelaskan dengan konstanta kesetimbangan. Ketika asam lemah dilarutkan dalam air, mereka menyumbangkan H^+ dengan mengionisasi; basa lemah mengkonsumsi H^+ dengan menjadi terprotonasi. Proses ini juga diatur oleh konstanta kesetimbangan. Konsentrasi ion hidrogen total dari semua sumber dapat diukur secara eksperimen dan dinyatakan sebagai pH larutan. Untuk memprediksi keadaan ionisasi zat terlarut dalam air, kita harus memperhitungkan konstanta kesetimbangan yang relevan untuk setiap reaksi ionisasi.

Molekul air memiliki sedikit kecenderungan untuk mengalami ionisasi reversibel untuk menghasilkan ion hidrogen (proton) dan ion hidroksida, memberikan keseimbangan:

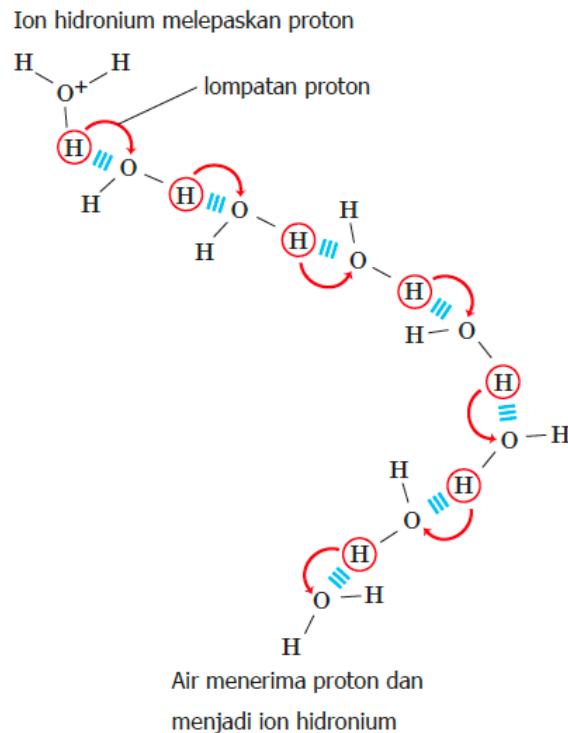


Ikatan hidrogen antara molekul air membuat hidrasi terdisosiasi proton hampir seketika:



Ionisasi air dapat diukur dengan konduktivitas listriknya; air murni membawa arus listrik sebagai H_3O^+ bermigrasi menuju katoda dan OH^- menuju anoda. Pergerakan ion hidronium dan hidroksida dalam medan listrik sangat cepat dibandingkan dengan ion lain seperti Na^+ , K^+ , dan Cl^- . Mobilitas ionik yang tinggi ini dihasilkan dari jenis "loncatan proton". Tidak ada satu proton pun yang bergerak sangat jauh melalui larutan, tetapi serangkaian lompatan proton antara molekul air yang terikat hidrogen menyebabkan pergerakan bersih proton dalam jarak yang jauh dalam waktu yang sangat singkat. (OH^- juga bergerak cepat dengan lompatan proton, tetapi dalam arah yang berlawanan.) Sebagai akibat dari mobilitas ionik yang tinggi dari H^+ , reaksi asam-basa dalam larutan air berlangsung sangat cepat. Seperti disebutkan di atas,

lompatan proton kemungkinan besar juga berperan dalam reaksi transfer proton biologis.



Gambar 58 Lompatan proton.

“Lompatan” proton yang pendek antara serangkaian molekul air yang terikat hidrogen menghasilkan pergerakan bersih proton yang sangat cepat dalam jarak yang jauh. Saat ion hidronium (kiri atas) melepaskan proton, molekul air yang agak jauh (bawah) memperoleh satu, menjadi ion hidronium. Lompatan proton jauh lebih cepat daripada difusi sejati dan menjelaskan mobilitas ionik ion H^+ yang sangat tinggi dibandingkan dengan kation monovalen lainnya seperti Na^+ dan K^+ .

Karena ionisasi reversibel sangat penting untuk peran air dalam fungsi seluler, kita harus memiliki cara untuk menyatakan tingkat ionisasi air dalam istilah kuantitatif. Tinjauan singkat tentang beberapa sifat reaksi kimia reversibel menunjukkan bagaimana hal ini dapat dilakukan. Posisi kesetimbangan dari setiap reaksi kimia diberikan oleh konstanta kesetimbangannya, K_{eq} (kadang-kadang dinyatakan hanya sebagai K). Untuk reaksi umum:

Ko $A + B \rightleftharpoons C + D$ in K_{eq} dapat didefinisikan dalam hal konsentrasi reaktan (A dan B) dan produk (C dan D) pada kesetimbangan:

$$K_{eq} = \frac{[C]_{eq}[D]_{eq}}{[A]_{eq}[B]_{eq}}$$

Sebenarnya, istilah konsentrasi harus merupakan aktivitas, atau konsentrasi efektif dalam larutan yang tidak ideal, dari masing-masing spesies. Kecuali dalam pekerjaan yang sangat akurat, bagaimanapun, konstanta kesetimbangan dapat didekati dengan mengukur konsentrasi pada kesetimbangan. Konstanta kesetimbangan adalah tetap dan karakteristik untuk setiap reaksi kimia tertentu pada suhu tertentu. Ini mendefinisikan komposisi campuran kesetimbangan akhir, terlepas dari jumlah awal reaktan dan produk. Sebaliknya, kita dapat menghitung konstanta kesetimbangan untuk reaksi tertentu pada suhu tertentu jika konsentrasi kesetimbangan semua reaktan dan produknya diketahui.

Derajat ionisasi air pada kesetimbangan 25°C hanya sekitar dua dari setiap 10^9 molekul dalam air murni yang terionisasi setiap saat. Konstanta kesetimbangan untuk ionisasi reversibel air adalah:

$$K_{eq} = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]}$$

Dalam air murni pada 25°C, konsentrasi air adalah 55,5 M-gram H_2O dalam 1 L dibagi dengan berat gram molekulnya: $(1.000 \text{ g/L})/(18.015 \text{ g/mol})$ dan pada dasarnya konstan dalam kaitannya dengan konsentrasi H^+ dan OH^- yang sangat rendah, yaitu 1×10^{-7} M. Dengan demikian, kita dapat mengganti 55,5 M dalam persamaan konstanta kesetimbangan menghasilkan:

$$K_{eq} = \frac{[H^+][OH^-]}{[55.5 \text{ M}]}$$

Penataan ulang, ini menjadi:

$$(55.5 \text{ M})(K_{eq}) = [H^+][OH^-] = K_w$$

di mana K_w menunjukkan produk $(55,5 \text{ M})(K_{eq})$, produk ion air pada 25°C. Nilai K_{eq} , ditentukan dengan pengukuran konduktivitas listrik air murni, $1,8 \times 10^{-16}$ M pada 25°C. Mengganti nilai ini untuk K_{eq} di atas memberikan nilai produk ion air:

$$\begin{aligned} K_w &= [H^+][OH^-] = (55.5 \text{ M})(1.8 \times 10^{-16} \text{ M}) \\ &= 1.0 \times 10^{-14} \text{ M}^2 \end{aligned}$$

Jadi produk $[H^+][OH^-]$ dalam larutan berair pada 25°C selalu sama dengan $1 \times 10^{-14} M^2$. Kapan tepatnya ada? konsentrasi yang sama dari H^+ dan OH^- , seperti dalam air murni, larutan dikatakan berada pada pH netral. Pada pH ini, konsentrasi H^+ dan OH^- dapat dihitung dari produk ion air sebagai berikut:

$$K_w = [H^+][OH^-] = [H^+]^2 = [OH^-]^2$$

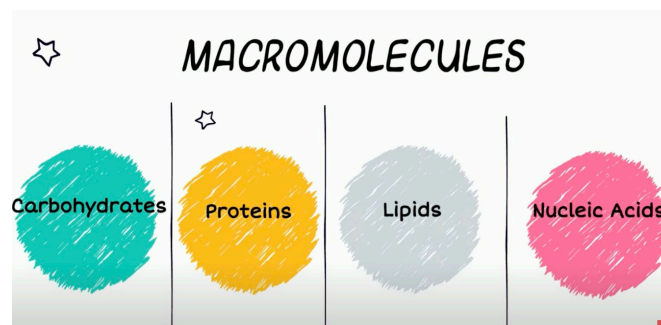
Penyelesaian untuk $[H^+]$ memberikan:

$$[H^+] = \sqrt{K_w} = \sqrt{1 \times 10^{-14} M^2}$$

$$[H^+] = [OH^-] = 10^{-7} M$$

Karena produk ion air adalah konstan, setiap kali $[H^+]$ lebih besar dari $1 \times 10^{-7} M$, $[OH^-]$ harus lebih kecil dari $1 \times 10^{-7} M$, dan sebaliknya. Ketika $[H^+]$ sangat tinggi, seperti dalam larutan asam klorida, $[OH^-]$ harus sangat rendah. Dari hasil kali ion air kita dapat menghitung $[H^+]$ jika kita mengetahui $[OH^-]$, dan sebaliknya.

Materi biomolekul pada makhluk hidup dapat di lihat pada video berikut ini.



Gambar 59 Biomolekul

Sumber: <https://youtu.be/pJqfmuuxNXs>

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke dua biokimia 1 pada pokok bahasan biomolekul yang telah disajikan, kemudian amatilah bahan pangan yang saudara gunakan sehari-hari. Bahan pangan apa saja yang digunakan di masyarakat di sekitar saudara? Mengapa bahan pangan tersebut di butuhkan?

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, setelah mengamati bahan pangan disekeliling saudara, bahaslah bersama kelompok saudara bagaimana kandungan biomolekul pada bahan pangan tersebut? Mengapa biomolekul tersebut diperlukan oleh makhluk hidup. Bahaslah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan.

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang biomolekul penyusun makhluk hidup. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang mengapa biomolekul diperlukan dalam makhluk hidup? Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

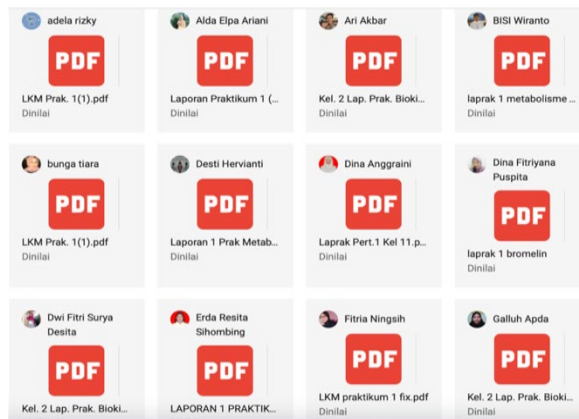
4. APLIKASI

Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang biomolekul. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di apload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal-hal berikut ini.

- a. Bagaimana kandungan biomolekul pada bahan pangan yang saudara jadikan sampel proyek?
- b. Bahaslah ciri-ciri biomolekul pada bahan pangan yang saudara jadikan sampel?
- c. Bahaslah fungsi dan struktur biomolekul penyusun makhluk hidup?

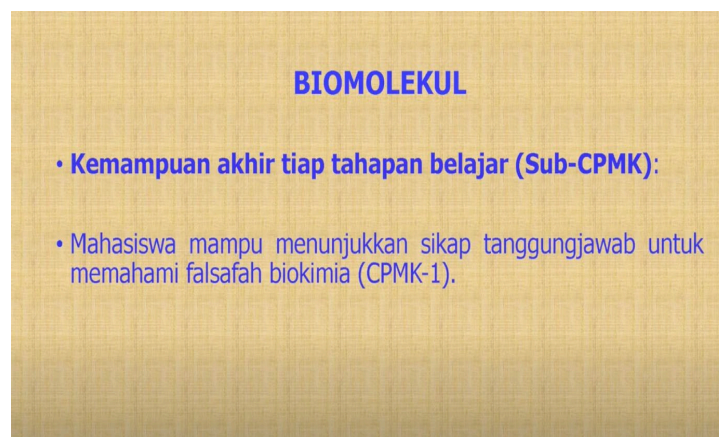
4. REFLEKSI

Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 2 Biomolekul". Selanjutnya laporan tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id> Laporan 2 Biomolekul minimal memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka. Contoh submit laporan 2 Biomolekul.



Gambar 60 Submit Laporan 2 Biomolekul

Materi perkuliahan pokok bahasan biomolekul dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.

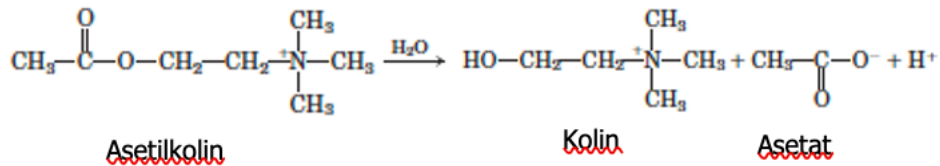


Gambar 61 Paparan materi Biomolekul

Latihan Soal

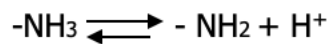
Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di submit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

1. Biomolekul adalah molekul-molekul berbeda penyusun makhluk hidup yang saling berinteraksi sebagai logika molekuler keadaan hidup. Tuliskan dan Jelaskan fungsinya masing-masing Komposisi Biomolekul utama pada makhluk.
2. Enantiomer adalah bayangan cermin satu sama lain, salah satu enansiomer tersebut mengandung C yang terikat pada 4 gugus berbeda dan disebut molekul kiral. Tuliskan dan Jelaskan bahwa asamamino dan monosakarida molekulnya bersifat kiral.
3. Biomolekul seperti protein, DNA, dan RNA mengandung begitu banyak tempat ikatan hidrogen potensial atau interaksi ionik, van der Waals, atau hidrofobik sehingga efek kumulatif dari banyak gaya pengikatan kecil bisa sangat besar. Tuliskan dan Jelaskan ikatan hydrogen yang terjadi antara peptida dengan molekul air.
4. Didalam laboratorium rumah sakit, suatu contoh 10,0 ml asam lambung, yang diperoleh beberapa jam setelah makan, dititrasi dengan 0,1 N NaOH sampai netral; 7,2 mL NaOH dibutuhkan untuk reaksi tersebut. Karena perut tidak mengandung makanan atau minuman cernaan, dapat dianggap, dalam keadaan tersebut tidak terdapat buffer. Berapa pH asam lambung?
5. Pengukuran tingkat asetilkolin oleh perubahan pH, Konsentrasi molekul neurotransmitter asetilkolin dapat ditentukan dengan mengukur perubahan pH yang terjadi pada reaksi hidrolisa. Inkubasi dengan enzim asetilkolinestrase dalam jumlah yang tepat menyebabkan penguraian asetilkolin secara kuantitatif menjadi kolin dan asam asetat yang selanjutnya berdisosiasi menjadi asetat dan ion hidrogen:



Di dalam analisa seperti itu, pH dari 15 mL suatu larutan yang mengandung sejumlah (tidak diketahui) asetilkolin ditemukan 7,65. Inkubasi dengan asetilkolinestrase menurunkan pH akhir menjadi 6,87. Anggaplah tidak terdapat uffer di dalam campuran pereaksi, tentukan jumlah mol asetilkolin dalam 15 mL larutan contoh.

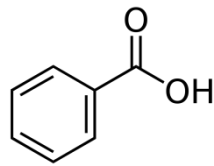
5. Pentingnya pK' suatu Asam Penjelasan umum pK' suatu asam adalah bahwa nilai ini menunjukkan pH pada saat asam tersebut berionisasi sebagian, yakni pH pada saat asam berada sebagai campuran 50 : 50 dengan basa konjugatnya. Perhatikanlah bahwa hubungan ini benar, mulailah dari persamaan konstanta ekuilibrium.
6. Sifat-sifat Buffer Asam Amino glisin seringkali dipergunakan sebagai bahan utama buffer di dalam percobaan-percobaan biokimia. Gugus amino glisin dengan pK' 9,3 dapat berada dalam bentuk proton (-NH₃), atau sebagai basa bebas (-NH₂) karena reaksi ekuilibrium dapat balik :



Pada daerah pH berapa glisin dapat dipergunakan sebagai buffer yang efektif sehubungan dengan kerja gugus aminonya?

- a) Dalam larutan 0,1 M glisin pada pH 9,0, berapa fraksi dari glisin yang mempunyai gugus amino dalam bentuk -NH₃⁺ ?
 - b) Berapa volume larutan KOH 5 M yang harus ditambah kepada 1,0 L larutan 0,1 M glisin pada pH 9,0 untuk mengubah pH kembali menjadi tepat 10,0?
 - c) Untuk memperoleh 99 persen glisin dalam bentuk protonna, bagaimanakah seharusnya hubungan numerik di antara pH larutan dan pK' gugus amino glisin?
7. Pengaruh pH terhadap Kelarutan Sifat ikatan hidrogen air yang amat polar membuatnya sebagai pelarut istimewa untuk melarutkan senyawa ion bermuatan. Sebaliknya, molekul organik tidak mengion dan tidak polar seperti

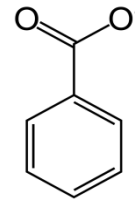
benzen, relatif tidak larut di dalam air. Pada pokoknya, kelarutan semua asam atau basa organik di dalam air dapat ditingkatkan dengan deprotonasi atau protonasi, berturut-turut untuk membentuk senyawa bermuatan. Sebagai contoh, kelarutan asam benzoat di dalam air cukup rendah. Penambahan sodium bikarbonat meningkatkan pH larutan dan menyebabkan deprotonasi asam benzoat menjadi ion benzoat, yang bersifat tidak larut di dalam air.



Asam Benzoat

$pK' \sim 5$

tidak larut di dalam air



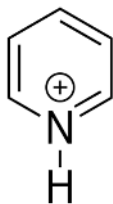
Ion benzoat

(bermuatan)

Larut di dalam air

Apakah molekul pada (a) sampai (c) larut di dalam air dengan penambahan 0,1 M NaOH atau 0,1 M HCl?

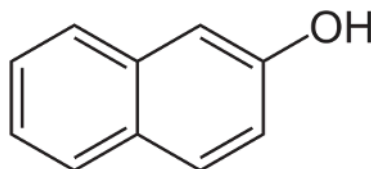
(a)



Ion piridin

$pK' \sim 5$

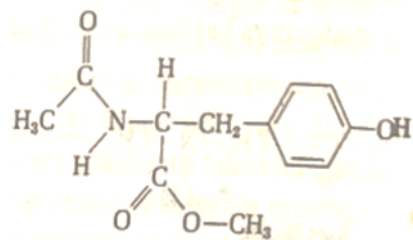
(b)



β-Naftol

$pK' \sim 10$

(c)



Ester metil-*N*-Asetiltirosin

$pK' \sim 10$

DAFTAR PUSTAKA

1. Al-Mossawi, A.H., Al-Garawi, Z.S. 2018. *Qualitative tests of amino acids and proteins and enzyme kinetics*. Baghdad: Mustansiriyah University.
2. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
3. Ramus, V. 2020. *Qualitative Tests for Proteins*. <https://www.youtube.com/watch?v=6YPWipP-Qe8&feature=youtu.be> (diakses pada tanggal 15 Oktober 2020).
4. Subroto, E., dkk. 2020. The Analysis Techniques Of Amino Acid And Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
5. RicochetScience. 2016. <https://youtu.be/z5Vm56Pu4hU>. Diakses pada tanggal 24 Januari 2022.
6. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
7. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
8. Thenawidjaja, M. 1990. *Dasar-dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
9. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
10. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
11. Won Chan Kim. *Principles of Biochemistry*. <https://www.kaznaru.edu.kz> . diakses pada tanggal 25 september 2020.

BAB 3 ASAM AMINO

1. ORIENTASI

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya (CPMK2), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan asam amino dalam kehidupan sehari-hari (Sub-CPMK2). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

Asam amino adalah unit pembangun protein makhluk hidup. Unit pembangun protein makhluk hidup berjumlah 20 jenis asam amino melalui ikatan peptida. Asam amino pertama kali ditemukan adalah asparagin, dan yang terakhir adalah treonin. Asam amino merupakan bagian struktur protein dan menentukan banyak sifat yang penting. Hal yang paling istimewa adalah bagaimana sel dapat merangkai ke 20 asam amino tersebut dalam berbagai kombinasi dan urutan menghasilkan peptide dan protein yang mempunyai aktivitas berbeda. Dari unit pembangun ini organisme yang berbeda-beda dapat membuat produk yang bervariasi seperti enzim, hormon, bulu burung, jarring laba-laba dan lain-lain.

A. SIFAT KIMIA ASAM AMINO

Adapun ke 20 jenis asam amino yang membentuk protein dapat di tulis atau dilambangkan dengan 3 huruf atau 1 hurup. Berikut ini Lambang asam amino dengan sifat-sifatnya dapat di lihat sebagai berikut.

Tabel 11 Sifat-sifat Asam Amino

Asam Amino	Singkatan/ Simbol	M _r *	Nilai pK _a				Indeks hidropati [†]	Keberadaan dalam Protein (%) [‡]
			pK ₁ (-COOH)	pK ₂ (-NH ₃ ⁺)	pK _R (Gugus R)	PI		
Nonpolar, Gugus R Alifatik								
Glisin	Gly (G)	75	2.34	9.60		5.97	-0.4	7.2
Alanin	Ala (A)	89	2.34	9.69		6.01	1.8	7.8
Prolin	Pro (P)	115	1.99	10.96		6.48	-1.6	5.2
Valin	Val (V)	117	2.32	9.62		5.97	4.2	6.6
Leusin	Leu (L)	131	2.36	9.60		5.98	3.8	9.1
Isoleusin	Ile (I)	131	2.36	9.68		6.02	4.5	5.3
Metionin	Met (M)	149	2.28	9.21		5.74	1.9	2.3
Gugus R Aromatik								
Fenilalanin	Phe (F)	165	1.83	9.13		5.48	2.8	3.9
Tirosin	Try (Y)	181	2.20	9.11	10.07	5.66	-1.3	3.2
Triptofan	Trp (W)	204	2.38	9.39		5.89	-0.9	1.4
Polar, Gugus R tidak bermuatan								
Serin	Ser (S)	105	2.21	9.15		5.68	-0.8	6.8
Treonin	Thr (T)	119	2.11	9.62		5.87	-0.7	5.9
Sistein	Cys (C)	121	1.96	10.28	8.18	5.07	2.5	1.9
Asparagin	Asn (N)	132	2.02	8.80		5.41	-3.5	4.3
Glutamin	Gln (Q)	146	2.17	9.13		5.65	-3.5	4.2
Gugus R bermuatan positif								
Lisin	Lys (K)	146	2.18	8.95	10.53	9.74	-3.9	5.9
Histidin	His (H)	155	1.82	9.17	6.00	7.59	-3.2	2.3
Arginin	Arg (R)	174	2.17	9.04	12.48	10.76	-4.5	5.1
Gugus R bermuatan negative								
Aspartat	Asp (D)	133	1.88	9.60	3.65	2.77	-3.5	5.3
Glutamat	Glu (E)	147	2.19	9.67	4.25	3.22	-3.5	6.3

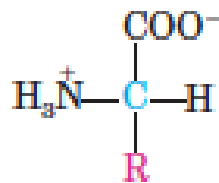
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Catatan: *Nilai Mr mencerminkan struktur seperti yang ditunjukkan pada tabel 5. Unsur-unsur air (Mr 18) dihilangkan ketika asam amino dimasukkan ke dalam polipeptida. Indeks hidropati adalah skala yang menggabungkan hidrofobisitas dan hidrofilitas gugus R. Nilai tersebut mencerminkan energi bebas (ΔG) transfer rantai samping asam amino dari pelarut hidrofobik ke air. Transfer ini menguntungkan ($\Delta G < 0$; nilai negatif dalam indeks) untuk rantai samping asam amino bermuatan atau polar, dan tidak menguntungkan ($\Delta G > 0$; nilai positif dalam indeks) untuk asam amino dengan rantai samping nonpolar atau lebih hidrofobik.

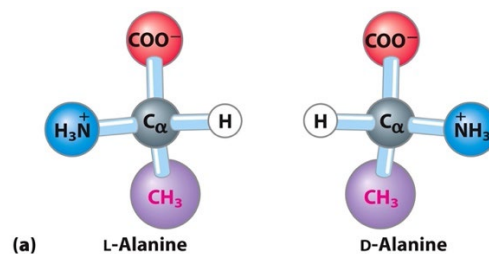
Jika protein di hidrolisis dengan basa kuat, asam amino unit pembangunnya dapat dibebaskan dari ikatan kovalen yang menghubungkan molekul ini dari rantai polipeptidanya. Asam amino yang terbentuk merupakan molekul yang relatif kecil dan struktur masing-masing sudah diketahui.

Ciri-ciri asam amino:

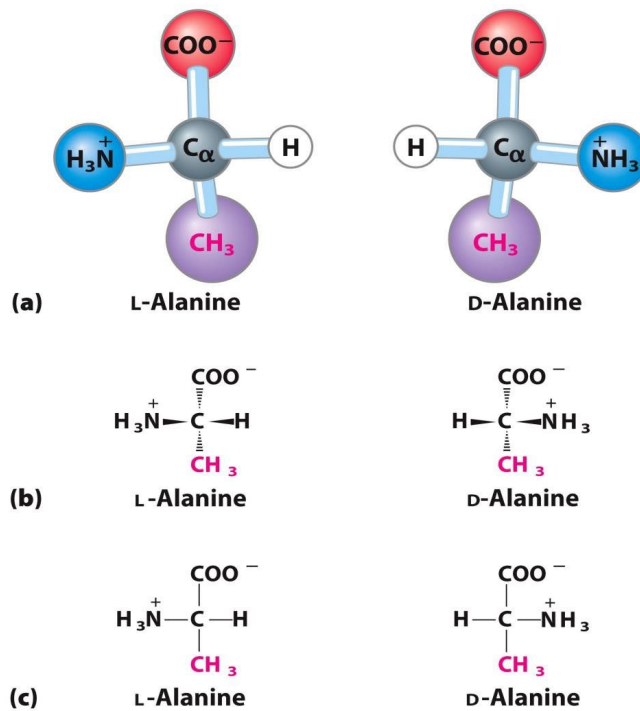
1. Semua asam amino mempunyai gugus karboksil dan gugus amino pada atom "C α " yang sama.
R merupakan gugus alkil.



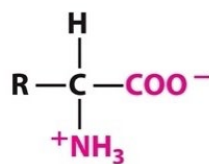
2. Semua asam amino kecuali glikin memiliki atom C asimetris, oleh karenanya semua asam amino kecuali glikin mempunyai pusat kiral. Senyawa dengan pusat kiral terdapat dalam bentuk isomer yang berbeda, yang bersifat identik dalam semua sifat kimia dan fisiknya, kecuali satu yakni arah perputaran sinar terpolarisasi di dalam polarimeter.



3. Semua asam amino pembentuk protein mempunyai konfigurasi absolut "L". Konfigurasi ini dibandingkan dengan senyawa pembanding L Gliseraldehida.



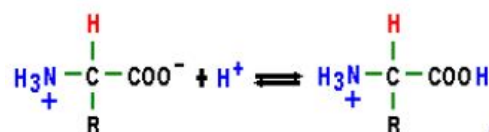
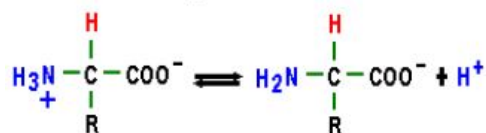
4. Asam amino dapat membentuk ion dipolar atau Zwitter Ion. Pada saat membentuk zwitter ion muatannya sama dengan nol.



Bentuk Ion Dipolar

5. Semua asam amino dapat bersifat asam dan dapat bersifat basa atau bersifat ampoter.

Asam Amino sebagai asam



Asam Amino sebagai basa

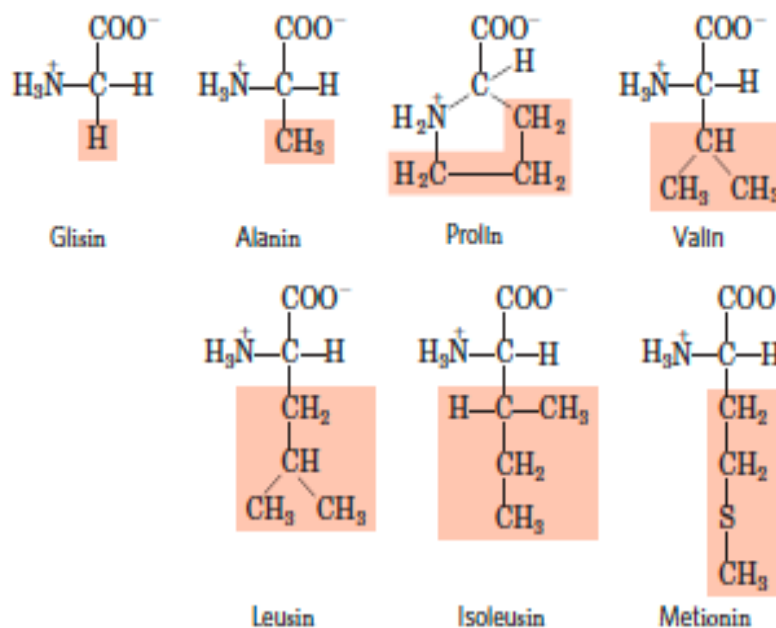
B. KLASIFIKASI ASAM AMINO

Berdasarkan kepolaran gugus alkilnya (-R)nya asam amino dapat digolongkan menjadi 5 golongan yaitu:

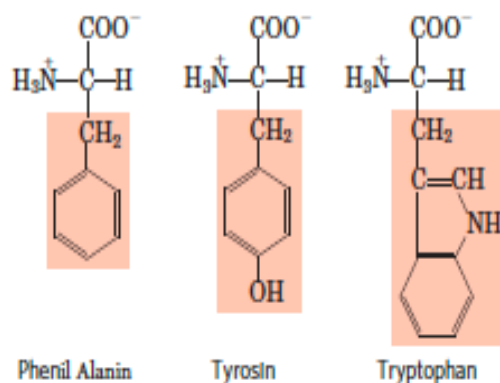
1. Asam amino Nonpolar, aliphatic (7)
2. Asam amino Aromatic (3)
3. Asam amino Polar, tidak bermuatan (5)
4. Asam Amino bermuatan Positif (3)
5. Asam Amino Bermuatan Negatif (2)

1. Asam amino Nonpolar, aliphatic (7)

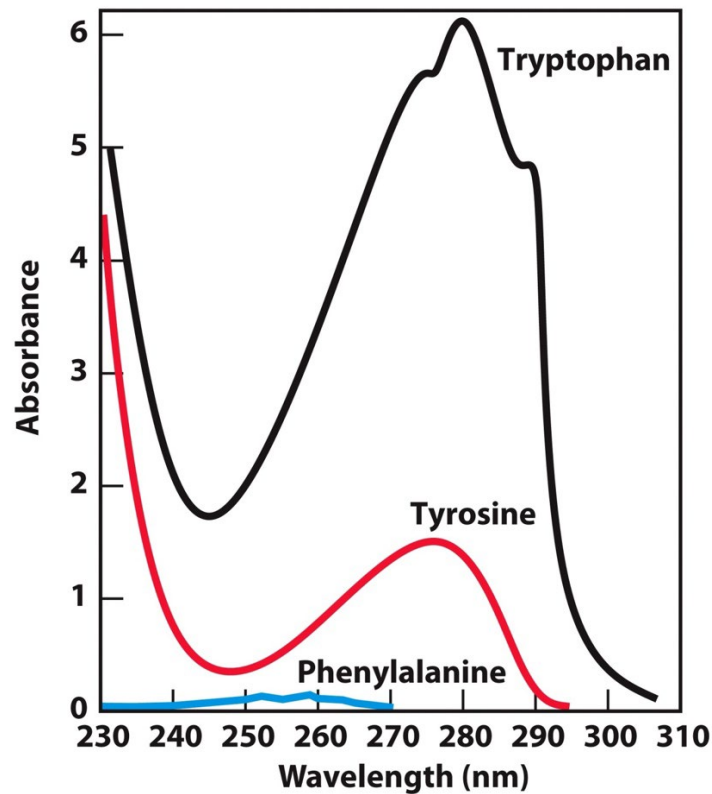
Gugus R asam amino dari golongan ini merupakan hidrokarbon dan bersifat hidrofobik, golongan ini merupakan asam amino dengan gugus -R alipatik.



2. Asam amino Aromatic (3)



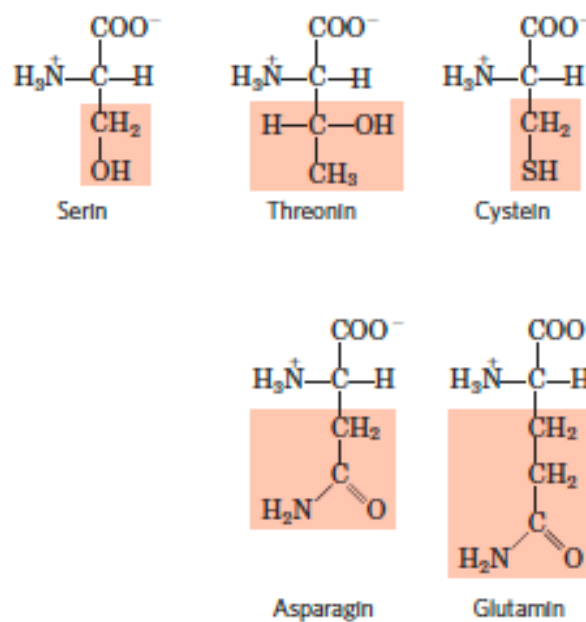
Rantai samping asam amino ini menyerap sinar UV pada 270–280 nm



Gambar 62 Daerah serapan UV Tyrosin dan Fhenilalanin

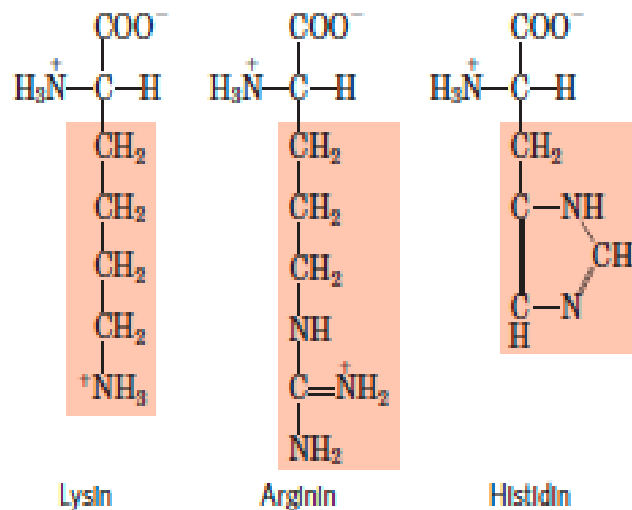
3. Asam amino Polar, tidak bermuatan (5)

Gugus R dari asam amino polar lebih larut dalam air, atau lebih hidrofilik, dibandingkan dengan asam amino non polar, karena golongan ini mengandung gugus fungsional yang dapat membentuk ikatan hydrogen dengan air.



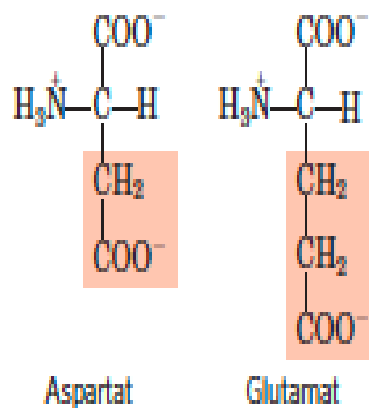
5. Asam Amino bermuatan Positif (3)

Asam amino yang mengandung gugus R yang bermuatan positif pada pH 7,0 adalah Lysin yang mengandung tambahan gugus amino kedua, diposisi alifatiknya, arginin mengandung gugus guanidino, yang bermuatan positif, dan histidine yang mengandung gugus imidazole yang mengion sedikit.



6. Asam Amino Bermuatan Negatif (2)

Dua asam amino yang mengandung gugus R dengan muatan total negative pada pH 7,0 adalah asam aspartate dan asam glutamate, masing-masing mempunyai tambahan gugus karboksil.



Disamping 20 macam asam amino yang umum terdapat dalam protein makhluk hidup, dikenal juga 2 golongan asam amino lain, yaitu:

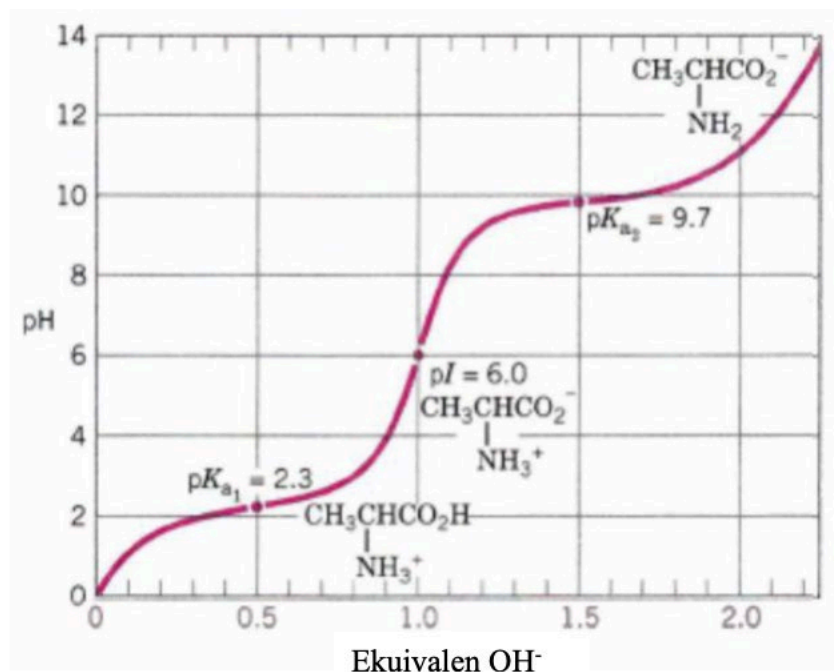
1. Asam amino yang jarang sebagai pembentuk protein
2. Asam amino yang tidak sama sekali pembentuk protein

Contoh 1. Asam amino: 4-hidroksiprolin, 5-hidroksilisin, desmosin dan Isodesmosin. Contoh 2. Asam amino: β -Alanin, Sitrulin, Ornitin, Kanavanin, β -Sianoalanin.

C. Ionisasi Asam Amino

Pada pH asam, gugus karboksil terprotonasi dan asam amino dalam bentuk kationik. Sedangkan pada pH netral, gugus karboksil terdeprotonasi tetapi gugus amino terprotonasi. Muatan bersih adalah nol; ion seperti itu disebut ion Zwitter. Pada pH basa, gugus amino netral $-NH_2$ dan asam amino dalam bentuk anionik. Asam amino membawa muatan bersih nol pada pH isoelektrik (pI). Zwitter ion mendominasi pada nilai pH antara nilai pKa dari gugus amino dan karboksil. Untuk asam amino tanpa rantai samping yang dapat terionisasi, titik isoelektrik (titik ekuivalen, pI) adalah: $pI = \frac{1}{2} (pK_1 + pK_2)$.

Asam amino mempunyai kurva titrasi yang khas.

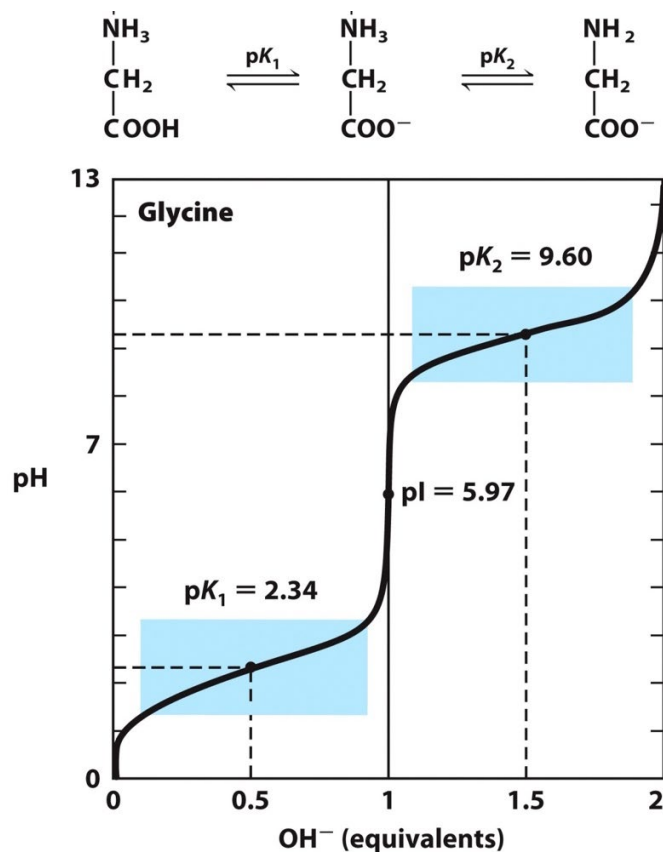


Gambar 63 Kurva Titrasi Alanin

Perhatikanlah kurva titrasi alanin, pada awal titrasi bentuk yang dominan adalah ⁺NH₃-CHR-COOH, bentuk protonnya. Pada titik tengah tahap pertama titrasi, gugus

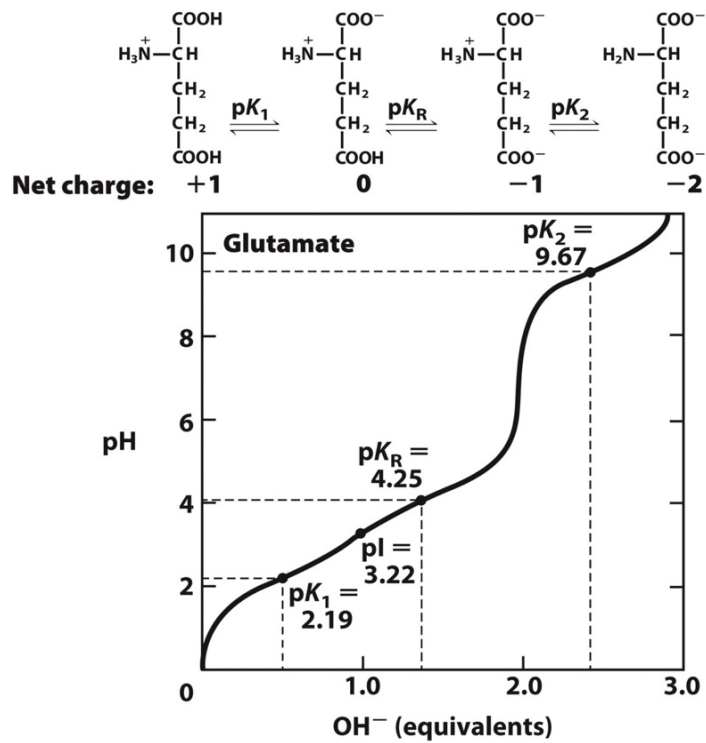
karboksil alanin akan kehilangan proton, dan konsentrasi molar donor proton ($^+\text{NH}_3\text{-CHR-COOH}$) sama dengan konsentrasi molar akseptor proton ($^+\text{NH}_3\text{-CHR-COO}^-$). Pada titik tengah titrasi pH sama dengan pK' , dari gugus berproton yang sedang di titrasi. Karena titik tengah pH mencapai 2,34 gugus karboksil memiliki pK' 2,34. Jika titrasi dilanjutkan maka akan memperoleh titik lain yang penting yaitu pada pH 6,02. Disini terdapat titik belok yang mencerminkan mulainya pelepasan proton yang kedua, pada pH ini alanin sebagian besar bentuk ion dipolar ($^+\text{NH}_3\text{-CHR-COO}^-$).

Pada tahap kedua titrasi berhubungan dengan pelepasan proton dari gugus $^+\text{NH}_3$ alanin. Pada titik tengah kita memperoleh konsentrasi molar yang sama bagi ($^+\text{NH}_3\text{-CHR-COO}^-$) dan ($\text{NH}_2\text{-CHR-COO}^-$), pada pH 9,69, sama dengan pK' bagi gugus $^+\text{NH}_3$. Titrasi sempurna terjadi pada pH kira-kira 12, pada saat ini Sebagian besar alanin berbentuk ($\text{NH}_2\text{-CHR-COO}^-$). Berikut ini adalah kurva titrasi glisin, Jelaskan kurva titrasi glisin seperti halnya kurva titrasi alanin.



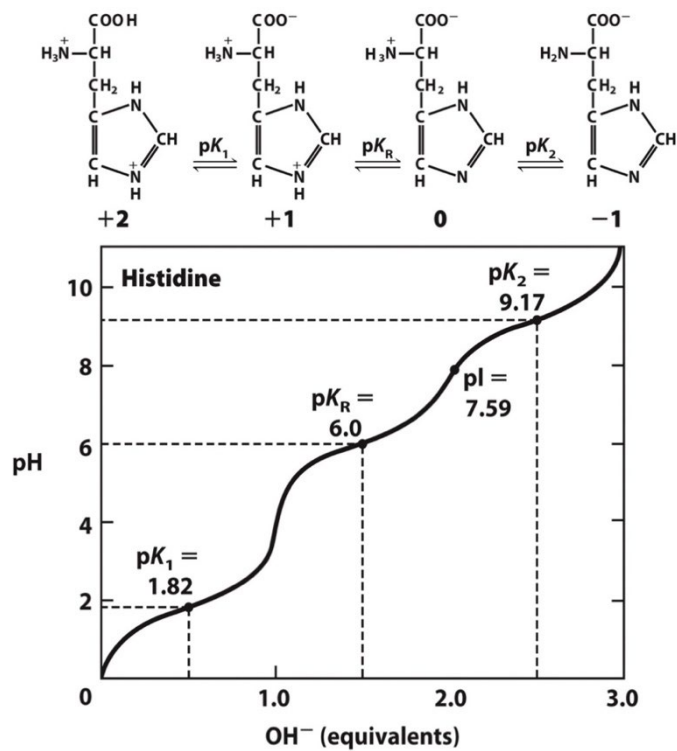
Gambar 64 Kurva Titrasi Glisin

Berikut ini adalah kurva titrasi glutamate yang memiliki harga pK' 2,19, pK_R 4,25 dan pK_2 9,67. Jelaskan kurva titrasi glutamat seperti halnya kurva titrasi alanin.



Gambar 65 Kurva Titrasi Glutamat

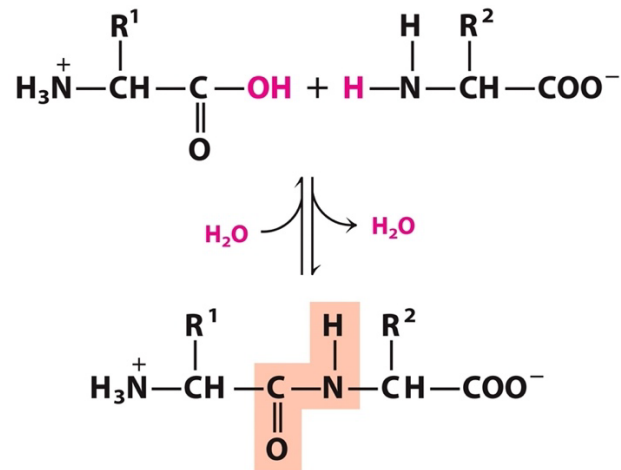
Berikut ini adalah kurva titrasi histidin yang memiliki harga pK_1 1,82, pK_R 6,0 dan pK_2 7,59. Jelaskan kurva titrasi histidin seperti halnya kurva titrasi alanin.



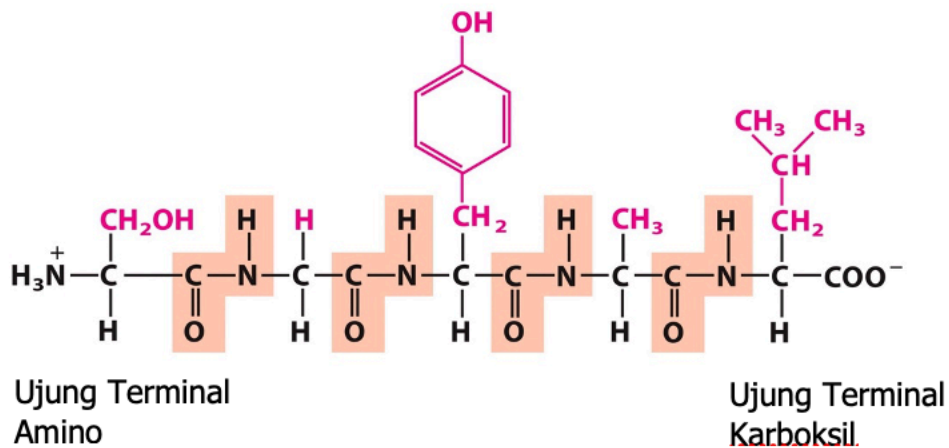
Gambar 66 Kurva Titrasi Histidin

Pembentukan Ikatan Peptida

Asam amino membentuk protein melalui ikatan peptida, antara gugus karboksil dengan gugus amino pada asam amino lain.



Pentapeptide Ser-Gly-Tyr-Ala-Leu



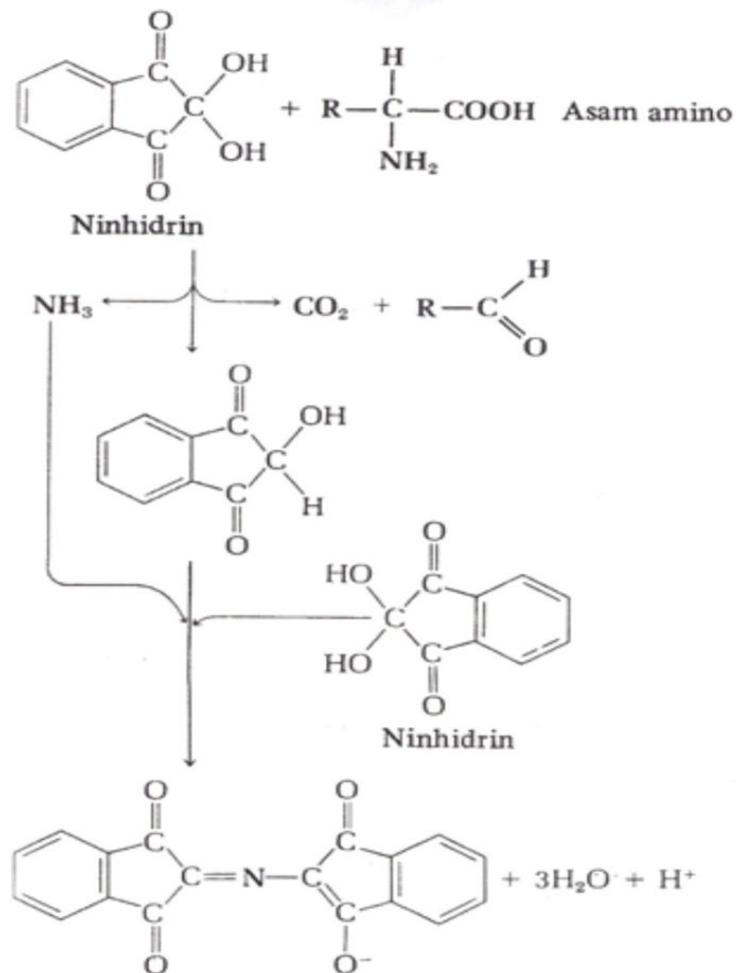
D. Reaksi asam amino

Reaksi kimia asam amino mencirikan gugus fungsional yang terikat pada asam amino yaitu: gugus karboksil, gugus amino dan gugus alkilnya. Gugus aminonya dapat memberikan reaksi asetilasi, gugus karboksil dapat memberikan reaksi esterifikasi dan gugus alkilnya dapat memberikan reaksi ligase, liase, oksidasi reduksi dan lain-lain. Beberapa reaksi khas asam amino adalah sebagai berikut.

1. Reaksi Ninhidrin

Reaksi ini digunakan untuk mendeteksi asam amino secara kualitatif maupun kuantitatif dalam jumlah yang kecil. Reaksi dengan ninhidrin ini menghasilkan produk kompleks berwarna ungu pada semua asam amino yang mempunyai gugus α amino bebas. Sedangkan produk yang dihasilkan oleh prolin berwarna kuning, karena pada molekul ini terjadi substitusi gugus α amino. Pada kondisi yang sesuai intensitas warna yang dihasilkan dapat digunakan untuk mengukur konsentrasi asam amino secara kolorimetri.

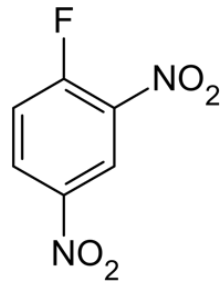
Reaksi Ninhidrin



Komplek berwarna ungu

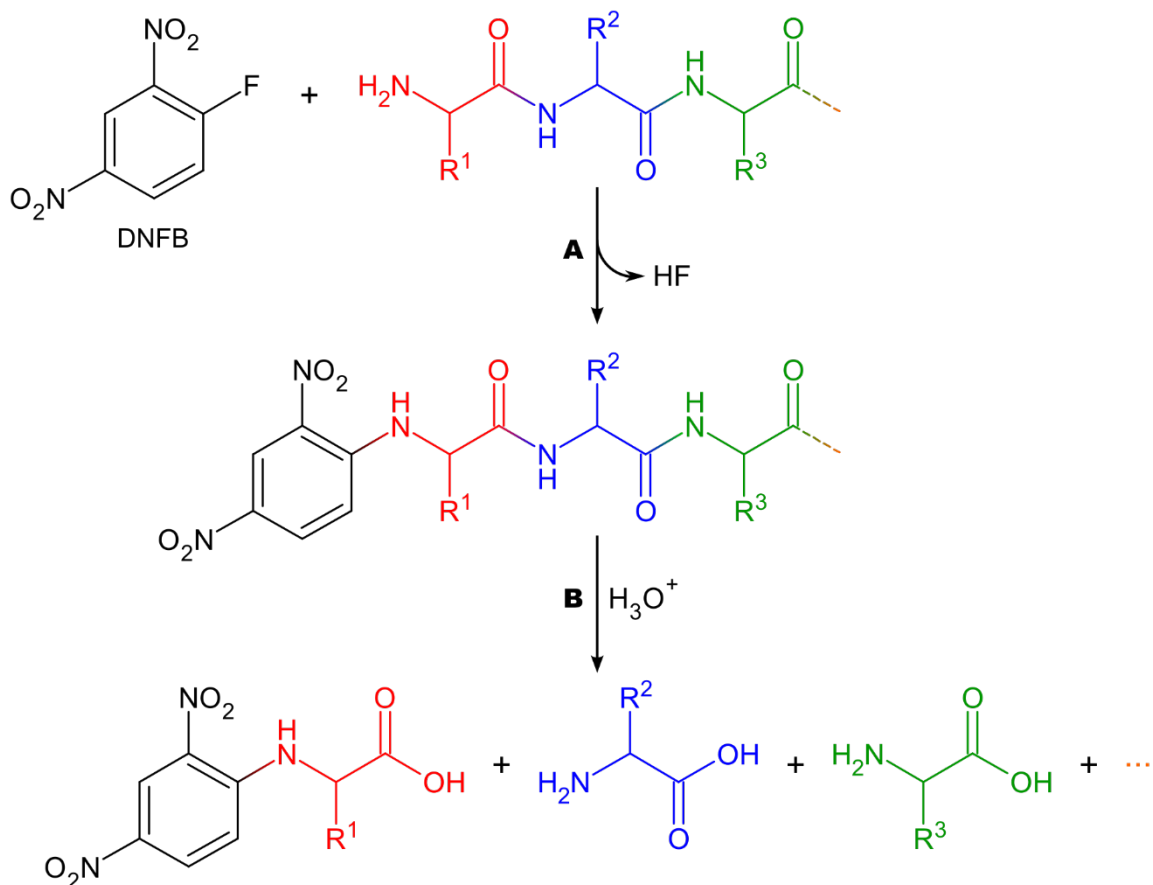
2. Reaksi 1 fluoro, 2,4 dinitrobenzene (FDNB).

Asam amino bereaksi dengan FDNB dengan gugus α asam amino menghasilkan 2,4-dinitrofenil, yang dapat digunakan dalam mengidentifikasi asam amino. Reaksi ini sangat penting pada penentuan deret asam amino dalam peptide.

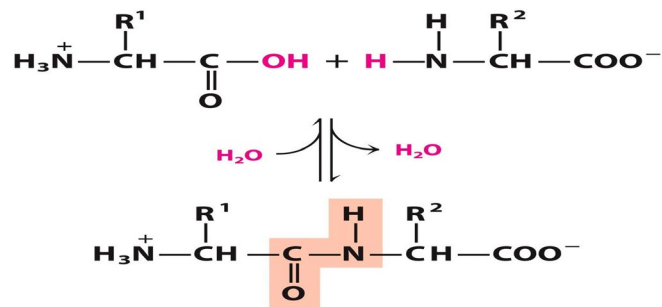


1 fluoro, 2,4 dinitrobenzene (FDNB).

Reaksi FDNB

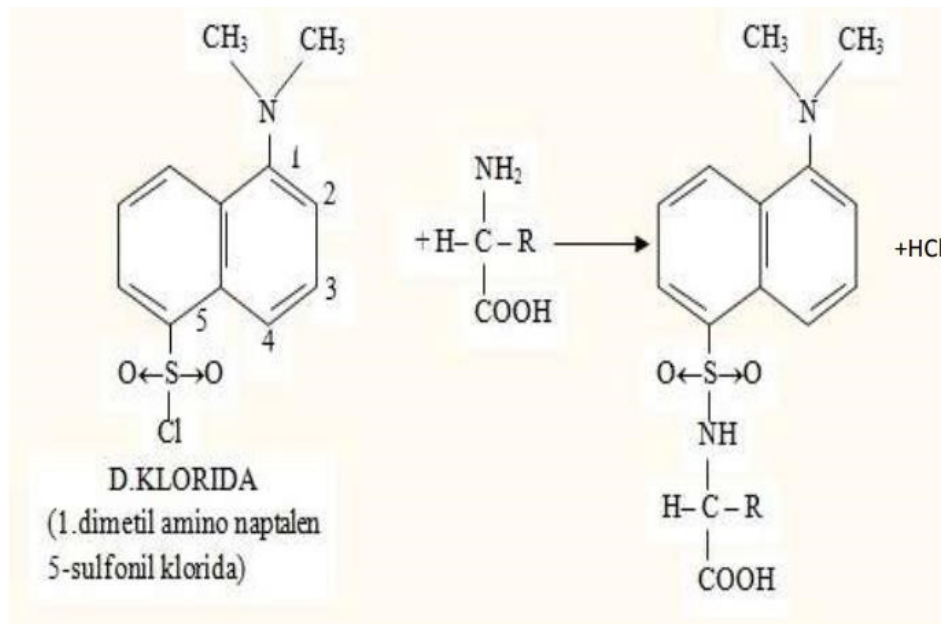


3. Reaksi Pembentukan Polipeptida



4. Reaksi Dansil Klorida

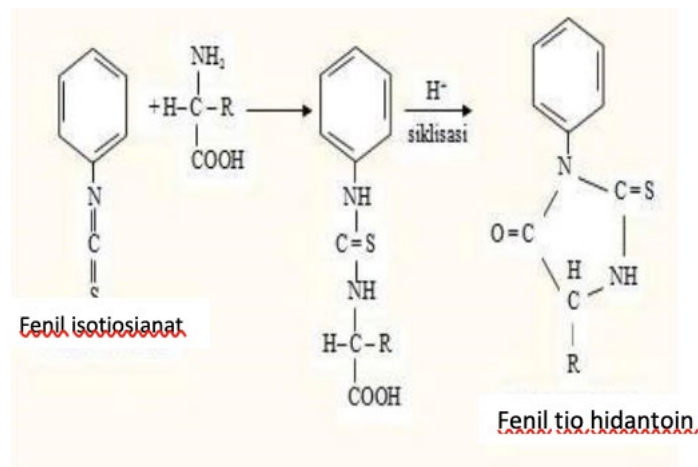
Reaksi dansil klorida adalah reaksi antara gugus amino pada asam amino dengan 1-dimetilamino naftalena-5-sulfonil klorida (dansil klorida) karena gugus dansil mempunyai sifat fluoresensi yang tinggi, maka derivat dansil asam amino dapat ditentukan dengan cara fluorometri.



5. Reaksi Edman

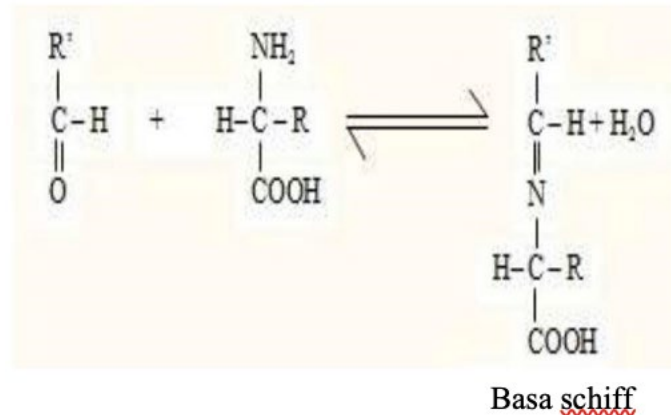
Reaksi edman merupakan reaksi antara asam amino dengan fenilisotiosianat yang menghasilkan derivat asam amino feniltiokarbamil. Dalam suasana asam dalam pelarut nitrometana yang terakhir ini mengalami siklisasi membentuk senyawa lingkaran feniltiohidantion. Hasil reaksi yang terjadi dapat dipisahkan dan diidentifikasi dengan cara

kromatografi. Reaksi edman ini juga dipakai untuk penentuan asam amino N-ujung suatu reaksi rantai polipeptida.



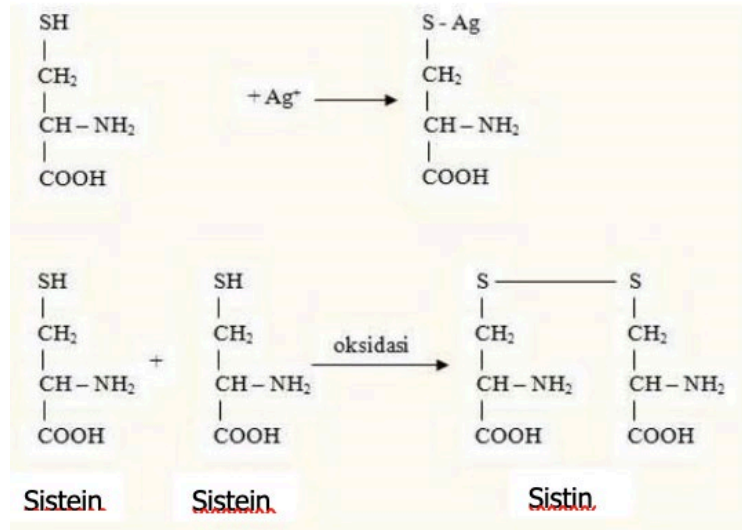
6. Reaksi basa Schiff

Reaksi basa Schiff adalah reaksi reversible antar gugus α -amino dengan gugus aldehida. Basa Schiff biasanya terjadi sebagai senyawa antara dalam reaksi enzim antara α -asam amino dan substrat.



7. Reaksi gugus R

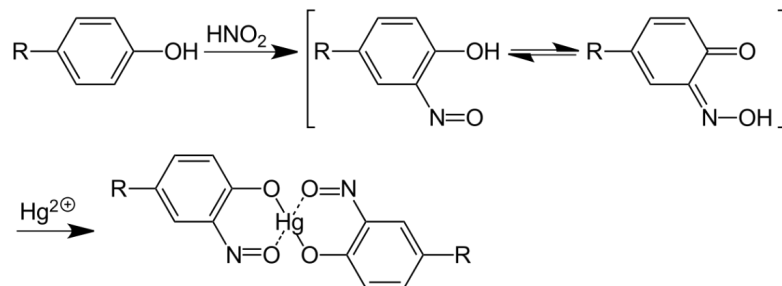
Gugus SH pada sistein, hidroksifenol pada tirosin, dan guanidium pada arginin menunjukkan reaksi khas yang biasa terjadi pada gugus fungsi tersebut. Gugus sulfhidril pada sistein bereaksi dengan ion logam berat, dan menghasilkan merkaptida. Reaksi oksidasi sistein dengan adanya ion besi memberikan hasil senyawa disulfida dan sistein.



8. Reaksi Millon

Reaksi ini khusus untuk asam amino tirosin, satu-satunya asam amino yang mengandung gugus fenol, gugus hidroksil terikat pada cincin benzena. Gugus fenol pada asam amino tirosin dinitrasi oleh asam nitrat dalam larutan, kemudian tirosin nitrat membentuk kompleks dengan ion merkuri dalam larutan untuk membentuk larutan merah bata atau endapan tirosin nitrat.

Reaksi:



Kompleks berwarna merah bata

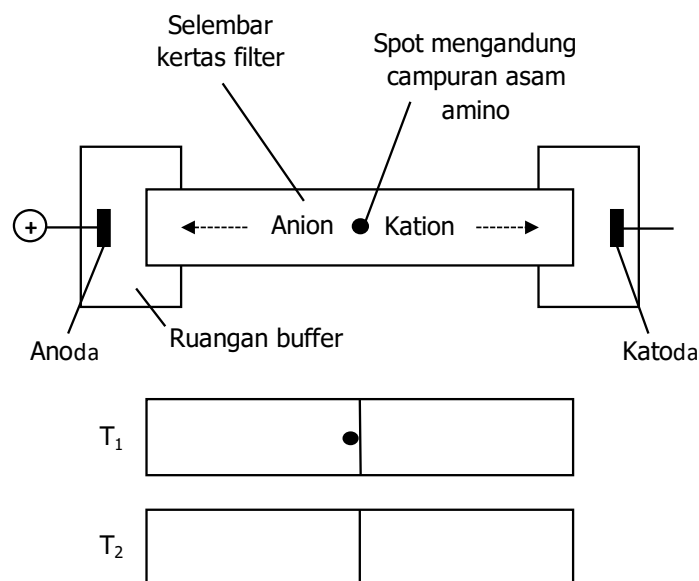
E. PEMISAHAN ASAM AMINO

Untuk memisahkan, mengidentifikasi dan mengukur secara kuantitatif jumlah tiap-tiap asam amino dalam campuran, diperlukan metode yang sensitif seperti elektroforesis dan kromatografi penukar ion. Kedua metode ini berdasarkan perbedaan dalam tingkah laku asam-basa dari asam amino yang berbeda.

1. Elektroforesis Kertas.

Metode yang paling sederhana untuk memisahkan asam amino adalah elektroforesis kertas. Setetes larutan dari campuran asam amino ditempatkan pada selembaar kertas filter yang sudah dibasahi oleh buffer pada pH tertentu. Medan listrik dengan tegangan tinggi diberikan pada kertas tersebut. Karena perbedaan nilai pK' , asam amino akan bermigrasi menuju arah yang berbeda dan pada kecepatan yang berbeda di sepanjang kertas, tergantung pada pH sistem buffer dan tegangan listrik yang dipergunakan.

Contoh: Pada pH 1,0: Asam amino histidin, arginin dan lisin mempunyai muatan +2 dan bergerak lebih cepat menuju katoda bermuatan negatif dibandingkan dengan asam amino lainnya, yang mempunyai muatan +1. Pada pH 6,0 sebaliknya, asam amino bermuatan positif (lisin, arginin, histidin) bergerak menuju katoda, dan asam amino yang bermuatan negatif (asam aspartat dan asam glutamat) menuju anoda. Semua asam amino lain akan tinggal pada, atau dekat titik asal, karena senyawa ini tidak mempunyai gugus mengion selain dari gugus amino dan α -karboksil dan mempunyai titik isoelektrik yang hampir sama ditentukan dari nilai $pK'1$ dan $pK'2$.



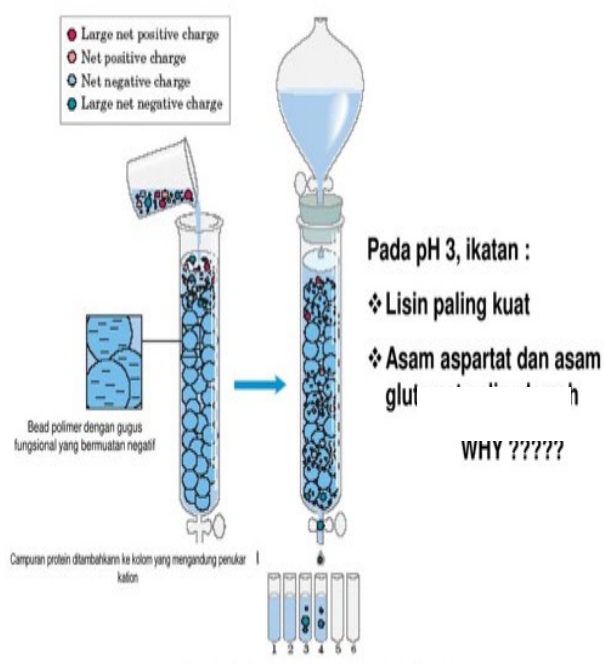
Gambar 67 Elektroforesis Kertas

2. Kromatografi Penukar Ion.

Kromatografi penukar ion merupakan metode yang paling banyak dipergunakan untuk memisahkan, mengidentifikasi dan menghitung jumlah tiap - tiap asam amino di dalam suatu campuran. Metode ini memanfaatkan perbedaan dalam asam basa dari asam amino. Kolom kromatografi terdiri dari tabung panjang yang diisi oleh granula resin sintetik yang mengandung gugus bermuatan tetap. Resin dengan gugus anion disebut resin penukar kation, resin dengan gugus kation disebut resin penukar anion. Pada pH 3,0 sebagian besar asam amino berbentuk kation dengan muatan total positif, tetapi senyawa - senyawa ini berbeda dalam tingkat mengionnya. Pada saat campuran mengalir melalui kolom, asam amino bermuatan positif akan menukar ion Na^+ yang berikatan dengan gugus tetap $^-\text{SO}_3$ pada partikel resin. Pada pH 3,0 asam amino yang bermuatan paling positif (lisin, arginin, dan histidin) akan menukar Na^+ pertama - tama dari resin, lalu terikat paling kuat pada resin.

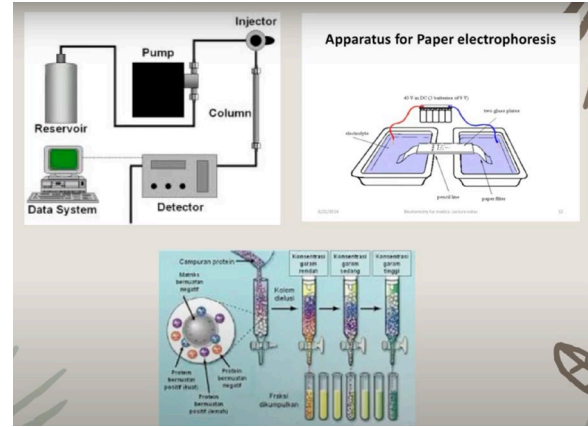
Asam amino pada pH 3,0 bermuatan positif paling kecil (asam glutamat dan asam aspartat) akan terikat paling lemah. Semua asam amino yang lain mempunyai muatan positif diantara kedua ekstrim. Asam amino yang berbeda, akan bergerak ke bawah kolom resin pada kecepatan yang berbeda, tergantung pada nilai pK' , sebagian tergantung adsorpsi atau kelarutannya didalam partikel resin. Asam glutamat dan asam aspartat akan bergerak ke bawah kolom pada kecepatan paling tinggi, karena ikatan senyawa dengan resin paling lemah pada pH 3,0 sedangkan lisin, arginin, dan histidin akan bergerak paling lambat. Seluruh prosedur ini diotomatiskan, sehingga pencucian, pengumpulan, fraksi, analisa tiap fraksi, dan pencatatan data dilakukan secara otomatis di dalam analisa asam amino.

2. Kromatografi penukar ion



Gambar 68 Kromatografi penukar Ion

Materi Asam amino dapat di lihat pada video berikut ini.



Gambar 69 Asam amino
 Sumber: Sukaryawan & Sari, 2022

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke tiga biokimia 1 pada pokok bahasan asam amino yang telah disajikan, bagaimana kebutuhan asam amino bagi manusia dewasa? Bahan pangan apa saja yang banyak mengandung asam amino?

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, setelah mengamati bahan pangan disekeliling saudara, bahaslah bersama kelompok saudara tentang kandungan asam amino pada bahan pangan tersebut, mengapa makhluk hidup membutuhkan asam amino yang berasal dari bahan pangan tersebut? Bagaimana kandungan asam amino pada bahan pangan disekitar daerah saudara? Bahaslah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan. Bahaslah

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang makhluk hidup membutuhkan asam amino. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang mengapa makhluk hidup membutuhkan asam amino. Bagaimana fungsi masing-masing asam amino tersebut pada makhluk hidup. Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

4. APLIKASI

Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang makhluk hidup membutuhkan asam amino. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di apload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal berikut ini.

- a. Bagaimana kadar asam amino bahan pangan yang saudara jadikan sampel proyek?
- b. Bagaimana ciri-ciri bahan pangan yang banyak mengandung asam amino/protein pada sampel saudara?
- c. Bahaslah fungsi dan struktur asam amino yang membentuk protein makhluk hidup?

- d. Bahaslah reaksi-reaksi yang terjadi pada asam amino
- e. Gambarkan dan bahaslah bagaimana cara memurnikan asam amino?
- f. Gambarkan dan bahaslah bagaimana cara memisahkan asam amino?
- g. Hitunglah pH larutan dan gambarkan grafiknya serta tunjukkan pH isoelektriknya dari 10mL Alanin 0,1 M di titrasi dengan NaOH 0,1M?

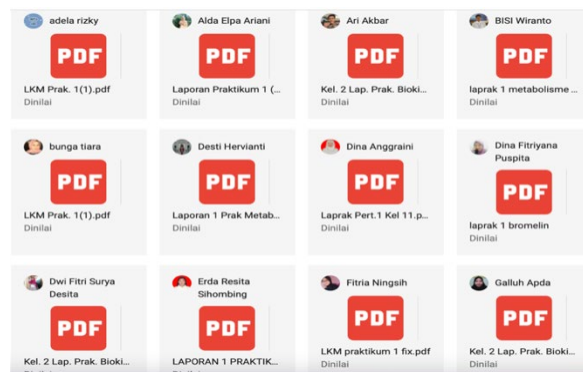
No.	V. NaOH 0,1M (mL)	pH larutan
1	1	
2	2	
3	3	
4	4	
5	5	
6	6	
7	7	
8	8	
9	9	
10	10	
11	11	
12	12	
13	13	
14	14	
15	15	
16	16	
17	17	
18	18	
19	19	
20	20	

$$pK_1 = 2,34, pK_2 = 9,69$$

5. REFLEKSI

Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 3 Asam Amino". Selanjutnya laporan tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id> Laporan 3 Asam Amino minimal memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetus ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka.

Contoh submit laporan 2 Biomolekul



Gambar 70 Submit Laporan 3 Asam amino

Materi perkuliahan pokok bahasan asam amino dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.

ASAM AMINO

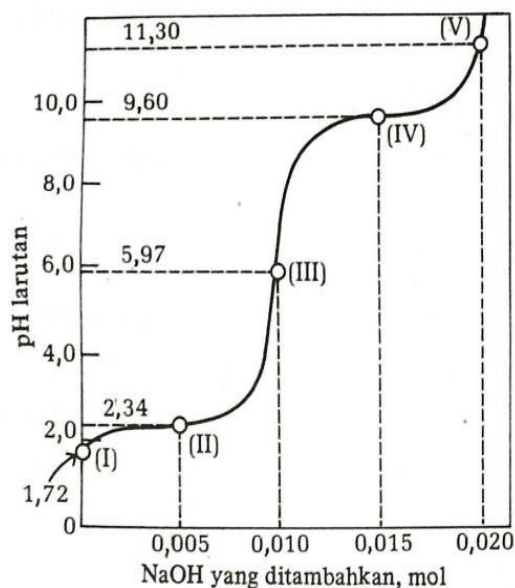
- Kemampuan akhir tiap tahapan belajar (Sub-CPMK):
- Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan asam amino dalam kehidupan sehari-hari (Sub-CPMK2).

Gambar 71 Paparan materi asam amino

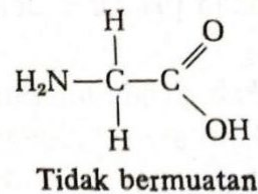
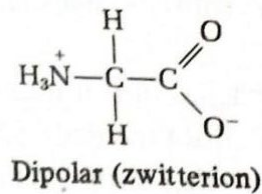
Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di submit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

1. Tuliskan ciri-ciri asam amino dan tuliskan struktur dari 20 jenis asam amino yang menyusun Protein berdasarkan kepolaran gugus alkilnya?
2. Berdasarkan kepolaran gugus alkilnya (-R)nya asam amino dapat digolongkan menjadi 5 golongan. Tuliskan dan jelaskan penggolongan asam amino tersebut?
3. Hubungan di antara Kurva Titrasi dan Sifat Asam-Basa Glisin. Suatu larutan 100 mL dari 0,1 M glisin pada pH 1,72 dititrasi oleh 2 M larutan NaOH. Selama titrasi, pH diukur dan hasilnya dipetakan pada grafik yang diperlihatkan berikut ini. Titik-titik penting pada titrasi ditunjukkan oleh angka I sampai V pada grafik. Bagi tiap-tiap pernyataan di bawah ini, tentukanlah titik kunci yang sesuai pada titrasi, dan berikan alasan pilihanmu.
 - (a) Titik manakah yang memberikan kita pH larutan 0,1 M glisin seperti pada bentuk $\text{H}_3\text{N}^+ - \text{CH}_2 - \text{COOH}$?
 - (b) Pada titik manakah rata-rata muatan total pada glisin = $+\frac{1}{2}$?
 - (c) Pada titik manakah gugus amino dari setengah molekul glisin mengion?
 - (d) Pada titik manakah pH sama dengan pK' ionisasi gugus karboksil dari glisin?
 - (e) Pada titik manakah pH sama dengan pK'' ionisasi gugus amino berproton ($-\text{NH}_3^+$) dari glisin?
 - (f) Pada titik manakah glisin mempunyai kapasitas buffer maksimum?
 - (g) Pada titik manakah rata-rata muatan total glisin menjadi nol?
 - (h) Pada titik manakah gugus karboksil glisin telah sempurna dititrasi (titik ekuivalen pertama)?
 - (i) Pada titik manakah setengah gugus karboksil mengion?
 - (j) Pada titik manakah glisin dititrasi sempurna (titik ekuivalen kedua)?
 - (k) Pada titik manakah struktur dari senyawa dominan berbentuk $\text{H}_3\text{N}-\text{CH}_2-\text{COO}^-$?
 - (l) Pada titik manakah struktur dari senyawa dominan menunjukkan campuran 50-50 dari $\text{H}_3\text{N}-\text{CH}_2-\text{COO}^-$ dan $\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{COO}^-$?



- (m) Pada titik manakah rata-rata muatan total glisin -1 ?
- (n) Pada titik manakah struktur senyawa dominan terdiri dari campuran 50-50 dari $\text{H}_3\text{N}-\text{CH}_2-\text{COOH}$ dan $\text{H}_3\text{N}^+-\text{CH}_2-\text{COO}^-$?
- (o) Titik manakah yang menunjukkan titik isoelektrik glisin?
- (p) Pada titik berapakah rata-rata muatan total glisin $-\frac{1}{2}$?
- (q) Titik manakah yang menunjukkan akhir titrasi?
- (r) Jika seseorang ingin menggunakan glisin sebagai buffer yang efisien, titik manakah yang menggambarkan pH yang paling buruk bagi daya buffer glisin?
- (s) Titik manakah pada titrasi ini yang mempunyai bentuk molekul dominan $\text{H}_3\text{N}-\text{CH}_2-\text{COO}^-$?
4. Berapa Banyak Glisin yang Berbentuk Sebagai Molekul yang Sama Sekali Tidak Bermuatan? Pada pH sama dengan titik isoelektrik, muatan total glisin sama dengan nol. Walaupun ada dua struktur glisin yang dapat digambarkan, yang mempunyai muatan total nol (bentuk dipolar dan bentuk tidak bermuatan), bentuk dominan glisin pada titik isoelektrik adalah bentuk dipolar.
- (a) Jelaskan mengapa bentuk glisin pada titik isoelektrik merupakan dipolar, dan bukan bentuk yang sama sekali tidak bermuatan?
- (b) Perkirakanlah fraksi glisin yang berbentuk sama sekali tidak bermuatan pada titik isoelektrik. Jelaskan alasan anda.



5. Tiap-tiap gugus yang dapat mengion dari suatu asam amino dapat berada dalam satu dua antara dua keadaan: bermuatan atau netral. Muatan listrik pada gugus fungsional ditentukan oleh hubungan di antara pK' asam amino dan pH larutan. Hubungan ini diterangkan oleh persamaan Henderson-Hasselbalch.
- Histidin mempunyai tiga gugus fungsional yang mengion. Tuliskanlah persamaan ekuilibrium yang sesuai bagi ketiga ionisasi, dan tentukanlah konstanta ekuilibrium yang benar (pK') bagi tiap ionisasi. Gambarkan struktur histidin pada tiap tingkat ionisasi. Berapa muatan total molekul histidin pada setiap tingkat ionisasi?
 - Gambarkan struktur histidin yang dominan, dan tingkat ionisasinya pada pH 1, 4, 8, dan 12. Perhatikanlah bahwa tingkat ionisasi ini dapat ditentukan dengan memperlakukan tiap gugus yang mengion secara terpisah.
 - Berapa muatan total histidin pada pH 1, 4, 8, dan 12? Apakah histidin akan bergerak menuju anoda (+) atau katoda (-) selama elektroforesis? pada pH tersebut?
6. Umumnya glisin digunakan sebagai buffer. Persiapan suatu buffer glisin 0,1 M dimulai dengan 0,1 M glisin hidroklorida ($^+\text{NH}_3-\text{CH}_2-\text{COOH Cl}^-$) dan glisin ($^+\text{NH}_3-\text{CH}_2-\text{COO}^-$), yaitu dua bentuk glisin yang tersedia secara komersil. Berapa volume dari kedua larutan ini yang harus dicampur untuk mempersiapkan 1 L buffer glisin 0,1 M yang mempunyai pH 3,2?
7. Elektroforesis Kertas Asam Amino. Setetes larutan yang mengandung campuran glisin, alanin, asam glutamat, lisin, arginin, dan histidin ditempatkan di tengah-tengah secarik kertas dan dikeringkan. Kertas ini dibasahi dengan buffer ber-pH 6,0 dan suatu aliran listrik diberikan pada kedua ujung kertas.
- Asam amino mana yang bergerak menuju anoda?
 - Asam amino mana yang bergerak menuju katoda?
 - Asam amino mana yang tertinggal pada atau disekitar daerah awal?

8. Pemisahan Asam Amino oleh Khromatografi Pertukaran Ion. Campuran dari asam amino dianalisa pertama-tama dengan memisahkan campuran menjadi bagian-bagiannya melalui khromatografi pertukaran ion. Sejumlah kecil campuran ditempatkan di atas kolom buritan polistirena yang mengandung residu asam sulfonate, kolom ini lalu dicuci dengan larutan buffer. Asam amino mengalir ke bawah kolom pada berbagai kecepatan karena adanya dua faktor yang menghambat gerakan tersebut: (1) gaya tarik ionik di antara residu asam sulfonat yang bermuatan negatif pada kolom dan gugus fungsional bermuatan positif pada asam amino, dan (2) interaksi hidrofobik di antara gugus rantai samping asam amino dan kerangka resin polistirena yang bersifat sangat hidrofobik. Bagi tiap pasang asam amino yang dituliskan di bawah ini, tentukanlah anggota mana yang akan dicuci pertama-tama dari kolom pertukaran ion (yang paling lemah diikat) oleh buffer ber-pH 7,0.
- (a) Asp dan Lys
 - (b) Arg dan Met
 - (c) Glu dan Val
 - (d) Gly dan Leu
 - (e) Ser dan Ala
9. Keragaman Tripeptida, Anggaplah anda ingin melakukan sintesa tripeptida, dengan menggunakan glisin, alanin, dan serin sebagai unit pembangun.
- (a) Berapakah jenis tripeptida yang dapat dibentuk dengan menggunakan salah satu di antara ketiga asam amino dalam salah satu dari ketiga posisi, jika anda dapat memakai suatu antara asam amino lebih dari satu kali?
 - (b) Berapa jenis tripeptida yang dapat dibentuk dengan menggunakan tiap-tiap asam amino hanya satu kali.
10. Penamaan isomer optik isoleusin.
- (a) Berapa jumlah pusat khiral yang dimiliki molekul ini?
 - (b) Berapa jumlah isomer optik yang ada?
 - (c) Gambarkan rumus perspektif bagi semua isomer optik isoleusin.

DAFTAR PUSTAKA

1. Al-Mossawi, A.H., Al-Garawi, Z.S. 2018. *Qualitative tests of amino acids and proteins and enzyme kinetics*. Baghdad: Mustansiriyah University.
2. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
3. Ramus, V. 2020. *Qualitative Tests for Proteins*. <https://www.youtube.com/watch?v=6YPWipP-Qe8&feature=youtu.be> (diakses pada tanggal 15 Oktober 2020).
4. Subroto, E., dkk. 2020. The Analysis Techniques Of Amino Acid And Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
5. Sukaryawan, M. 2004. *Biokimia*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
6. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
7. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
8. Thenawidjaja, M. 1990. *Dasar-dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
9. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
10. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
11. Won Chan Kim. *Principles of Biochemistry*. <https://www.kaznaru.edu.kz> . diakses pada tanggal 25 september 2020.

BAB 4 PROTEIN

4.1 Penggolongan dan Reaksi Protein

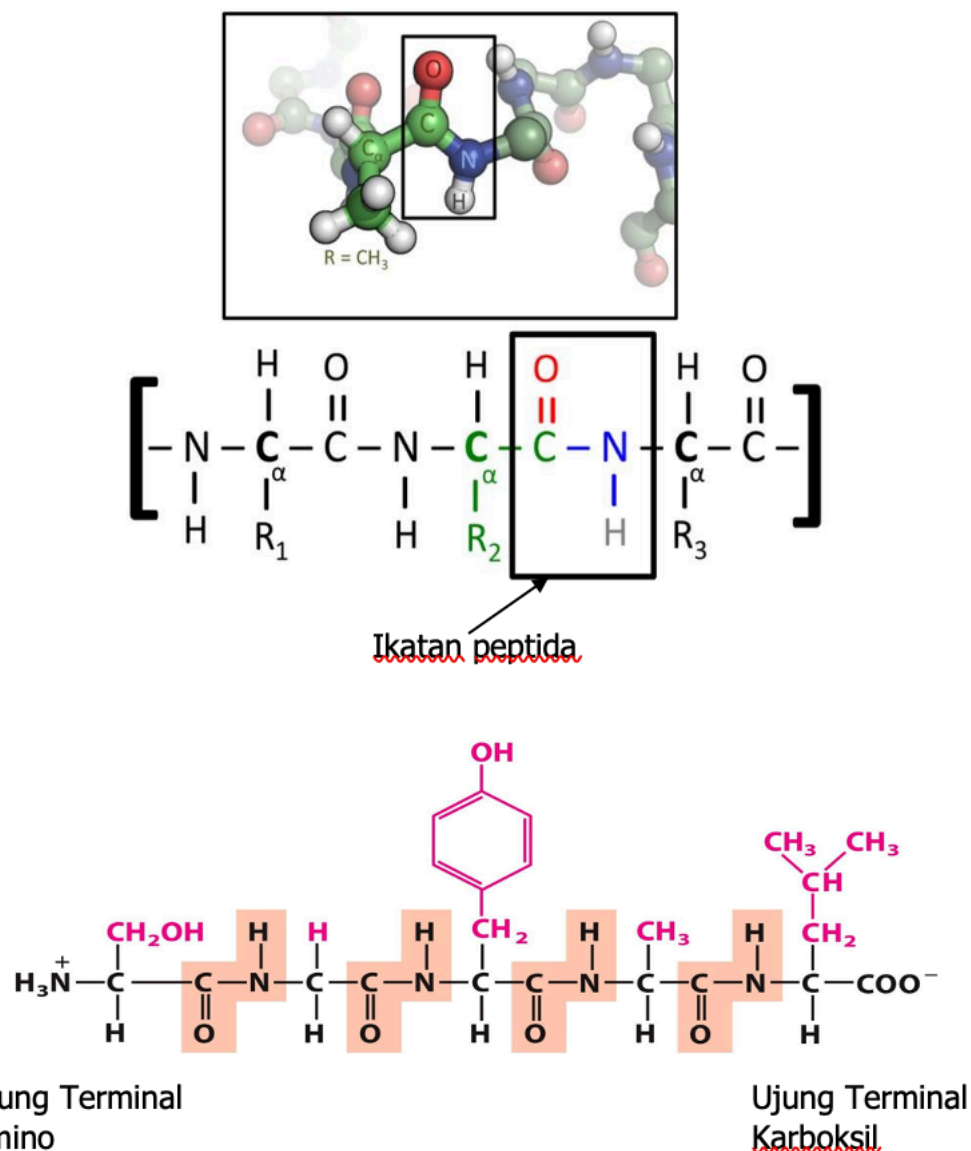
1. ORIENTASI

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya (CPMK2), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan protein dalam kehidupan sehari-hari (Sub-CPMK2). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

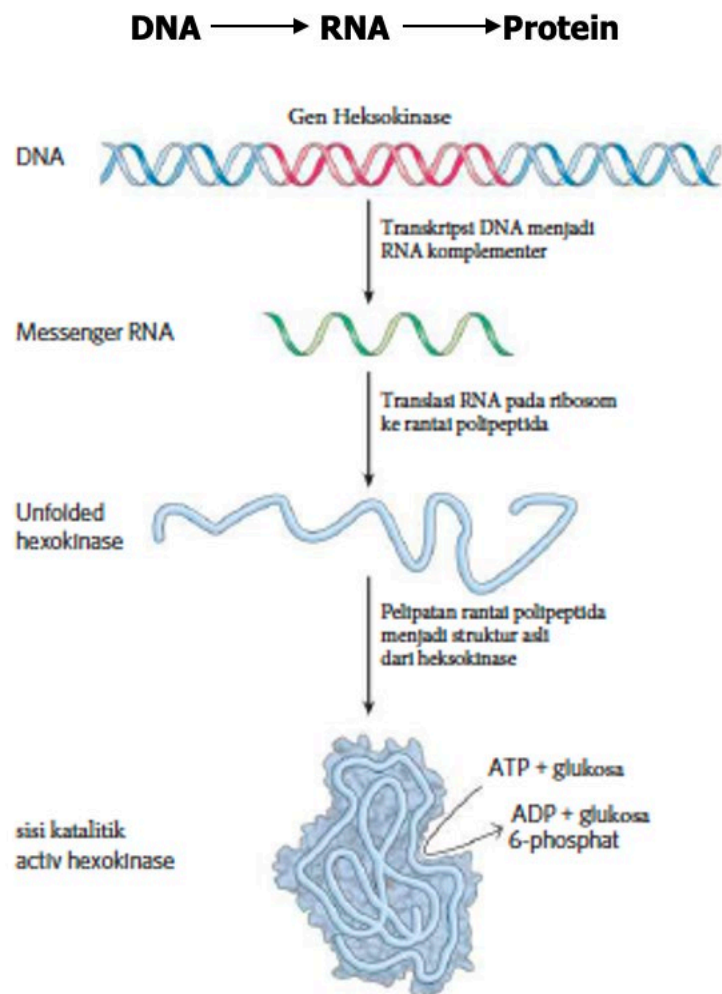
A. Sifat-sifat Protein

Protein adalah instrument yang mengekspresikan informasi genetik, melalui proses transkripsi dan translasi di dalam sel. Protein adalah makromolekul terpenting dalam sel hidup. Kata protein berasal dari bahasa Yunani protos, yang berarti 'pertama' atau 'terdepan' Hampir semua yang terjadi di dalam sel melibatkan satu atau lebih protein. Didalam sel terdapat ribuan jenis protein yang berbeda masing-masing membawa fungsi spesifik yang ditentukan oleh gen yang sesuai. Oleh karena itu protein bukan hanya merupakan makro molekul, tetapi juga amat bervariasi fungsinya. Semua protein di dalam makhluk hidup dibangun oleh susunan dasar yang sama, yaitu 20 jenis asam amino baku. Walaupun demikian Protein setiap organisme berbeda-beda karena masing-masing mempunyai deret unit asam aminonya sendiri-sendiri, tergantung dari gen masing-masing organisme tersebut,

Protein makhluk hidup umumnya dibentuk oleh 20 jenis asam amino melalui ikatan kovalen, atau ikatan peptida. Dalam molekul protein, beberapa rantai peptida bergabung bersama untuk membentuk rantai polipeptida. Protein melakukan banyak fungsi dalam organisme hidup. Terdapat ribuan protein yang berbeda didalam tiap spesies organisme, jumlah protein yang terbentuk secara matematika dapat ditentukan sebanyak n factorial, dimana n merukan jumlah asam amino. Pada tetrapeptide dengan 4 jenis asam amino penyusunya maka terbentuk $4!$ Atau $(4 \times 3 \times 2 \times 1)$ 24 kemungkinan deret tetrapeptide yang berbeda. Protein dibentuk oleh asam amino melalui ikatan peptida antara gugus karboksil dengan gugus amino.



Protein hasil ekspresi dari genetik.

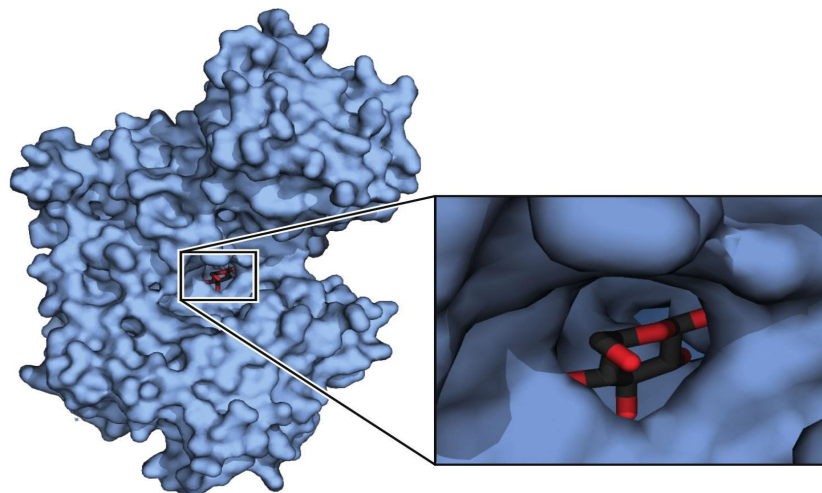


Gambar 72 DNA ke Protein

B. Ciri-ciri Protein

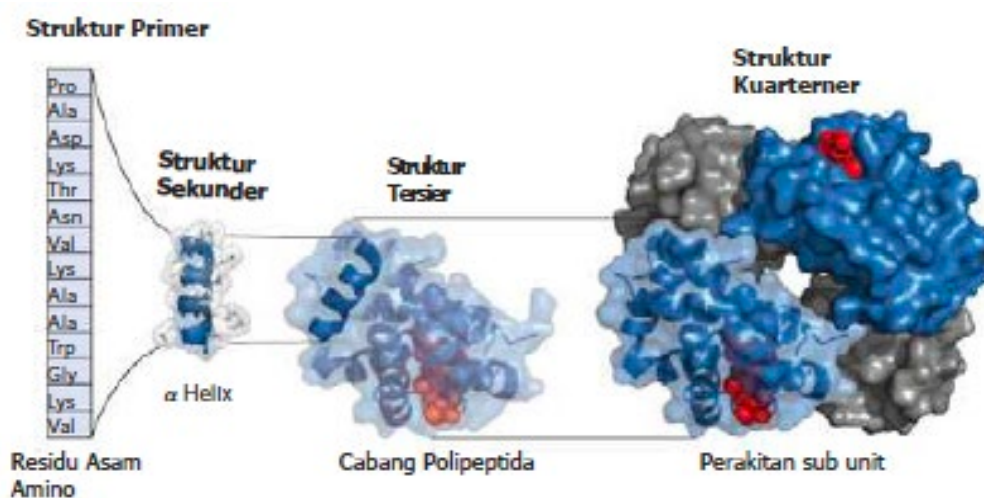
1. Memiliki berat molekul yang besar, sehingga disebut sebagai makromolekul.
2. Protein makhluk hidup umumnya di bentuk oleh 20 jenis asam amino
3. Protein selain memiliki ikatan peptida, juga terdapat ikatan kimia lain seperti ikatan hidrogen, ikatan hidrofobik, ikatan ion atau elektrostatik, dan ikatan Van der Waals.
4. Protein sangat reaktif, hal ini karena adanya residu asam aminonya.
5. Protein sangat sensitif terhadap perubahan pH, suhu, dan pelarut organik.

Interaksi antar biomolekul bersifat spesifik



Gambar 73 Interaksi antar biomolekul
(Sumber: Nelson & Cox, 2013)

Struktur tiga dimensi protein adalah bagian penting untuk memahami bagaimana fungsi protein. Protein adalah molekul dinamis yang fungsinya hampir selalu bergantung pada interaksi dengan molekul lain.



Gambar 74 Struktur Protein
(Sumber: Nelson & Cox, 2013)

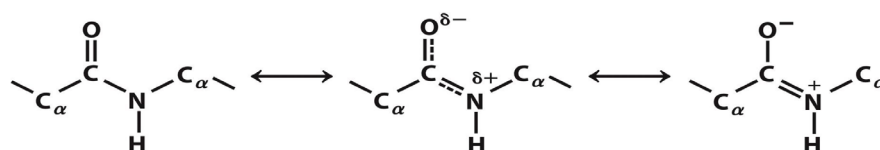
Tidak seperti kebanyakan polimer organik, molekul protein mengadopsi konformasi tiga dimensi tertentu. Struktur tiga dimensi ini mampu memenuhi kebutuhan fungsi biologi protein. Struktur ini disebut folding atau lipatan asli protein. Lipatan asli memiliki banyak kesukaan interaksi di dalam protein. Ada energi dalam atau entropi dalam pembentukan konformasi lipatan protein menjadi satu lipatan asli tertentu.

Interaksi yang Menguntungkan dalam Protein:

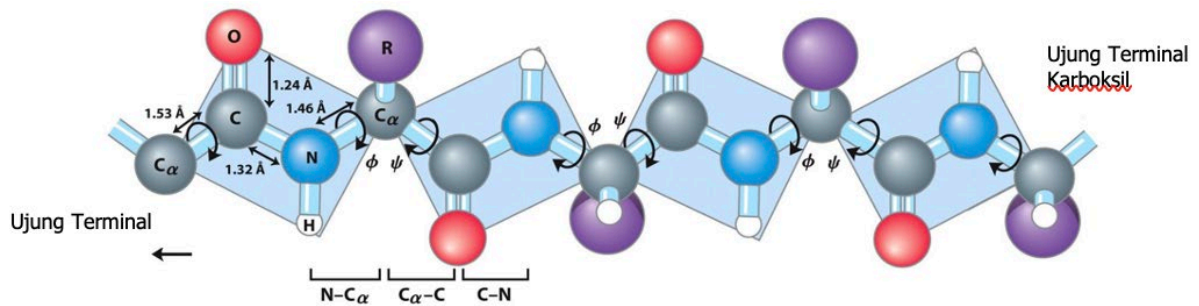
- Efek hidrofobik.
- Pelepasan molekul air di sekitar molekul lipatan protein meningkatkan entropi bersih.
- Ikatan hidrogen
- Interaksi N-H dan C=O dari ikatan peptida mengarah ke struktur seperti heliks dan lembar.
- Dispersi London
- Daya tarik lemah jarak menengah antara semua atom berkontribusi signifikan terhadap stabilitas di bagian dalam protein.
- Interaksi elektrostatik
- Interaksi kuat jarak jauh antara gugus-gugus yang permanen.
- Jembatan garam, khususnya terbentuk di lingkungan hidrofobik dengan kuat menstabilkan protein.

Struktur protein sebagian ditentukan oleh sifat-sifat ikatan peptida. Ikatan peptida adalah hibrida resonansi dari dua struktur. Resonansi menyebabkan ikatan peptida menjadi kurang reaktif dibandingkan dengan ester, sehingga menjadi cukup kaku dan hampir planar, menunjukkan momen dipol yang besar, konfigurasi trans yang disukai.

Resonansi dalam Ikatan Peptida



Polipeptida terdiri dari serangkaian bidang yang dihubungkan pada karbon.



Gambar 75 Peptida

Dari gambar di atas dapat dijelaskan bahwa:

- Rotasi di sekitar ikatan yang terhubung ke karbon alfa diizinkan
- ϕ (phi): sudut di sekitar karbon - nitrogen amida
- Ψ (psi): sudut di sekitar karbon - karbon karbonil
- Dalam polipeptida yang panjang, baik Ψ maupun ϕ adalah 180°
- Bidang peptida kaku dan rotasi bebas sebagian
- Rotasi di sekitar ikatan peptida tidak diizinkan

Distribusi Sudut Dihedral ϕ dan Ψ

- Beberapa kombinasi ϕ dan Ψ sangat tidak menguntungkan karena crowding sterik atom tulang punggung dengan atom lain di rantai samping.
- Beberapa kombinasi ϕ dan Ψ lebih disukai karena kesempatan untuk membentuk interaksi ikatan-H yang menguntungkan di sepanjang tulang punggung.
- Plot Ramachandran menunjukkan distribusi ϕ dan Ψ sudut dihedral yang ditemukan dalam protein.
- Menunjukkan elemen struktur sekunder yang umum.

Pada tahun 1940 Linus Pauling dan Robert Corey mengemukakan hasil penelitiannya bahwa pola difraksi sinar X dari kristal asam amino dipeptida dan tripeptide sederhana menyimpulkan struktur yang tepat dari ikatan peptida yang terbentuk. Mereka menemukan bahwa ikatan C-N yang menggabungkan dua asam amino pada ikatan peptida lebih pendek dari kebanyakan ikatan C-N lain, seperti sifat ikatan ganda, dan karenanya tidak dapat berotasi secara bebas. Selanjutnya mereka menemukan bahwa keempat atom gugus peptide terletak pada satu bidang, sehingga atom oksigen dari gugus karbonil dan atom hydrogen dari gugus -NH-

bersifat trans satu dengan yang lainnya. Dari penelitian ini mereka menyimpulkan bahwa ikatan C-N yang menyusun sepertiga dari semua ikatan pada polipeptida, tidak dapat berotasi secara bebas, karena sifat ikatan gandanya. Oleh karena itu kerangka polipeptida dapat digambarkan sebagai susunan bidang yang kaku yang dipisahkan oleh gugus metilen tersubstitusi (-CHR-). Dengan demikian ikatan peptide yang kaku tersebut menimbulkan beberapa kendala terhadap jumlah konformasi dalam ruang yang dapat dicapai oleh rantai polipeptida.

C. Penggolongan Protein

Protein ditinjau dari fungsi biologinya dapat digolongkan menjadi beberapa golongan, dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 12 Penggolongan Protein

Golongan Protein	Contoh
1. Enzim	Ribonuklease Tripsin
2. Protein transport	Hemoglobin Albumin serum Mioglobin β_1 - Lipoprotein
3. Protein nutrisi dan penyimpanan	Gliadin (gandum) Ovalbumin (telur) Kasein (susu) Feritin
4. Protein kontraktile atau motil	Aktin Miosin Tubulin Dynein
5. Protein struktural	Keratin Fibroin Kolagen Elastin Proteoglikan

6. Protein pertahanan	Antibodi Fibrinogen Trombin Toksin Botulinus Toksin Difteri Bisa ular Risin
7. Protein Pengatur	Insulin Hormon tumbuh Kortikotropin Represor

D. Fungsi Biologi Protein

1. Enzim

Enzim merupakan protein aktif yang berfungsi sebagai biokatalisator, mengkatalisis reaksi-reaksi pada makhluk hidup. Pada umumnya semua reaksi kimia yang terjadi pada makhluk hidup merupakan reaksi enzimatik.

Contoh: Amilase, urease, lipase dan lain-lain.

2. Protein Transport

Protein transport adalah protein yang berfungsi mengikat dan membawa molekul atau ion spesifik dari satu organ ke organ lainnya. Contohnya Haemoglobin pada sel darah merah mengikat oksigen. Ketika darah melalui paru-paru, dan membawa oksigen ini ke jaringan periferi. Kemudian oksigen dilepaskan untuk melangsungkan oksidasi nutrisi yang menghasilkan energi. Demikian juga plasma darah mengandung lipoprotein yang membawa lipid dari hati ke organ lainnya. Protein transport lain terdapat di dalam sel untuk mengikat dan membawa glukosa, asam amino dan nutrisi lain melalui membran menuju ke dalam sel.

3. Protein Penyimpanan

Protein penyimpanan adalah protein cadangan terutama terjadi pada tumbuh-tumbuhan. Beberapa tanaman menyimpan protein yang dibutuhkan untuk pertumbuhan bibit yang berkecambah. Contoh lain

protein pada biji gandum, jagung dan beras. Ovalbumin protein utama ptutih telur, dan kasein protein utama pada susu. Feritin yang ditemukan di beberapa bakteri dan di jaringan tumbuhan dan hewan menyimpan zat besi.

4. Protein Kontraktil atau Motil

Protein kontraktil atau motil adalah protein yang memberikan sel dan organisme memiliki kemampuan untuk berkontraksi, berubah bentuk, atau bergerak. Fungsi aktin dan miosin dalam sistem kontraktil otot rangka dan di banyak sel lainnya. Contoh lain tubulin protein mikrotubul, merupakan komponen penting dari flagella dan silia yang dapat menggerakkan sel.

5. Protein Structural

Protein structural adalah protein berfungsi sebagai filamen pendukung, kabel, atau lembaran untuk memberi struktur, kekuatan, atau perlindungan biologis. Komponen utama tendon dan tulang rawan adalah protein berserat kolagen, yang memiliki kekuatan tarik sangat tinggi. Kulit hampir merupakan kolagen murni. Rambut, kuku dan bulu terdiri dari protein keratin yang keras dan tidak larut. Komponen utama serat sutra dan jaring laba-laba adalah fibroin.

6. Protein Pertahanan

Protein pertahanan adalah protein yang berfungsi melindungi organisme dari serangan oleh spesies lain atau melindunginya dari cedera. Immunoglobulin atau antibodi, protein khusus yang dibuat oleh limfosit vertebrata dapat mengenali dan mengendapkan atau menetralkan bakteri, virus, atau protein asing yang menyerang spesies lain. Fibrinogen dan trombin adalah faktor pembekuan darah yang mencegah kehilangan darah saat sistem vaskular terluka.

7. Protein Pengatur

Protein pengatur adalah protein yang berfungsi membantu mengatur aktivitas seluler atau fisiologis. Contoh: Insulin, hormon yang mengatur metabolisme gula. Protein pengatur lainnya mengikat DNA dan mengatur biosintesis enzim

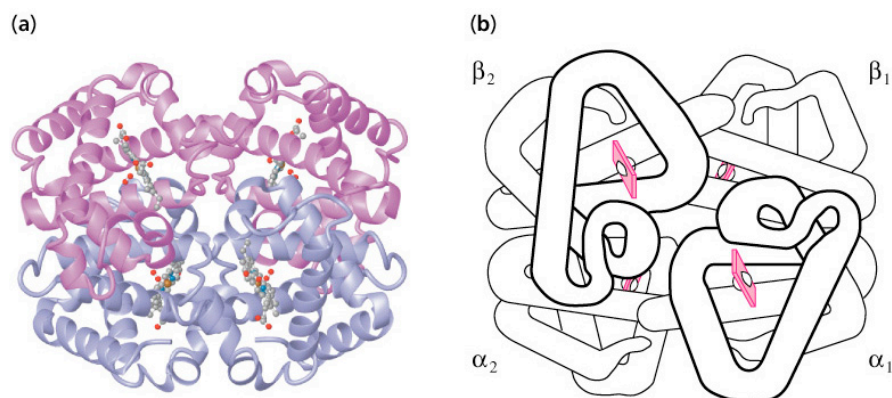
dan molekul RNA, yang terlibat dalam pembelahan sel di prokariota dan eukariota.

Beberapa protein lain ada berfungsi agak eksotis dan tidak mudah diklasifikasikan, misalnya, monellin, protein dari tumbuhan Afrika, memiliki rasa yang sangat manis. Ini sedang dipelajari sebagai pemanis makanan tidak beracun untuk digunakan manusia.

E. Struktur Protein

Protein sederhana terdiri dari ikatan peptide, protein terkonjugasi memiliki struktur yang menggabungkan bagian non protein yang disebut kelompok prostetik. Rantai peptida dari molekul protein tertentu dilipat dengan cara yang sama, dikenal sebagai konformasi rantai. Konformasi rantai unik dari protein tertentu dipengaruhi oleh banyak gaya dan ikatan (jembatan disulfida, ikatan ion, ikatan hidrogen, dan lain-lain).

- Satu rantai polipeptida disebut protein monomer
- Lebih dari satu polipeptida disebut protein multimerik
- Homomultimer - semua satu jenis rantai
- Heteromultimer - dua atau lebih rantai berbeda
- (misalnya, Hemoglobin adalah heterotetramer. Ia memiliki dua rantai alfa dan dua rantai beta).



Gambar 76 Haemoglobin
(Sumber: Nelson & Cox, 2013)

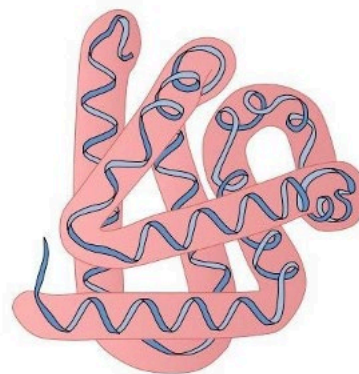
Protein dapat juga digolongkan berdasarkan bentuk, yaitu: *protein globular* dan *protein fibrous (protein serabut)*. Protein globular rantai polipeptida berlipat rapat-rapat menjadi bentuk globular atau bentuk bulat yang padat. Protein globular biasanya larut di dalam sistem larutan (air) dan segera berdifusi; Hampir semua enzim merupakan protein globular, seperti protein transport pada darah, antibodi, dan protein penyimpan nutrient.

Protein serabut bersifat tidak larut dalam air, merupakan molekul serabut panjang, dengan rantai polipeptida yang memanjang pada satu sumbu, dan tidak berlipat menjadi bentuk globular. Hampir semua protein serabut memberikan peranan struktural atau pelindung. Protein serabut yang khas adalah α -keratin pada rambut dan wol, fibroin dari sutra dan kolagen dari urat. Kita dapat juga mengikutsertakan di dalam golongan ini protein filamen yang berpartisipasi dalam proses kontraktile pada sel otot dan sel bukan otot, seperti aktin dan miosin, seperti juga protofilament yang membangun mikrotubul.

Protein Globular dan Serabut.



a. Protein serabut



b. Protein Globular

Gambar 77 Protein Serabut dan Globular

Pada keratin, protein serabut dari rambut, rantai polipeptida disusun di sepanjang satu sumbu. Protein serabut tidak larut di dalam air. Pada protein globular rantai polipeptida melipat secara rapat, protein ini biasanya larut di dalam media cair

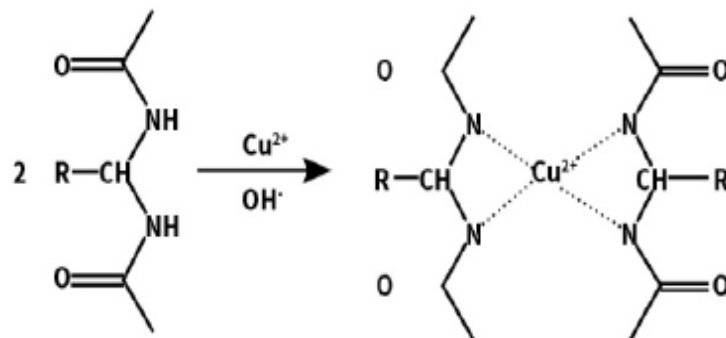
F. Reaksi Protein

Untuk mengetahui reaksi-reaksi pada protein dapat dilakukan dengan beberapa uji, diantaranya yaitu: Uji biuret, uji kelarutan uji koagulasi, dan lain lain.

1. Reaksi Biuret

Reaksi biuret ini dilakukan dengan senyawa-senyawa yang mengandung gugus amida untuk menentukan reaksi yang terjadi. Reaksi uji biuret merupakan uji yang dilakukan untuk mengetahui ikatan peptida, reaksi ini positif (berwarna ungu) untuk zat yang mengandung 2 atau lebih ikatan peptida.

Reaksi Biuret.

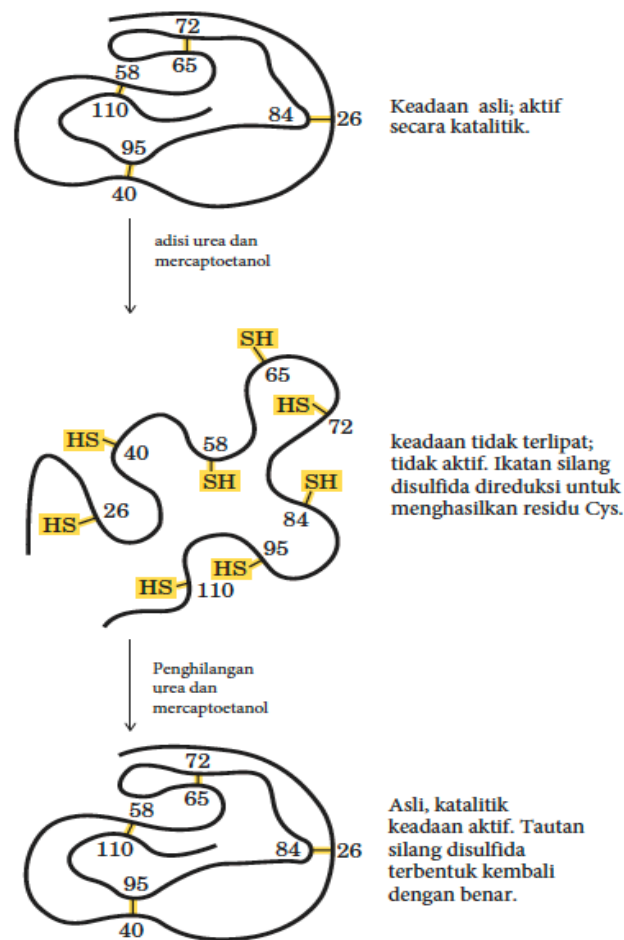


Kompleks berwarna ungu

2. Denaturasi Protein

Kebanyakan protein hanya berfungsi aktif biologis pada daerah pH dan suhu yang optimum. Jika pH dan suhu melewati batas-batas tersebut, protein akan mengalami denaturasi. Proses kembalinya protein ke bentuk asal setelah terjadi denaturasi disebut renaturasi. Untuk pengembalian ini tidak diperlukan bahan kimia, biasanya terjadi karena perubahan pH atau suhu. Denaturasi dan koagulasi adalah dua proses yang terjadi dalam molekul. Kedua proses mengubah keadaan molekul dari keadaan asli ke keadaan berbeda. Denaturasi mengubah sifat asli suatu molekul protein dari keadaan folding menjadi unfolding. Keadaan unfolding ini kehilangan fungsi biologinya. Koagulasi merupakan proses perubahan molekul dari keadaan cair menjadi semi padat atau padat yang terpisah dari pelarut.

Jika suatu larutan protein seperti albumin telur perlahan-lahan dipanaskan hingga kira-kira 60°C sd 70°C, larutan lambat laun menjadi keruh, dan membentuk koagulasi. Setelah putih telur terkoagulasi, oleh panas, produk yang terjadi tidak akan melarut lagi setelah didinginkan. Pemanasan albumin telur telah mengubah sifat-sifatnya secara tidak dapat balik. Protein yang terdenaturasi kehilangan fungsi biologisnya hal ini disebabkan struktur folding protein berubah menjadi struktur non polding. Sedangkan struktur non polding yang terbentuk merubah sifat enzim (protein) menjadi tidak reaktif.



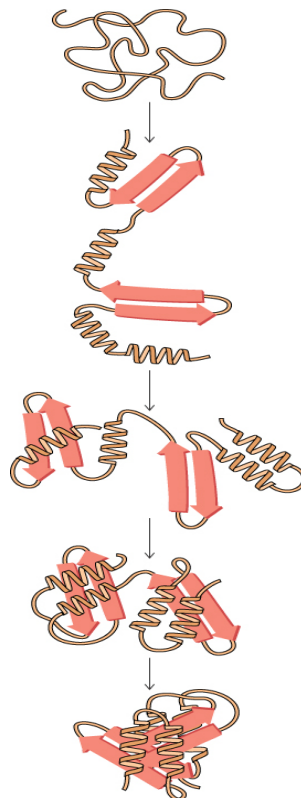
52

Gambar 78 Renaturasi Ribonuklease yang tidak terlipat dan terdenaturasi.
(Sumber: Nelson & Cox, 2013)

Urea digunakan untuk mendenaturasi ribonuclease dan merkaptoetanol ($\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{SH}$) untuk mereduksi, dan dengan demikian memutuskan ikatan disulfida untuk menghasilkan delapan residu Cys. Renaturasi melibatkan pembentukan kembali ikatan silang disulfida yang benar.

3. Folding, unfolding dan misfolding pada protein

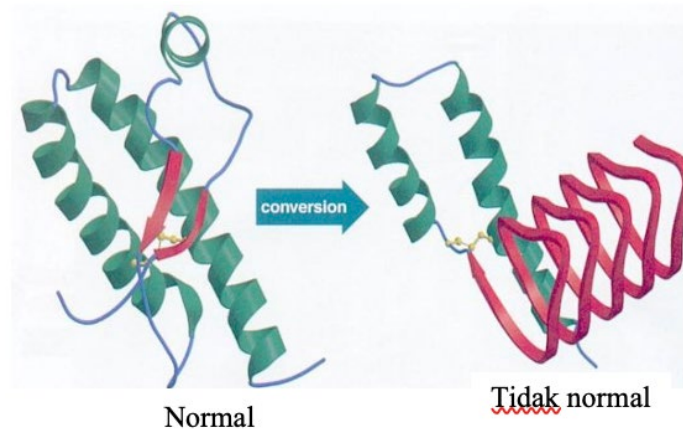
Protein yang dilipat (folding) menjadi konformasi rantai aktif fisiologis normalnya berada dalam keadaan aslinya. Denaturasi protein terjadi ketika protein asli terjadi perubahan struktur, karena pemutusan jembatan disulfida atau gangguan gaya tarik yang lemah. Protein berubah sifatnya dengan panas, pH ekstrim, pelarut organik tertentu seperti alkohol, aseton, zat terlarut tertentu seperti urea, atau dengan paparan protein ke deterjen. Adapun model protein folding dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 79 Pelipatan Protein

Protein misfolding, setidaknya ada beberapa penyakit manusia di mana serat amiloid menumpuk (akibat kesalahan lipatan protein). Penyakit amiloid menyebabkan berbagai gejala klinis yang berbeda, termasuk penyakit Alzheimer. Semua protein yang terlibat dalam penyakit ini mengalami perubahan konformasi ke struktur umum di fibril amyloid. Protein Prion, Protein "salah lipatan" tampaknya menjadi agen penyebab banyak penyakit otak degeneratif langka pada mamalia. Penyakit ini ditimbulkan karena terjadi perubahan struktur protein. Sebagai contoh spongiform encephalopathy (BSE atau penyakit sapi gila) terlihat pada sapi dan ternak dan

penyakit Creutzfeldt-Jakob (CJD) terlihat pada manusia. Anemia Sel Sabit, perubahan asam amino tunggal pada hemoglobin yang berhubungan dengan penyakit. Osteoarthritis perubahan asam amino tunggal pada protein kolagen menyebabkan kerusakan sendi.

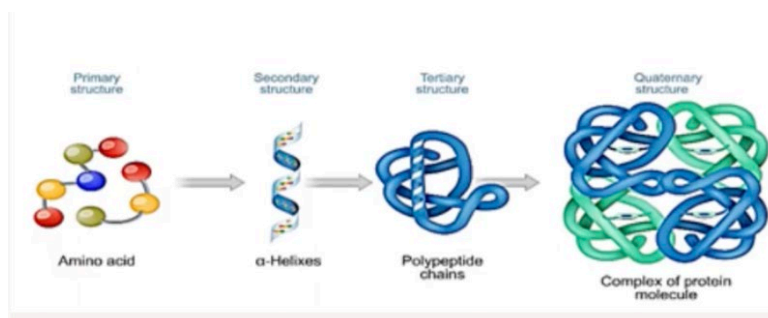


Gambar 80 Protein salah lipatan

Stanley Prusiner dianugerahi Penghargaan Nobel 1997 di bidang Fisiologi atau Kedokteran untuk karyanya tentang "prion", nama yang berasal dari proteinaceous and infectious. Protein prion merupakan partikel infeksi berprotein yang tidak memiliki asam nukleat. Penyakit prion adalah penyakit neurodegeneratif yang fatal, termasuk *bovine spongiform encephalopathy* (BSE), *scrapie* pada domba, dan penyakit *Creutzfeldt-Jakob* (CJD) pada manusia. Penyakit ini dapat muncul sebagai kelainan genetik, infeksi, atau sporadic. Semua modifikasi yang terlibat dari protein prion (PrP), adalah partikel yang dapat ditularkan, tanpa asam nukleat, dan tampaknya hanya terdiri dari protein yang dimodifikasi. Protein prion seluler normal diubah menjadi protein yang dimodifikasi melalui proses pascatranslasi di mana ia memperoleh konten β -sheet yang tinggi. Bentuk larutnya normal kemudian diubah menjadi bentuk yang tidak larut.

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke empat biokimia 1 pada pokok bahasan protein yang telah disajikan, kemudian amatilah bahan pangan mengandung protein yang saudara gunakan sehari-hari. Bahan pangan apa saja mengandung protein yang digunakan di masyarakat di sekitar saudara?

Adapun materi Protein dan reaksinya dapat di lihat pada video berikut ini.



Gambar 81 Protein
Sumber: Sukaryawan dan Sari 2021

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, setelah mengamati bahan pangan disekeliling saudara, bahaslah bersama kelompok saudara tentang Bagaimana kandungan protein pada beberapa bahan pangan tersebut?, Protein apa saja yang terkandung pada bahan pangan tersebut? Kerjakanlah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan.

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang protein. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang jenis protein yang di kandung pada bahan pangan. Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

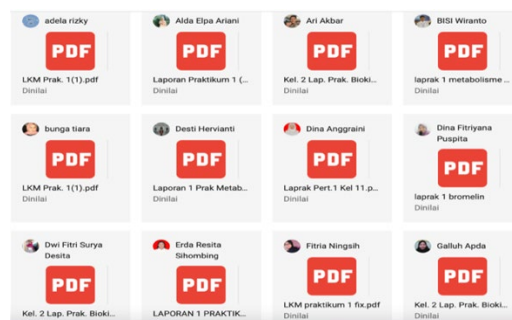
4. APLIKASI

Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang jenis protein yang dikandung pada bahan pangan. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di apload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal berikut ini.

- Berdasarkan pembahasan tersebut saudara buat tabel golongan protein yang saudara bahas.
- Bahaslah beberapa penyakit yang berhubungan dengan masalah protein?
- Bahaslah bagaimana cara mengatasinya?
- Jika protein yang saudara bahas merupakan tetrapeptide yang di susun oleh asam amino Tyr-Hys-Ser-Trp., Tuliskan berapa kemungkinan struktur protein yang terjadi?

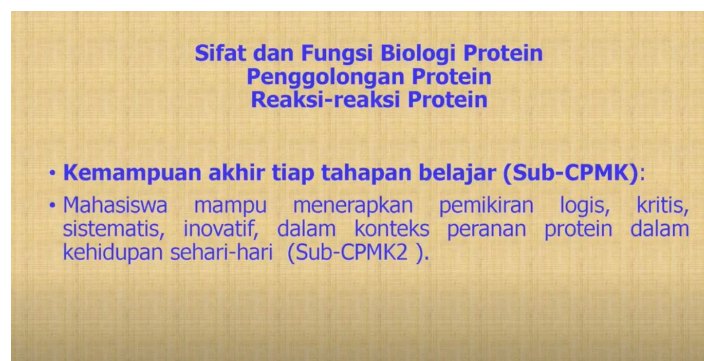
5. REFLEKSI

Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 4 Protein". Selanjutnya laporan tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id> Laporan 4 Protein minimal memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka. Contoh submit laporan 4 Protein.



Gambar 82 Submit Laporan 4 Protein

Materi perkuliahan pokok bahasan protein dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.



Gambar 83 Paparan materi Protein

Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di disubmit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

1. Protein adalah instrument yang mengekspresikan informasi genetik, melalui proses transkripsi dan translasi di dalam sel. Jelaskan dan tuliskan fungsi biologi protein.
2. Jika suatu larutan protein seperti albumin telur perlahan-lahan dipanaskan hingga kira-kira 60°C sd 70°C, larutan lambat laun menjadi keruh, dan membentuk koagulasi. Jelaskan dan tuliskan proses terkoagulasinya protein tersebut.
3. Reaksi biuret ini dilakukan dengan senyawa-senyawa yang mengandung gugus amida untuk menentukan reaksi yang terjadi. Reaksi uji biuret merupakan uji yang dilakukan untuk mengetahui ikatan peptida, reaksi ini positif (berwarna ungu) untuk zat yang mengandung 2 atau lebih ikatan peptida. Jelaskan dan tuliskan analisa kualitatif protein melalui reaksi biuret.
4. Berat molekul Ribonuklease lisin menyusun 10,5% berat ribonuklease. Hitunglah berat molekul minimum ribonuklease. molekul ribonuklease mengandung 10 residu lisin. Hitunglah berat molekul Ribonuklease.
5. Muatan listrik total polipeptida suatu polipeptida yang diisolasi dari otak mempunyai deret Glu-His-Trp-Ser-Tyr-Gly-Leu-Arg-Pro-Gly

Tentukanlah muatan total molekul ini pada pH 3. berapakah muatannya pada pH 5,5? pada pH 8? Pada pH 11? nilai pK' Gugus R Glu, His, Ser, Tyr, dan Arg adalah 4,3,6,0,13,6,10 dan 12,48 berturut turut. Hitunglah PH isoelektrik bagi polipeptida ini.
6. Pepsin cairan lambung (pH \approx 1,5) mempunyai titik isoelektrik kira- kira 1, jauh dibawah protein protein lain. Gugus fungsional manakah yang harus ada dalam jumlah yang relatif sedikit untuk memberikan pepsin titik isoelektrik yang demikian rendah? Asam amino manakah yang dapat memberikan gugus fungsional tersebut.?

7. Titik isoelektik Histon. Histon adalah protein pada inti sel eukaryotik. Molekul ini terikat kuat pada asam deoksiribunokleat (DNA). Yang banyak mengandung gugus fosfat. Titik isoelektrik histon relatif tinggi kira kira 10,8 asam amino manakah yang harus ada dalam jumlah yang relatif besar pada histon? Dengan jalan bagaimana residu ini membuat histon mampu mengikat DNA secara kuat.
8. Kelarutan polipeptida salah satu metode untuk memisahkan polipeptida adalah dengan menggunakan perbedaan kelarutannya. Kelarutan polipeptida dengan berat molekul tinggi di dalam air tergantung pada polaritas relatif gugus R, terutama pada jumlah gugus yang dapat mengion: semakin banyak terdapat gugus mengion, semakin larut peptida yang bersangkutan. Yang mana diantara pasangan polipeptida di bawah ini yang lebih larut pada keadaan yang disebutkan?
- (Gly)₂₀ atau (Glu)₂₀ pada pH 7,0
 - (Lys – Ala)₃ atau (Phe – Met)₃ Pada pH 7,0
 - (Ala – Ser – Gly)₅ atau (Asn – Ser – His)₅ pada pH 9,0
 - (Ala – Asp – Gly)₅ atau (Asn – Ser – His)₅ pada pH 3,0

DAFTAR PUSTAKA

1. Al-Mossawi, A.H., Al-Garawi, Z.S. 2018. *Qualitative tests of amino acids and proteins and enzyme kinetics*. Baghdad: Mustansiriyah University.
2. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
3. Ramus, V. 2020. *Qualitative Tests for Proteins*. <https://www.youtube.com/watch?v=6YPWipP-Qe8&feature=youtu.be> (diakses pada tanggal 15 Oktober 2020).
4. Subroto, E., dkk. 2020. The Analysis Techniques Of Amino Acid And Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
5. Sukaryawan, M. 2004. *Biokimia*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri
6. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
7. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
8. Thenawidjaja, M. 1990. *Dasar-dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
9. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
10. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
11. Won Chan Kim. *Principles of Biochemistry*. <https://www.kaznaru.edu.kz> . diakses pada tanggal 25 september 2020.

4.2 PEMISAHAN DAN PEMURNIAN PROTEIN

1. ORIENTASI

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa menguasai pondasi saintifik materi biokimia (CPMK3), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah mahasiswa menguasai pondasi saintifik materi protein (Sub-CPMK3). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

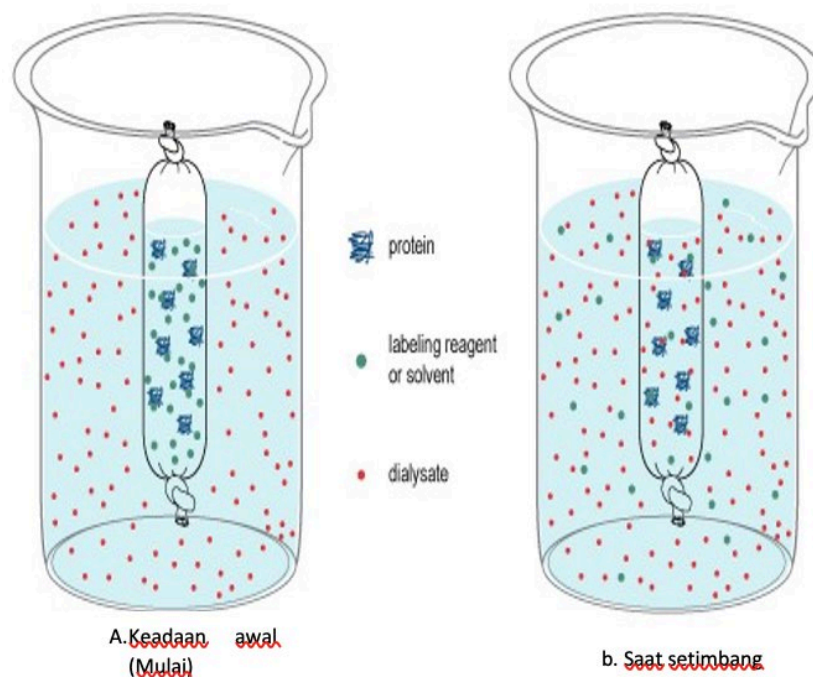
Sel mengandung ratusan, jika tidak ribuan berbagai jenis protein karena sangat penting sekali memperoleh preparat murni protein tertentu. Sebelum dapat menentukan komposisi dan deret asam amino enzim dapat dipisahkan dari ratusan jenis protein lain didalam sel atau ekstrak jaringan tertentu dan dimurnikan. Pertama protein dapat dipisahkan dari senyawa dengan berat molekul yang ada didalam ekstrak sel atau jaringan dengan proses dialisis. Setelah campuran protein dibebaskan dari molekul kecil oleh dialisis, protein dapat dipisahkan bergantung pada perbedaan sifat fisik dan kimia.

- Pemisahan berdasarkan muatan
- Ukuran
- Afinitas untuk ligan
- Kelarutan
- Hidrofobisitas
- Stabilitas termal

A. Dialisis

Protein dapat dipisahkan dari senyawa berdasarkan berat molekul yang ada di dalam ekstrak sel atau jaringan dengan proses dialisis. Molekul besar seperti protein ditahan di dalam kantong terbuat dari senyawa berpori amat halus, seperti selopan. Jadi, jika kantong yang mengandung ekstrak sel atau jaringan dimasukkan ke dalam

air, molekul kecil di dalam ekstrak jaringan, seperti garam, akan melalui pori-pori, tetapi protein dengan berat molekul tinggi akan tertahan di dalam kantong.



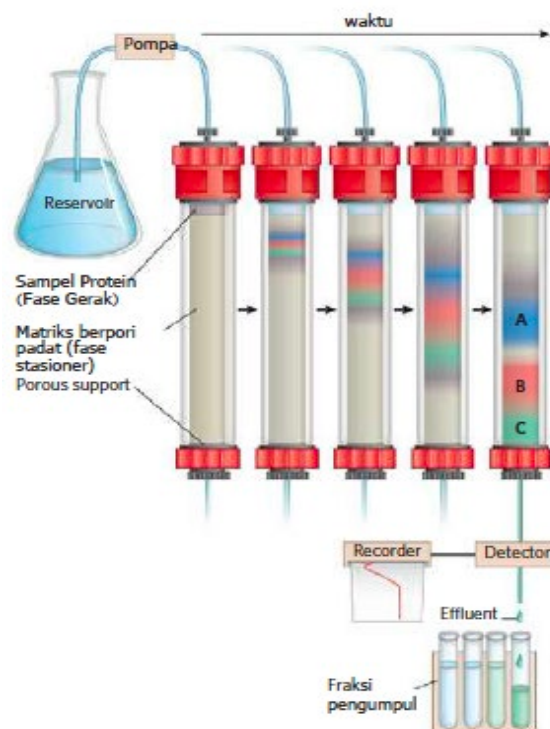
Gambar 84 Dialisis

Sumber : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2c/Dialysis_Figure.png

B. Kromatografi Kolom

Kromatografi kolom adalah metode yang digunakan untuk memurnikan bahan kimia tunggal dari campurannya. Metode ini sering digunakan untuk aplikasi preparasi pada skala mikrogram hingga kilogram. Keuntungan utama kromatografi kolom adalah biaya yang rendah dan kemudahan membuang fasa diam yang telah digunakan. Kemudahan pembuangan fasa diam ini mencegah kontaminasi silang dan degradasi fasa diam akibat pemakaian ulang atau daur ulang. Kromatografi kolom preparatif klasik berupa tabung kaca dengan diameter antara 5 mm hingga 50 mm dengan panjang 5 cm hingga 1 m dengan keran dan pengisi (dengan sumbat kaca atau serat kaca untuk mencegah hilangnya fasa diam) pada bagian bawah. Dua metode yang umum digunakan untuk preparasi kolom adalah: metode kering dan metode basah. Pada metode kering, kolom pertama kali diisi dengan serbuk kering fasa diam, kemudian kolom dialiri fasa gerak hingga seluruh kolom terbasahi. Mulai titik ini, fasa diam tidak diperkenankan mengering. Pada metode

basah, fasa diam dibasahi dengan fase gerak hingga menjadi bubur di luar kolom, dan kemudian dituangkan perlahan-lahan ke dalam kolom. Pencampuran dan penuangan harus ekstra hati-hati untuk mencegah munculnya gelembung udara. Larutan bahan organik diletakkan di bagian atas fasa diam menggunakan pipet. Lapisan ini biasanya ditutup dengan lapisan kecil pasir atau katun atau wol kaca untuk melindungi bentuk lapisan organik dari tuangan eluen. Eluen kemudian dialirkan perlahan melalui kolom sambil membawa sampel bahan organik. Sering kali, wadah eluen sferis atau corong pisah bersumbat yang sudah diisi eluen diletakkan di bagian atas kolom.



Gambar 85 Kromatografi Kolom

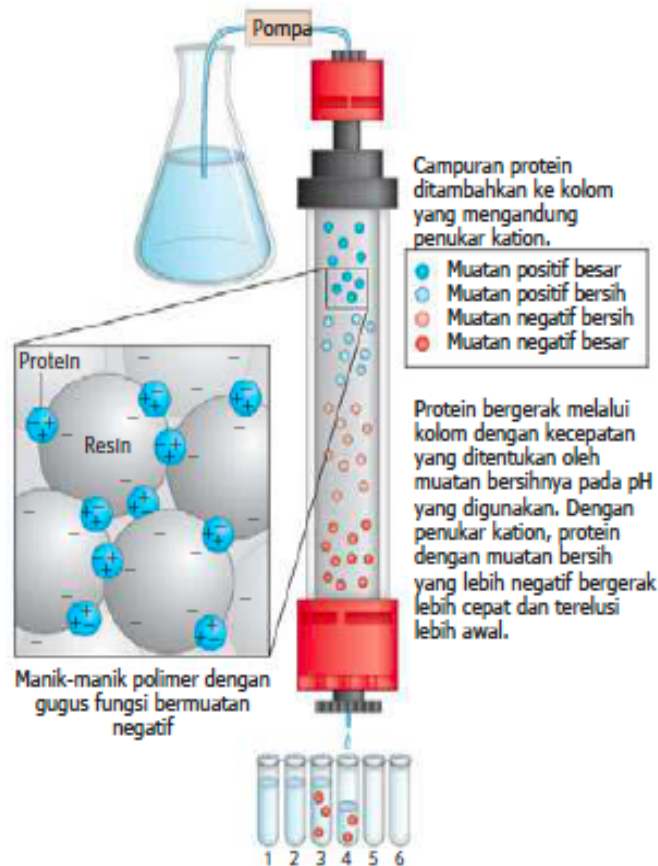
Komponen-komponen tunggal tertahan oleh fasa diam secara berbeda satu sama lain pada saat mereka bergerak bersama eluen dengan laju yang berbeda melalui kolom. Di akhir kolom, mereka terelusi satu per satu. Selama keseluruhan proses kromatografi, eluen dikumpulkan sesuai fraksi-fraksinya. Fraksi-fraksi dapat dikumpulkan secara otomatis oleh pengumpul fraksi. Produktivitas kromatografi dapat ditingkatkan dengan menjalankan beberapa kolom sekaligus. Di sini, diperlukan pengumpul multi aliran. Komposisi aliran eluen dapat dimonitor dan masing-masing fraksi dianalisis senyawa terlarutnya, misalnya dengan

kromatografi, absorpsi sinar UV atau Fluoresensi. Senyawa berwarna (atau senyawa berfluoresensi di bawah lampu UV) dapat terlihat di dalam kolom sebagai pita-pita bergerak.

C. Kromatografi Pertukaran ion

Kromatografi pertukaran ion merupakan metoda paling banyak yang di pergunakan untuk memisahkan, mengidentifikasi, dan menghitung jumlah tiap-tiap asam amino di dalam suatu campuran. Metode ini juga memanfaatkan perbedaan dalam tingkah laku asam-basa dari asam amino, tetapi terdapat faktor tambahan yang menyebabkan prosedur ini efektif. Kolom kromatografi terdiri dari tabung panjang yang diisi oleh granula resin sintetik yang mengandung gugus bermuatan tetap. Resin dengan gugus anion tersebut disebut resin penukar kation, resin dengan gugus kation disebut gugus penukar anion. Dalam bentuk kromatografi penukar ion yang paling sederhana, asam amino dapat dipisahkan pada kolom resin penukar kation. Dalam hal ini gugus anion terikatnya, misal gugus asam sulfonat ($-\text{SO}_3^-$), pertama-tama diberikan bermuatan dengan Na^+ . Larutan asam (pH 3,0) dari campuran asam amino yang akan dianalisa dituang kedalam kolom dan dibiarkan tersaring secara perlahan-lahan. Pada pH 3,0 sebagian besar asam amino berbentuk kation dengan muatan total positif, tetapi senyawa-senyawa ini berbeda didalam tingkat megiionnya. Pada saat campuran mengalir melalui kolom, asam amino bermuatan positif akan menukar ion Na^+ , yang berikatan dengan gugus $-\text{SO}_3^-$ pada partikel resin, pada pH 3,0, asam amino yang bermuatan paling positif (lisin, arginin dan histidin) akan menukar Na^+ , pertama-tama dari resin, yang lalu akan terikat paling kuat pada resin, asam amino yang pada pH 3,0 bermuatan positif paling kecil (asam glutamat dan aspartate) akan terikat paling lemah. Semua asam amino yang lain akan mempunyai muatan positif bawah kolom resin pada kecepatan yang berbeda, yang tergantung terutama pada nilai pK' , selain itu juga bergantung pada adsorpsi atau kelarutannya di dalam partikel resin. Asam glutamate dan aspartat akan bergerak kebawah kolom pada kecepatan paling tinggi, karena ikatan senyawa senyawa ini dengan resin paling lemah pada pH 3,0. Sedangkan lisin, arginin, dan histidin akan bergerak paling lambat. Fraksi-fraksi kecil pada

beberapa milliliter, masing – masing dikumpulkan dari bagian bawah kolom dan dianalisa secara kuantitatif. Seluruh prosedur ini telah diotomasi, sehingga pencucian, pengumpulan asam amino.



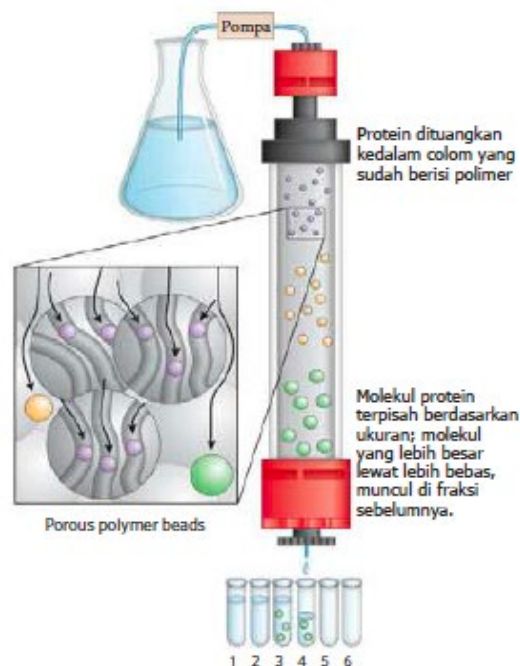
Gambar 86 Kromatografi penukar Ion
(Sumber: Nelson & Cox, 2013)

D. Gel Filtrasi

Gel filtrasi merupakan pemisahan protein berdasarkan ukuran molekulnya. Perangkat otomatis memanfaatkan sejumlah kecil peptida yang berukuran besar (30 sampai 100 residu). Walaupun demikian, banyak polipeptida berbobot molekul tinggi yang telah mengalami denaturasi mungkin tidak bisa larut karena selama denaturasi terpapar pada residu hidrofobik yang sebelumnya masih terpendam. Meskipun ketidaklarutan dapat diatasi dengan pemberian urea, alkohol, asam atau basa organik, keadaan ini membatasi penggunaan selanjutnya teknik pertukaran ion

untuk permurnian peptida. Namun, filtrasi gel terhadap peptida hidrofobik yang besar dapat dilakukan dalam asam asetat atau asam format 1-4 molar.

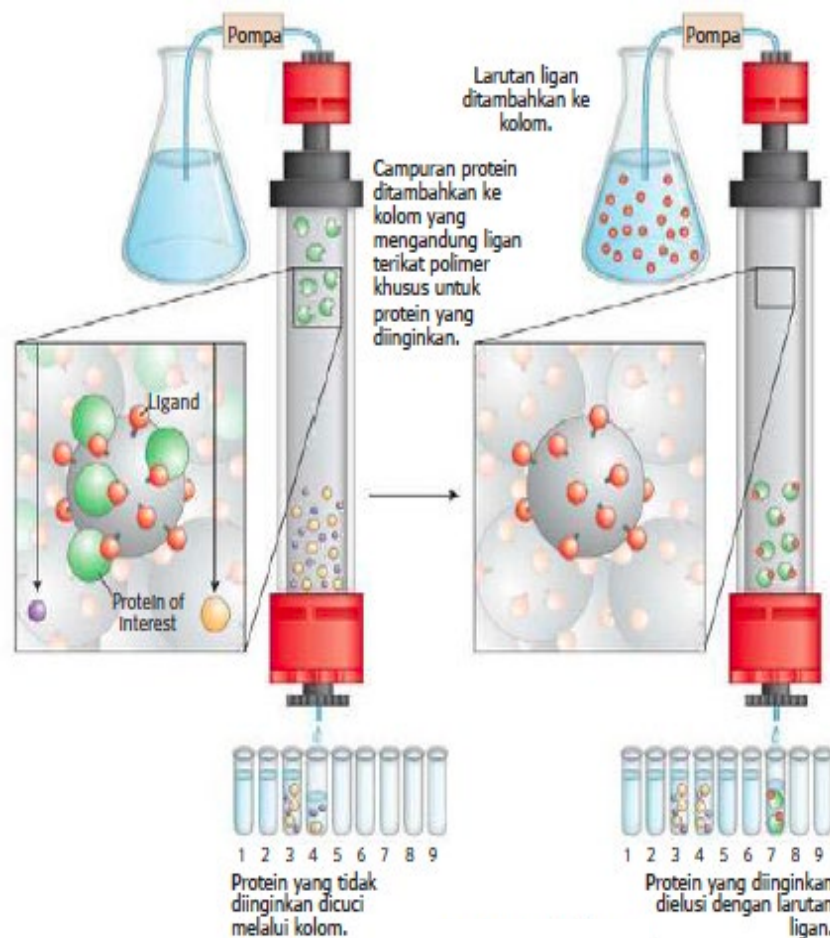
Pada prosedur yang merupakan suatu bentuk kromatografi, larutan yang mengandung campuran protein dialirkan kedalam kolom yang mengandung butiran berpori yang amat kecil, terbuat dari polimer berhidrat tinggi. Molekul protein yang lebih kecil dapat menembus kedalam pori-pori butiran, dan karenanya tertahan selama aliran kebawah kolom, tetapi molekul protein besar tidak dapat menembus kedalam butiran dan melewati kolom dengan lebih cepat. Protein berukuran menengah akan mengalir kebawah pada kecepatan antara, tergantung kepada tingkat kemampuan menembus butiran. Kolom filtrasi gel seperti ini juga dinamakan Saringan Molekuler.



Gambar 87 Kromatografi berdasarkan ukuran
(Sumber: Nelson & Cox, 2013)

E. Kromatografi Afinitas

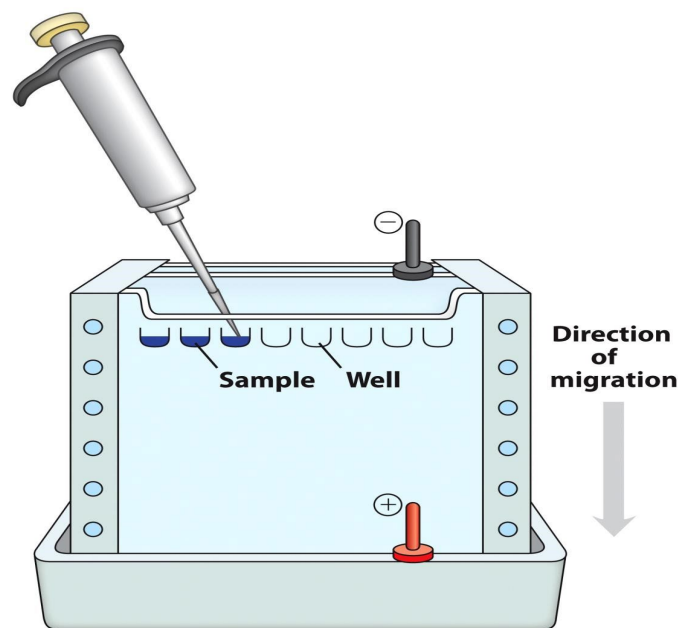
Kromatografi afinitas adalah metode pemisahan campuran protein berdasarkan interaksinya, misalnya antara antigen dan anti bodi, enzim dan substrat, atau reseptor dan ligan. Fasa diam biasanya adalah suatu matriks gel, yang banyak digunakan adalah agarosa. Umumnya, titik awalnya adalah larutan gugus molekul heterogen yang tidak diketahui, seperti sel lisat, medium pertumbuhan atau serum darah. Molekul yang dikehendaki memiliki sifat yang sudah diketahui dan dapat dieksploitasi selama proses afinitas pemurnian. Molekul target akan terikat pada fasa diam, sedangkan molekul lainnya dalam fasa gerak tidak akan terikat. Fasa diam kemudian dipisahkan dari campuran, di cuci dan molekul sasaran dibebaskan dari ikatan melalui proses elusi. Kromatografi afinitas paling banyak digunakan untuk pemurnian protein rekombinan.



Gambar 88 Kromatografi Afinitas
(Sumber: Nelson & Cox, 2013)

F. Elektroforesis

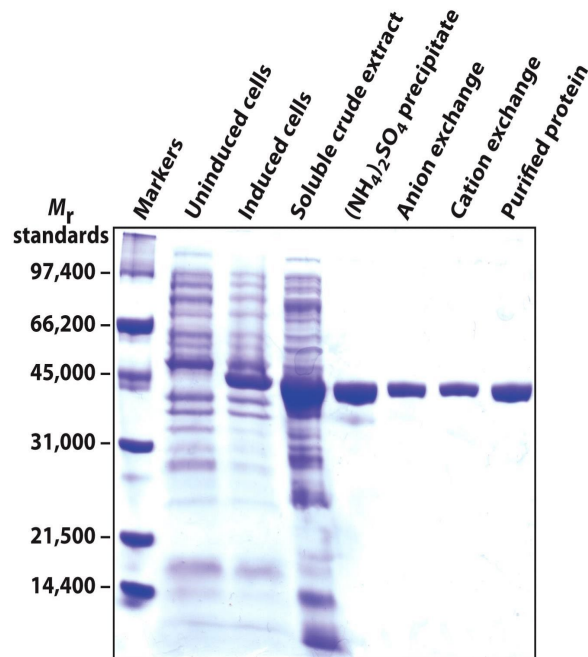
Protein dapat juga dipisahkan satu dari yang lain oleh elektroforesis berdasarkan tanda dan jumlah muatan listrik pada gugus R dan gugus terminal asam amino dan terminal karboksil yang bermuatan. Seperti peptida sederhana, rantai polipeptida protein mempunyai titik isoelektrik yang khas, yang akan mencerminkan jumlah relatif gugus R asam dan basa. Kecepatan migrasi protein dalam medan listrik tergantung pada kekuatan medan listrik, muatan protein, dan koefisien gesekan.



Gambar 89 Elektroforesis

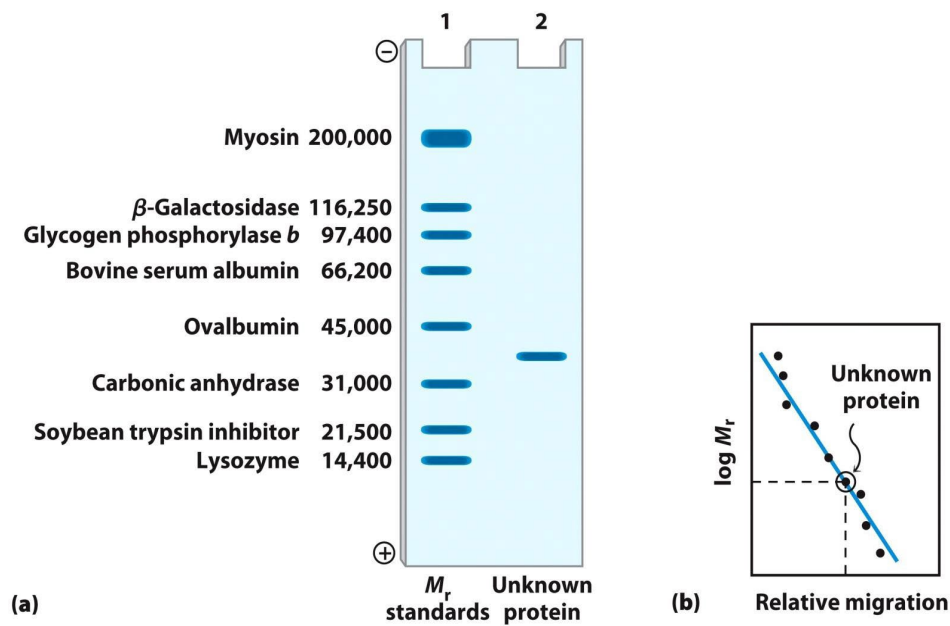
G. SDS-PAGE

SDS-PAGE atau Elektroforesis gel Poliakrilamida Sodium Dodesil Sulfat adalah merupakan teknik elektroforesis gel yang menggunakan poliakrilamida memisahkan protein yang bermuatan berdasarkan berat molekulnya saja. Sodium Dodesil Sulfat (SDS) merupakan deterjen ionik yang dapat melarutkan molekul hidrofobik yang memberikan muatan negatif pada keseluruhan struktur protein. Cara kerja SDS-PAGE adalah dengan menghambat interaksi hidrofobik dan merusak ikatan hidrogen.



Gambar 63 SDS-PAGE

Metode ini diawali dengan preparasi sampel untuk membuat sampel bermuatan sama sehingga muatan tidak memengaruhi pergerakan komponen sampel dalam gel. Preparasi dilakukan dengan cara mendenaturasi protein menggunakan SDS dan memutus ikatan disulfida pada struktur protein menggunakan beta-merkaptoetanol, bila perlu denaturasi didukung dengan memanaskan sampel. Selanjutnya gel poliakrilamida dibuat menggunakan cetakan gel membentuk lembaran segi empat dengan ketebalan tertentu. Setelah sampel dimasukkan dalam sumur gel, gel dialiri arus listrik, sehingga komponen yang terdapat dalam sampel akan terpisah melewati matriks gel berdasarkan berat molekulnya. Untuk melihat pita komponen yang terbentuk, gel perlu diwarnai dengan pewarna khusus. Beberapa pewarna yang dapat digunakan dalam SDS-PAGE adalah *Commasie Brilliat Blue* dan *Silver Salt Staining*. *Commasie Brilliat Blue* mengikat protein secara spesifik dengan ikatan kovalen. *Silver Salt Staining* memiliki sifat lebih sensitif dan akurat namun membutuhkan proses yang lebih lama. SDS-PAGE dapat digunakan untuk menghitung berat molekul protein

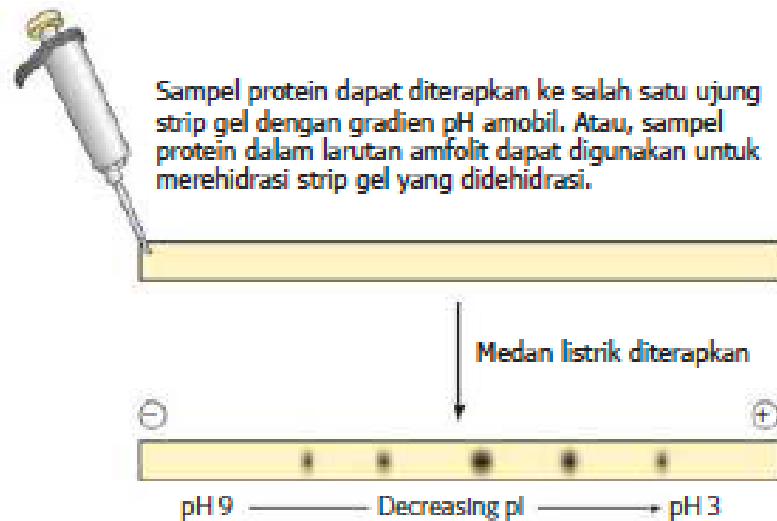


Gambar 90 Penentuan M_r Protein

Menaksir berat molekul protein, mobilitas elektroforesis protein pada gel poliakrilamida SDS terkait dengan berat molekulnya (M_r). (a) Protein standar dengan berat molekul yang diketahui dilakukan elektroforesis (jalur 1). Protein penanda ini dapat digunakan untuk memperkirakan berat molekul protein yang tidak diketahui (jalur 2). (b) Plot $\log M_r$ dari protein penanda versus migrasi relatif.

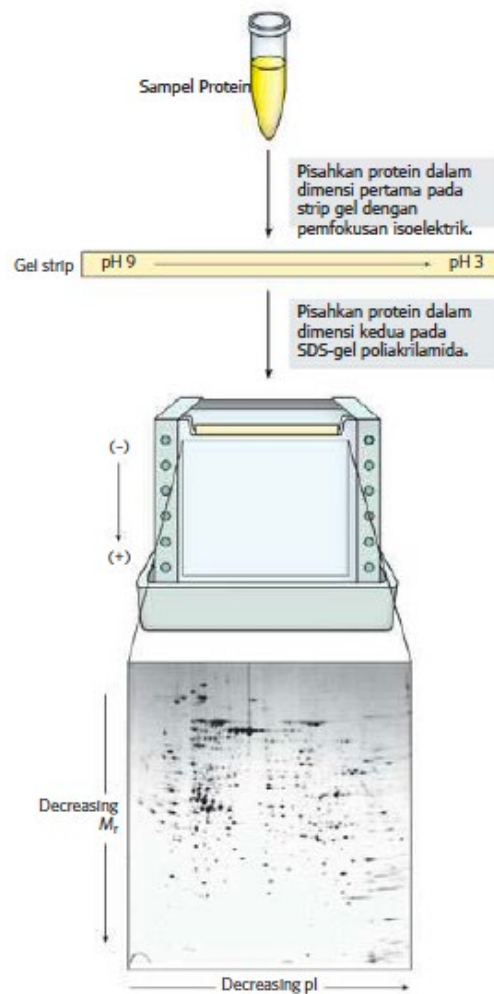
h. Pemfokusan isoelektrik.

Teknik ini memisahkan protein menurut titik isoelektriknya. Campuran protein ditempatkan pada strip gel yang mengandung gradien pH amobil. Dengan medan listrik yang diterapkan, protein memasuki gel dan bermigrasi sampai masing-masing mencapai pH yang setara dengan pI-nya. Ingatlah bahwa ketika pH 5 pI, muatan bersih protein adalah nol.



Setelah pewarnaan, protein terlihat terdistribusi sepanjang gradien pH sesuai dengan nilai pI-nya.

Gambar 91 Pemfokusan isoelektrik



Gambar 92 Elektroforesis dua Dimensi

i. Elektroforesis dua dimensi (2-DE atau elektroforesis 2-D)

Elektroforesis dua dimensi adalah suatu teknik analisis protein dengan melakukan pemisahan protein menggunakan dua dimensi. Teknik ini sering digunakan untuk studi proteomika (analisis molekular terhadap keseluruhan protein yang dihasilkan dari ekspresi gen dalam sel), deteksi marker penyakit, penelitian kanker dan obat, pemeriksaan kemurnian, dan juga purifikasi (pemurnian) protein skala mikro. Hal ini dikarenakan, elektroforesis 2-D mampu memisahkan hingga ribuan protein secara bersamaan.

Dalam elektroforesis 2-D, dimensi pertama dalam pemisahan protein dilakukan berdasarkan titik isoelektrik protein tersebut. Sedangkan, pada dimensi kedua, protein akan dipisahkan berdasarkan berat molekulnya. Pemisahan protein dengan teknik ini dilakukan dalam kondisi terdenaturasi. Pada dimensi pertama, protein yang akan dianalisis dilarutkan dalam urea untuk memutuskan ikatan hydrogen pada protein (agen pendenaturasi). Urea umum digunakan karena senyawa ini tidak mengubah dalam muatan protein sehingga pemisahan protein dapat dilakukan berdasarkan muatannya. Dengan menggunakan medan listrik protein dipisahkan melalui gel yang memiliki gradien pH. Protein akan bergerak hingga berhenti pada titik (pH) dimana muatan protein tersebut netral (titik isoelektriknya).

Setelah melalui dimensi pertama, protein dipisahkan kembali melalui dimensi kedua. Biasanya tahap ini dilakukan dengan gel poliakrilamida dan sodium dodesil sulfat (SDS). SDS akan membuat seluruh protein bermuatan negatif sehingga pemisahan bisa dilakukan hanya berdasarkan bobot molekulnya. Teknik elektroforesis 2-D yang sering digunakan adalah: untuk dimensi pertama dapat menggunakan elektroforesis pemfokusan isoelektrik (*isoelectric focusing*, IEF) dan *nonequilibrium pH gradient electrophoresis* (NEPHGE). Sedangkan untuk dimensi kedua, biasanya digunakan *elektroforesis gel poliakrilamida SDS* (SDS-PAGE).

Deteksi Spektroskopi Asam Amino Aromatik.

Asam amino aromatik menyerap cahaya di daerah UV, protein biasanya memiliki serapan UV maksimal sekitar 275–280 nm. Triptofan dan tirosin adalah kromofor terkuat. Konsentrasi dapat ditentukan dengan spektrofotometri UV-tampak menggunakan hukum Beers: $A = \epsilon \cdot c \cdot l$

J. Penentuan urutan asam amino dalam protein

Pada tahun 1953, Frederick Sanger menghasilkan penemuan deret asam amino pada rantai polipeptida hormon insulin. Penemuan Sanger yang terjadi bersama-sama dengan dikemukakannya teori Watson dan Crick tentang replikasi DNA berimplikasi bahwa deret nukleotida DNA dan deret asam amino berhubungan satu dengan yang lainnya. Deret asam amino rantai polipeptida ditentukan oleh prinsip-prinsip yang awalnya dikembangkan oleh Sanger. Terdapat enam tahap dasar dalam memecahkan deret asam amino setiap polipeptida.

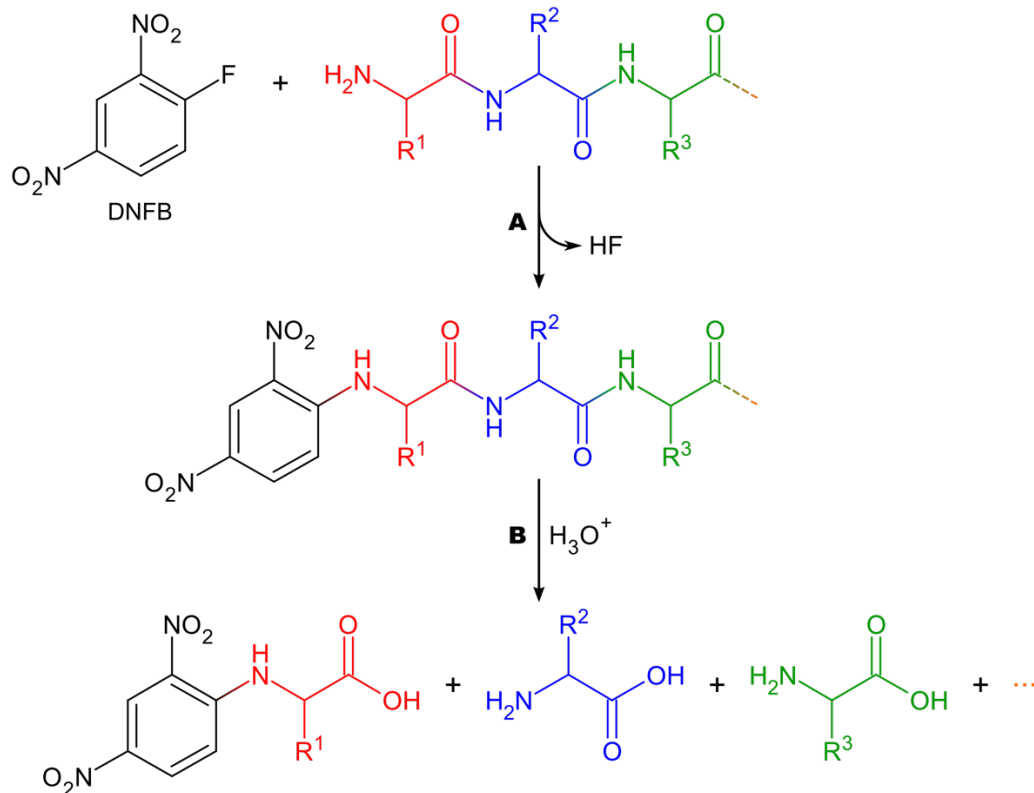
Tahap I : Penentuan Komposisi Asam Amino.

Semua ikatan peptida dihidrolisis dari polipeptida murni. Campuran asam amino yang terbentuk dianalisis dengan khromatografi pertukaran ion untuk menentukan asam amino mana yang ada dan jumlah relatif masing-masing.

Tahap II : Identifikasi Residu Terminal Amino dan Karboksil.

Dengan mengidentifikasi residu terminal amino dan karboksil, kita dapat menentukan 2 titik acuan penting dalam deret asam amino.

Reaksi 1fluoro-2,4-dinitrobenzena.



Untuk mengidentifikasi residu terminal karboksil, polipeptida diinkubasi dengan enzim karboksipeptidase yang menghidrolisis ikatan peptida pada ujung terminal karboksil. Sedangkan untuk mengidentifikasi residu terminal amino Sanger menggunakan pereaksi 1fluoro-2,4-dinitrobenzena yang dapat mencirikan residu terminal-amino dari rantai polipeptida sebagai turunan 2,4-dinitrofenil (DNP) berwarna kuning.

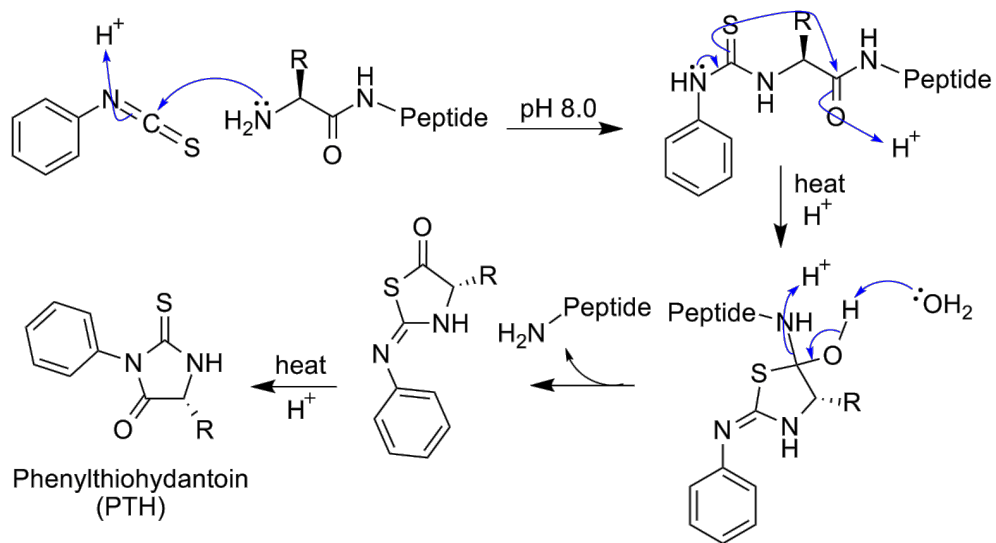
Tahap III : Pemotongan Rantai Polipeptida.

Untuk memisahkan fragmen-fragmen peptida umumnya digunakan metode hidrolisis enzimatik dengan enzim tripsin. Enzim ini hanya mengkatalisa hidrolisis ikatan peptida dengan gugus karboksil yang ada pada residu lisin atau arginin tanpa memandang panjang deret asam amino. Suatu polipeptida dengan 5 lisin dan atau arginin biasanya akan menghasilkan enam peptida yang lebih kecil. Semua peptida (kecuali satu) akan mengandung residu lisin atau arginin pada posisi terminal karboksil. Fragmen yang dihasilkan kemudian dipisahkan dengan khromatografi pertukaran ion pada kolom tertentu sehingga menghasilkan map peptida.

Tahap IV : Identifikasi Deret Fragmen Peptida.

Tahap ini menggunakan prosedur degradasi Edman untuk mencirikan dan mengeluarkan hanya residu terminal-amino dari peptida dan membiarkan semua ikatan peptida yang lain tetap utuh. Residu hasil reaksi sebelumnya dicirikan (dilabel) dengan mengulang rangkaian reaksi yang sama.

Reaksi degradasi Edman.



Tahap V : Pemotongan Rantai Polipeptida Semula dengan Prosedur Kedua.

Sama seperti tahap III, tetapi dengan metode enzim yang lain sehingga menghasilkan fragmen-fragmen kecil lainnya yang berbeda dari hasil fragmen asam amino pada pemotongan tahap sebelumnya.

Tahap VI: Menyusun Fragmen Peptida.

Penetapan Bagian Yang Saling Tumpang Tindih Deret asam amino pada tiap fragmen yang diperoleh dari polipeptida awal dengan kedua prosedur pemotongan dianalisis untuk menemukan bagian yang saling tumpang tindih dengan fragmen yang diperoleh dengan prosedur pemotongan pertama.

Penentuan urutan asam amino dari suatu protein dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Direaksikan dengan *dansil klorida* menghasilkan residu asam amino Fhe
2. Direaksikan dengan *Karboksi peptidase* menghasilkan residu asam amino Ala
3. Direaksikan dengan pereaksi *Enzim* menghasilkan fragmen asam amino sbb:
4. Tripsin
 - a. Gly-Phe-Phe-Tyr-Thr-Pro-Lys
 - b. Leu-Val-Glu-Ala-Leu-Tyr-Leu-Val-Cys-Gly-Glu-Arg
 - c. Phe-Val-Asn-Gln-Hys-Leu-Cys-Gly-Ser-Lys
 - d. Ala
5. Khimotripsin
 - a. 2Phe
 - b. Leu-Val-Cys-Gly-Glu-Arg-Gly-Fhe
 - c. Val-Asn-Gln-Hys-Leu-Cys-Gly-Ser-Lys-Leu-Val-Glu-Ala-Leu-Tyr
 - d. Thr-Pro-Lys-Ala
 - e. Tyr

Ujung terminal Amino : Fhe

Ujung terminal Karboksil : Ala

FRagmen tumpang tindih:

Thr-Pro-Lys-Ala

Gly-Fhe Fhe-Tyr-Thr-Pro-Lys

Leu-Val-Cys-Gly-Glu-Arg-Gly-Fhe

Leu-Val-Glu-Ala-Leu-Tyr-Leu-Val-Cys-Gly-Glu-Arg

Val-Asn-Gln-Hys-Leu-Cys-Gly-Ser-Lys-Leu-Val-Glu-Ala-Leu-Tyr

Phe-Val-Asn-Gln-Hys-Leu-Cys-Gly-Ser-Lys

Jadi urutan peptidanya:

Fhe-Val-Asn-Gln-Hys-Leu-Cys-Gly-Ser-Lys-Leu-Val-Glu-Ala-Leu-Tyr-Leu-Val-Cys-Gly-Glu-Arg-Gly-Fhe-Fhe-Tyr-Thr-Pro-Lys-Ala.

Materi Pemisahan dan Pemurnian Protein di lihat pada video berikut ini.



Gambar 93 Pemurnian dan Pemisahan Protein
Sumber: Sukaryawan dan Sari, 2021

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke lima biokimia 1 pada pokok bahasan pemisahan dan pemurnian protein yang telah disajikan, bagaimana teknik memisahkan protein dan memurnikan protein dari sampel?

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, kemudian amatilah bahan pangan disekeliling saudara, bahaslah bersama kelompok saudara tentang bagaimana teknik pemurnian dan pemisahan protein? Kerjakanlah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan.

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang teknik pemisahan dan pemurnian protein. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang teknik pemisahan dan pemurnian protein pada sampel. Pilihlah teknik yang saudara pahami dan bahaslah bersama dengan kelompok saudara. Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

4. APLIKASI

Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang teknik pemisahan dan pemurnian protein. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai

operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di upload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal berikut ini.

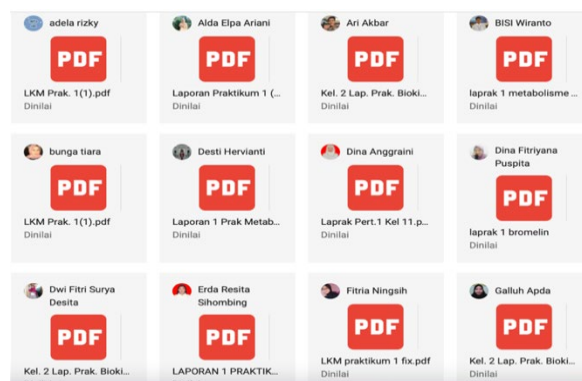
- a. Berdasarkan proyek tersebut saudara buat tabel teknik pemisahan protein yang saudara bahas.terhadap protein yang dihasilkan.
- b. Penentuan urutan asam amino dari suatu protein dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:
 1. Direaksikan dengan *dansil klorida* menghasilkan residu asam amino Asn
 2. Direaksikan dengan *Karboksi peptidase* menghasilkan residu asam amino Cys
 3. Direaksikan dengan pereaksi *Edman* menghasilkan fragmen asam amino sbb:
 1. Lys-His-Ile-Val-Ala-Cys
 2. lys-Tyr-Pro-Asn
 3. Cys-Ala-Tyr-Lys-Thr-Thr-Gln-Ala-Asn
 4. Thr-Met-Ser-Ile-Thr-Asp-Cys-Arg
 5. Asn-Cys-Tyr-Gln-Ser-Tyr-Ser
 6. Glu-Thr-Gly-Ser-Ser
 4. Direkasikan dengan Enzim *Trypsin* menghasilkan fragmen sbb:
 1. Thr-Thr-Gln-Ala-Asn-Lys
 2. Glu-Thr-Gly-Ser-Ser-lys
 3. Glu-Thr-Gly-Ser-Ser-lys
 4. His-Ile-Val-Ala-Cys
 5. Cys-Tyr-Gln-Ser-Tyr-Ser-Thr-Met-Ser-Ile-Thr-Asp-Cys-Arg
 6. Tyr-Pro-Asn-Cys-Ala-Tyr-Lys

Tentukanlah urutan Asam amino pada protein tersebut.

5. Refleksi

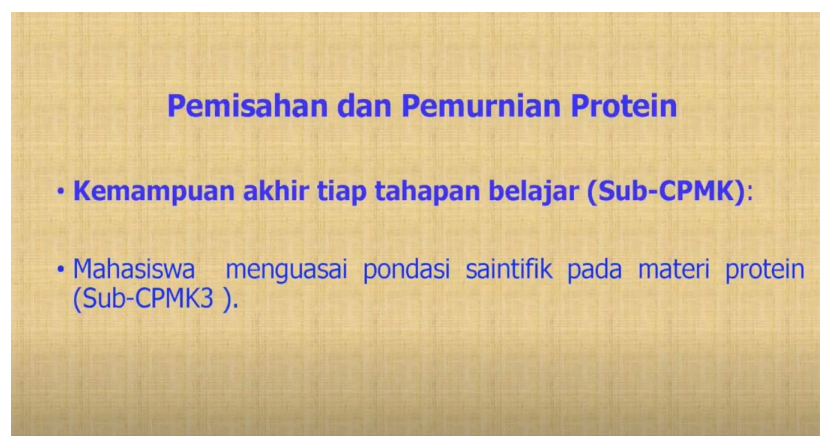
Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 5 Teknik Pemisahan dan Pemurnian Protein". Selanjutnya laporan tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id>. Laporan 5 Teknik Pemisahan dan Pemurnian Protein minimal memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka.

Contoh submit laporan 5 Pemurnian dan Pemisahan Protein



Gambar 94 Submit Laporan 5 Pemurnian dan Pemisahan Protein

Materi perkuliahan pokok bahasan Pemurnian dan Pemisahan Protein dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.



Gambar 95 Paparan materi Pemurnian dan Pemisahan Protein

Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di submit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

1. Semua protein di dalam makhluk hidup dibangun oleh susunan dasar yang sama, yaitu 20 jenis asam amino baku. Walaupun demikian Protein setiap organisme berbeda-beda karena masing-masing mempunyai deret unit asam aminonya sendiri-sendiri, tergantung dari gen masing-masing organisme tersebut. Jelaskanlah mengapa protein penyusun makhluk hidup berbeda-beda walaupun disusun oleh 20 jenis asam amino yang sama?
2. Tuliskan dan jelaskan berapa kemungkinan struktur yang terjadi apabila protein di susun oleh asam amino Tyr-Hys-Ser-Trp-Gly?
3. Penentuan urutan asam amino dari suatu protein dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:
 - i. Direaksikan dengan *dansil klorida* menghasilkan residu asam amino Asn
 - ii. Direaksikan dengan *Karboksi peptidase* menghasilkan residu asam amino Cys
 - iii. Direaksikan dengan pereaksi *Edman* menghasilkan fragmen asam amino sbb:
 1. Lys-His-Ile-Val-Ala-Cys
 2. lys-Tyr-Pro-Asn
 3. Cys-Ala-Tyr-Lys-Thr-Thr-Gln-Ala-Asn
 4. Thr-Met-Ser-Ile-Thr-Asp-Cys-Arg
 5. Asn-Cys-Tyr-Gln-Ser-Tyr-Ser
 6. Glu-Thr-Gly-Ser-Ser
 - iv. Direkasikan dengan Enzim *Tripsin* menghasilkan fragmen sbb:
 1. Thr-Thr-Gln-Ala-Asn-Lys
 2. Glu-Thr-Gly-Ser-Ser-lys
 3. Glu-Thr-Gly-Ser-Ser-lys
 4. His-Ile-Val-Ala-Cys
 5. Cys-Tyr-Gln-Ser-Tyr-Ser-Thr-Met-Ser-Ile-Thr-Asp-Cys-Arg
 6. Tyr-Pro-Asn-Cys-Ala-Tyr-Lys

Tentukanlah urutan Asam amino pada protein tersebut.

4. Pemotongan rantai polipeptida oleh enzim proteolitik tripsin dan khimotripsin adalah enzim spesifik yang mengkatalisis hidrolisis polipeptida pada lokasi spesifik. Sekuen rantai B hormon polipeptida insulin diperlihatkan dibawah ini. perhatikanlah bahwa jembatan sistem di antara rantai a dan b telah dipecah oleh asam format.

Phe – Val – Asn – Gln – His – leu – CySO_3H – Gly – Ser – His – Leu – Val –
Glu – Ala – Leu – Tyr – Leu – Val - CySO_3H – Gly – Glu – Arg – Gly – Phe
– Phe – Tyr – Thr – Pro – Lys – Ala.

Tunjukkanlah titik-titik pada rantai B yang dipotong oleh (a) tripsin dan (b) khimotripsin.

5. Penentuan Deret Peptida Otak Leusin Enkefalin. Sekelompok polipeptida yang mempengaruhi transmisi syaraf pada bagian tertentu otak telah diisolasi dari jaringan yang juga dapat berikatan dengan obat-obatan candu, seperti morfin dan nalokson. Opioid; oleh karena itu, menyerupai beberapa sifat senyawa opiat(candu). Beberapa peneliti menganggap polipeptida ini sebagai penyetop rasa sakit yang diproduksi sendiri oleh otak. Dengan menggunakan keterangan dibawah ini, tentukanlah deret asam amino dari opioid leusin enkafelin. Jelaskan bagaimana struktur anda sesuai dengan setiap informasi yang diberikan.
- Hidrolisa sempurna oleh 1 M HCl pada 110°C diikuti dengan analisa asam amino menunjukkan adanya Gly, Leu, Phe, dan Tyr, dalam perbandingan molar 2:1:1:1.
 - Perlakuan polipeptida dengan 2,4-dinitrofluorobenzena diikuti dengan hidrolisa sempurna dan kromatografi menunjukkan adanya turunan 2,4-dinitrofeniltirosin. Tidak ada tirosin bebas yang dijumpai.
 - idrolisa sebagai polipeptida tersebut dengan khimotripsin diikuti dengan kromatografi, menghasilkan Leu, Tyr, dan peptida yang lebih pendek. Hidrolisa sempurna peptida ini, diikuti dengan analisa asam amnio menunjukkan adanya Gly dan Phe dalam perbandingan 2:1

6. Elektroforesis Peptida. Jika ditempatkan di dalam medan listrik, asam amino dan peptida yang bermuatan akan bergerak menuju anoda atau katoda tergantung pada pH (lihat gambar 6-5). Teknik ini telah dipergunakan secara luas untuk memisahkan peptida berdasarkan muatan total. Arah pergerakan berubah-ubah, terutama karena muatan total peptida dapat diubah dengan mengubah pH medium.

a. Bagi tiap-tiap asam amino dan peptida di bawah ini, tentukanlah arah gerak (anoda atau katoda) pada pH yang ditunjukkan

(1) Glu (pH 7)

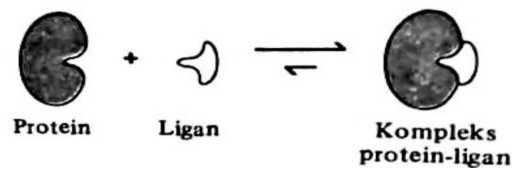
(2) Glu (pH 1)

(3) Asp-His (pH 1)

(4) Asp-His (pH 10)

b. Tentukanlah pH yang segera memisahkan ketiga peptida Gly- Lys, Asp-Val, dan Ala-His pada metoda elektroforesis. Oleh dialisis, rotein akan melarut kembali. Kemukakanlah alasan molekuler bagi pengamatan bahwa konsentrasi tinggi garam yang ditambahkan menurunkan kelarutan protein.

7. Kromatografi Afinitas: Metoda Isolasi Protein yang Amat Spesifik dan Efisien karena sifat sensitif dari hampir semua protein, ahli biokimia harus mengembangkan metoda khusus untuk mengisolasi dan memurnikan protein karena banyak metoda konvensional yang baik bagi molekul organik, seperti distilasi dan ekstraksi pelarut tidak cocok bagi protein. Bukan suatu yang aneh untuk mengerjakan isolasi protein tunggal yang terdapat pada konsentrasi 10^{-3} samapai 10^{-6} M di dalam suatu campuran dengan beberapa ribu biomolekul lain. Suatu teknik yang dikenal sebagai kromatografi afinitas telah memberikan pengaruh besar pada isolasi dan pemurnian enzim-enzim tertentu, imunoglobulin, protein reseptor. Teknik ini memanfaatkan kenyataan yang telah dikenal dengan baik bahwa protein serupa itu, dalam aksi biologi normalnya akan mengikat molekul spesifik lain secara reversibel, molekul ini disebut ligan. Ikatannya bersifat amat kuat, untuk membentuk kompleks nonkovalen protein-ligan.



Pada teknik ini ligan spesifik bagi protein yang akan diisolasi terikat secara kovalen dengan butiran polimer tidak larut, berukuran 10 sampai 50 μ m.



Untuk mengisolasi protein ini dari ekstrak sel, contoh ekstrak ditempatkan pada suatu kolom yang tersusun atas butiran polimer yang sudah berikatan dengan ligan, dan kolom ini dicuci berulang-ulang dengan buffer. Satu-satunya protein yang bertahan pada kolom adalah protein yang mempunyai afinitas tinggi dengan ligan yang terikat pada butiran; sisa protein lainnya akan tercuci. Karena afinitas dan spesifisitas protein dengan ligan amat tinggi, seringkali seseorang dapat mengisolasi dan memurnikan jumlah yang amat kecil dari suatu protein spesifik dari ekstrak sel yang mengandung ratusan jenis protein lain dalam satu tahap.

Bagaimanakah seseorang dapat memperoleh protein yang terikat tadi dari kolom afinitas dalam bentuk murni? Jelaskanlah dasar prosedur yang anda kemukakan.

8. Kromatografi pertukaran ion merupakan metoda paling banyak yang di pergunakan untuk memisahkan, mengidentifikasi, dan menghitung jumlah tiap-tiap asam amino di dalam suatu campuran. Metode ini juga memanfaatkan perbedaan dalam tingkah laku asam-basa dari asam amino, tetapi terdapat factor tambahan yang menyebabkan prosedur ini efektif. Jelaskan mekanisme pemisahan protein melalui metode ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Al-Mossawi, A.H., Al-Garawi, Z.S. 2018. *Qualitative tests of amino acids and proteins and enzyme kinetics*. Baghdad: Mustansiriyah University.
2. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
3. Ramus, V. 2020. *Qualitative Tests for Proteins*. <https://www.youtube.com/watch?v=6YPWipP-Qe8&feature=youtu.be> (diakses pada tanggal 15 Oktober 2020).
4. Subroto, E., dkk. 2020. The Analysis Techniques Of Amino Acid And Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
5. Sukaryawan, M. 2014. *Biokimia*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
6. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
7. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
8. Thenawidjaja, M. 1990. *Dasar-dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
9. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
10. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
11. Won Chan Kim. *Principles of Biochemistry*. <https://www.kaznaru.edu.kz> . diakses pada tanggal 25 september 2020.

4.2 STRUKTUR PROTEIN

1. ORIENTASI

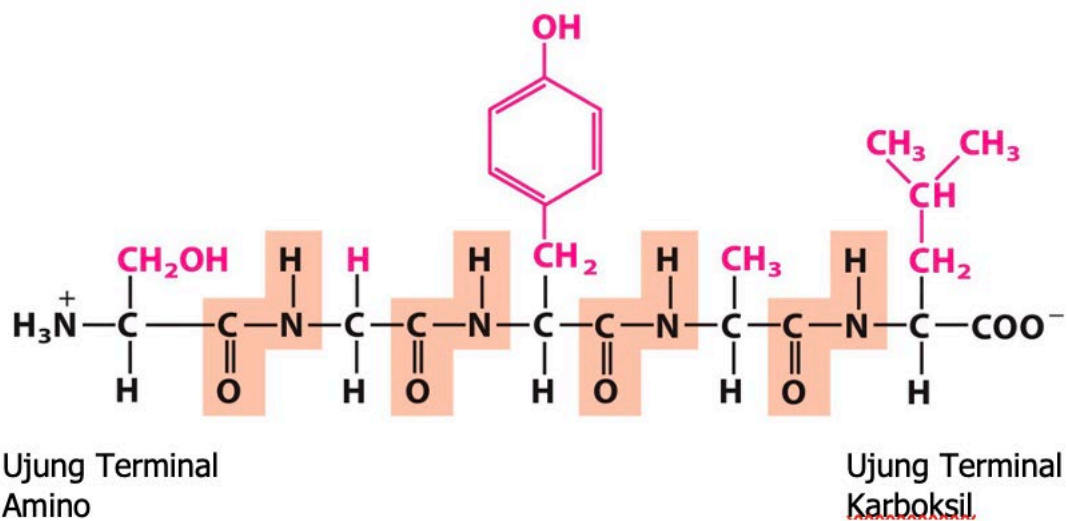
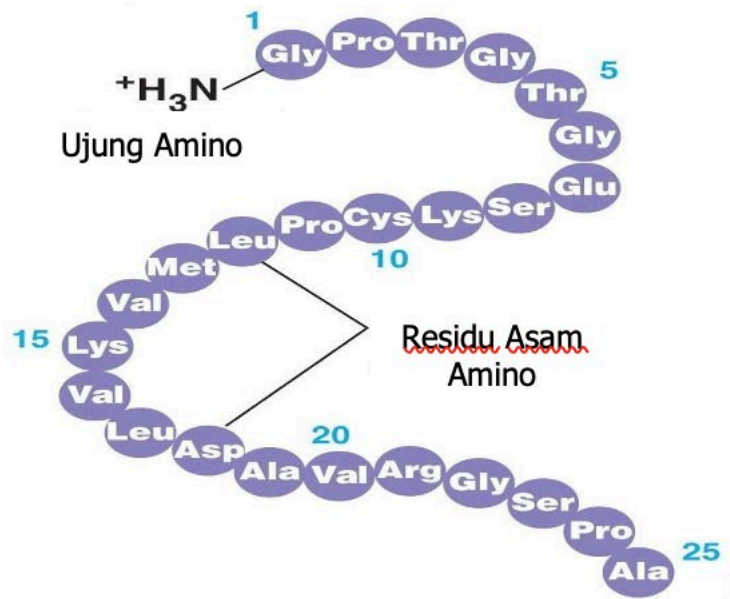
Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa menguasai pondasi saintifik materi biokimia (CPMK3), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah mahasiswa menguasai pondasi saintifik materi protein (Sub-CPMK3). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

Struktur Protein

Struktur protein adalah susunan tiga dimensi atom-atom dalam molekul protein, yang merupakan rantai asam amino. Untuk menjalankan fungsi biologinya, protein "melipat" menjadi satu atau lebih struktur tiga dimensi yang dipengaruhi oleh sejumlah interaksi non kovalen, seperti ikatan hidrogen, ikatan ionik, gaya vander waals, dan interaksi hidrofobik. Untuk mengetahui cara kerja protein dalam level molekul, ilmuwan sering harus mengetahui terlebih dahulu struktur tiga dimensinya. Struktur protein dapat dijabarkan dalam empat tingkat yang berbeda, yaitu: Struktur Primer, Struktur Sekunder, Struktur Tersier dan Struktur Kwarterner.

A. Struktur Primer Protein

Tingkat paling sederhana dari struktur protein adalah struktur primer, yaitu struktur protein yang hanya terdiri dari urutan asam amino dalam rantai polipeptida. Struktur primer protein hanya memiliki ikatan peptida.



Gambar 70 Struktur Primer Protein

B. Struktur Sekunder

Struktur sekunder protein mengacu pada struktur lipatan lokal yang terbentuk di dalam polipeptida karena interaksi antara atom-atom tulang punggung. Struktur sekunder selain memiliki ikatan peptida, juga distabilkan dengan ikatan hidrogen antara residu asam amino terdekat. Ada 2 bentuk umum struktur sekunder yaitu: α -Heliks dan β -Sheet. Apabila ikatan hydrogen terbentuk antara residu asam amino

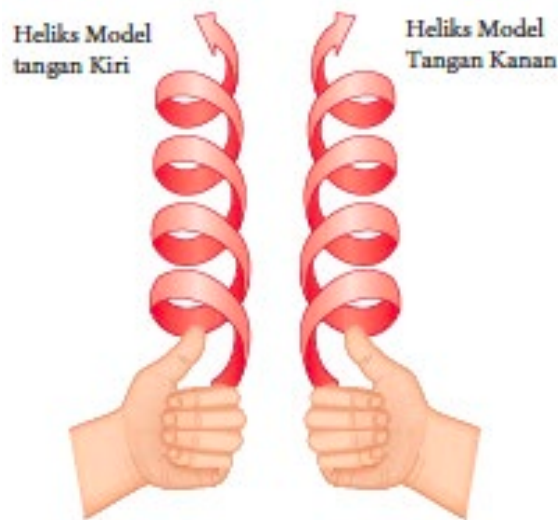
satu dengan residu asam amino 4 membentuk struktur α -Heliks. Pola ikatan ini menarik rantai polipeptida menjadi struktur heliks yang menyerupai pita melengkung, dengan setiap putaran heliks mengandung 3,6 residu asam amino. Gugus R asam amino menonjol keluar dari heliks, dan bebas berinteraksi.

Dalam bentuk β -sheet, dua atau lebih segmen rantai polipeptida berbaris di samping satu sama lain, membentuk struktur seperti lembaran yang disatukan oleh ikatan hidrogen. Ikatan hidrogen terbentuk antara gugus karbonil dan amino pada tulang punggung, sedangkan gugus R memanjang di atas dan di bawah bidang lembaran. Untaian lembaran mungkin paralel, menunjuk ke arah yang sama (artinya N- dan C-terminal mereka cocok), atau antiparalel, menunjuk ke arah yang berlawanan (artinya N-terminal dari satu untai diposisikan berikutnya ke terminal-C yang lain).

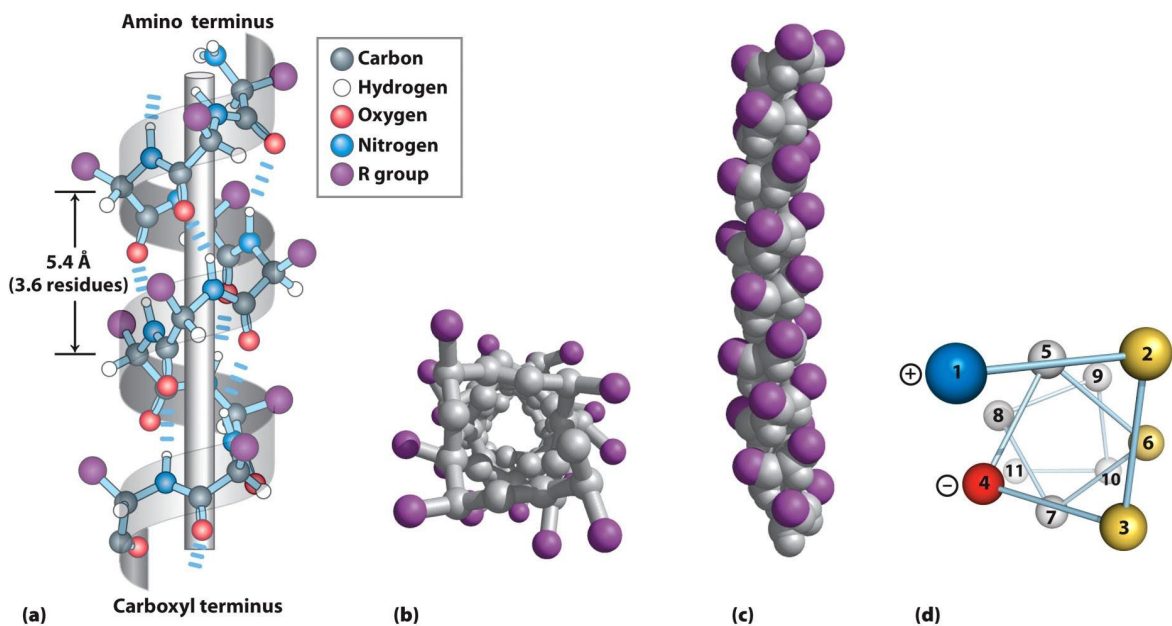
Struktur α Helix

- Tulang punggung heliks disatukan oleh ikatan hidrogen antara amida tulang punggung dari n dan $n+4$ asam amino.
- Heliks tangan kanan dengan 3,6 residu (5,4 Å) per putaran.
- Ikatan peptida disejajarkan dengan sumbu heliks.
- Rantai samping kira-kira tegak lurus dengan sumbu heliks.

Ada metode sederhana untuk menentukan apakah struktur heliks adalah tangan kanan atau tangan kiri. Kepalkan kedua tangan Anda dengan ibu jari terentang dan mengarah menjauh dari Anda. Melihat tangan kanan Anda, pikirkan sebuah heliks yang melingkari ibu jari kanan anda ke arah di mana keempat jari lainnya melengkung seperti yang ditunjukkan (searah jarum jam). Heliks yang dihasilkan adalah tangan kanan. Tangan kiri anda akan menunjukkan heliks tangan kiri, yang berputar berlawanan arah jarum jam saat memutar ibu jari anda.



Gambar 96 Model Heliks
Sumber: Nelson & Cox, 2013



Gambar 97 Model Struktur α heliks.
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Gambar di atas menunjukkan berbagai aspek strukturnya. (a) Model bola-dan tongkat menunjukkan ikatan hidrogen intrarantai. Unit pengulangan adalah satu putaran heliks, 3,6 residu. (b) Heliks dilihat dari satu ujung, melihat ke bawah sumbu membujur. Perhatikan posisi grup R, yang diwakili oleh bola ungu. Model bola dan tongkat ini, yang menekankan susunan heliks, memberikan kesan yang salah bahwa

heliks itu berongga, karena bola-bola itu tidak mewakili jari-jari van der Waals dari atom-atom individual. (c) Seperti yang ditunjukkan oleh model pengisian ruang ini, atom-atom di pusat heliks berada dalam kontak yang sangat dekat. (d) Proyeksi roda heliks dari α helix. Representasi ini dapat diwarnai untuk mengidentifikasi permukaan dengan sifat tertentu. Residu kuning, misalnya, dapat bersifat hidrofobik dan sesuai dengan antarmuka antara heliks yang ditunjukkan di sini dan bagian lain dari polipeptida yang sama atau lainnya. Residu merah (negatif) dan biru (positif) menggambarkan potensi interaksi rantai samping bermuatan berlawanan yang dipisahkan oleh dua residu dalam heliks.

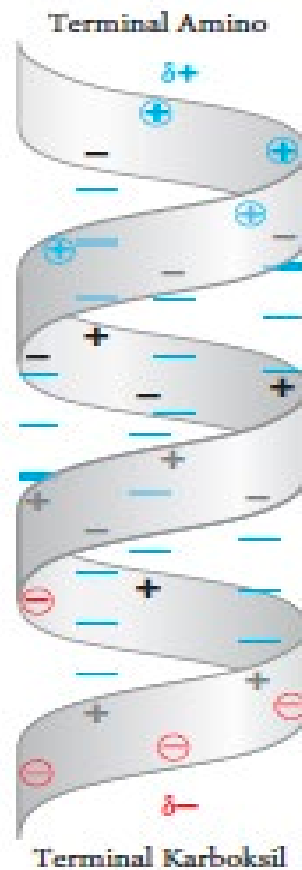
Urutan mempengaruhi stabilitas heliks, tidak semua sekuens polipeptida mengadopsi struktur heliks. Residu hidrofobik kecil seperti Alanin dan Leusin adalah pembentuk heliks yang kuat. Sedangkan Prolin bertindak sebagai pemutus heliks karena rotasi sekitar ikatan N-CO tidak memungkinkan. Asam amino Glysin bertindak sebagai pemutus heliks karena grup-R kecil mendukung konformasi lainnya. Interaksi tarik-menarik atau tolak-menolak antar rantai samping 3-4 asam amino terpisah akan mempengaruhi pembentukan heliks.

Dipol Helix

Dipol listrik dari ikatan peptida ditransmisikan sepanjang segmen α heliks melalui ikatan hidrogen antar cabang, menghasilkan dipol heliks keseluruhan. Dalam ilustrasi ini, konstituen amino dan karbonil dari setiap ikatan peptida ditunjukkan oleh simbol + dan - , masing-masing. Konstituen amino dan karbonil yang tidak terikat hidrogen dari ikatan peptida di dekat setiap ujung daerah α heliks dilingkari dan ditampilkan dalam warna.

Ingatlah bahwa ikatan peptida memiliki momen dipol yang kuat.

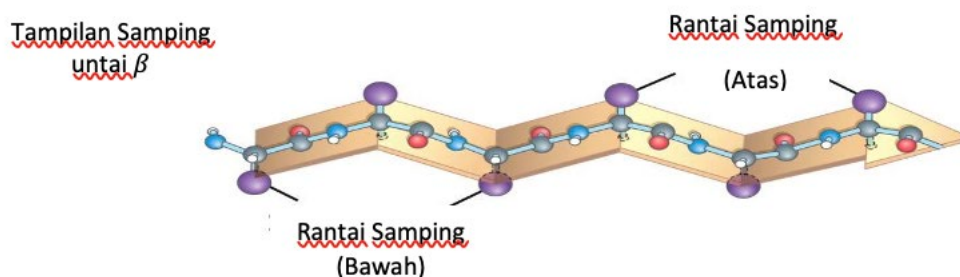
- Karbonil O negatif
- Amida H positif
- Semua ikatan peptida dalam heliks memiliki orientasi ikatan.
- Heliks memiliki momen dipol makroskopik yang besar serupa residu bermuatan negatif yang sering terjadi di dekat ujung positif dari dipol heliks.



Gambar 98 Dipole Heliks

Struktur β Sheets

Planaritas ikatan peptida dan tetrahedral geometri karbon membuat seperti lembaran. Susunan tulang punggung seperti lembaran disatukan oleh ikatan hidrogen antara amida tulang punggung dalam untaian yang berbeda. Rantai samping menonjol dari lembaran secara bergantian ke atas dan arah bawah.



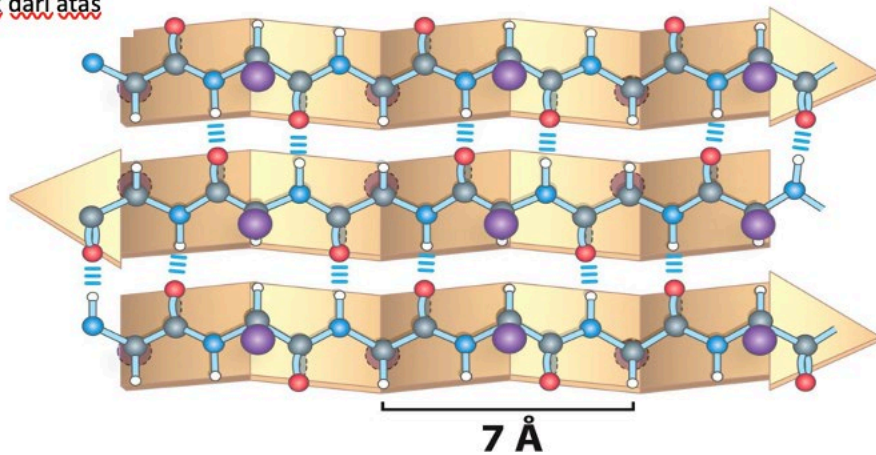
Gambar 99 Struktur β Sheets

Parallel dan Antiparalel β Sheets

Orientasi paralel atau antiparalel dari dua rantai dalam satu lembar dimungkinkan. Pada lembaran β Sheets paralel, untaian ikatan-H berjalan di arah yang sama, menghasilkan ikatan H yang bengkok (lebih lemah). Dalam lembaran antiparalel, untaian ikatan-H berjalan berlawanan arah, menghasilkan ikatan H linier (lebih kuat).

Antiparalel β Sheets

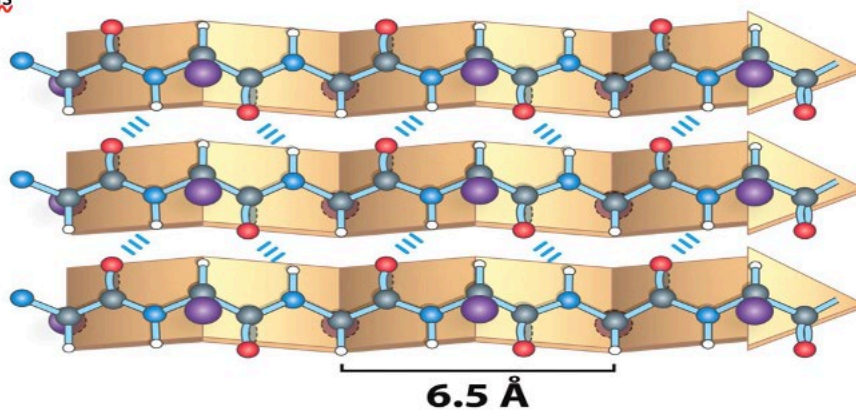
Tampak dari atas



Gambar 100 Struktur anti paralel β Sheets

Pararel β sheet

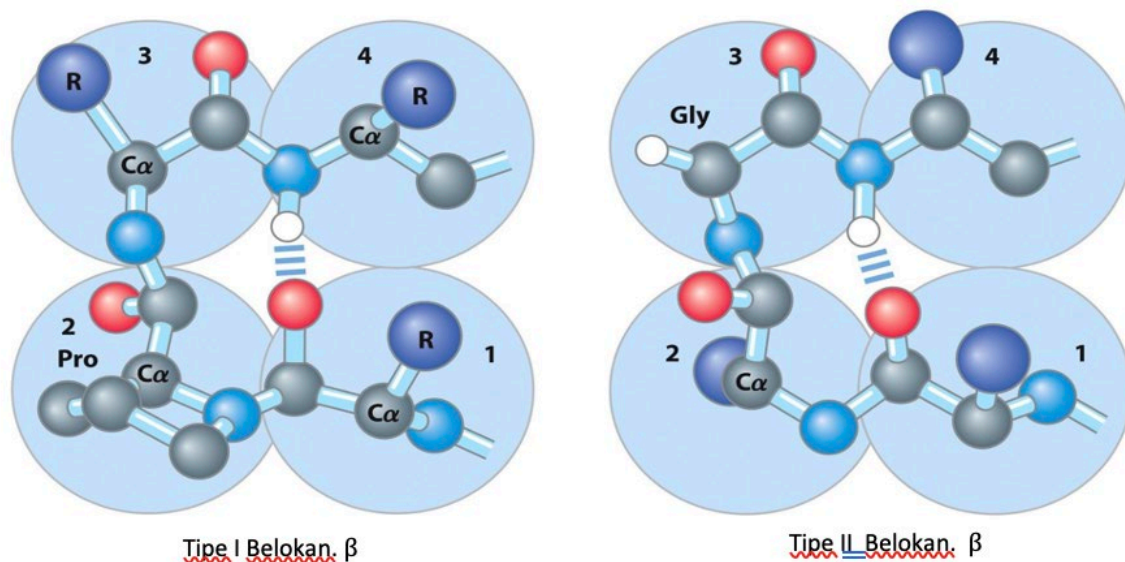
Tampak dari atas



Gambar 101 Struktur paralel β Sheets

Belokan β

Belokan β sering terjadi setiap kali helai dalam lembar mengubah arah putaran 180° dicapai lebih dari empat asam amino. Putaran distabilkan oleh ikatan hidrogen dari oksigen karbonil dengan hidrogen amida residu 3 urutan berikutnya. Prolin di posisi 2 atau glisin di posisi 3 adalah umum terjadi putaran.

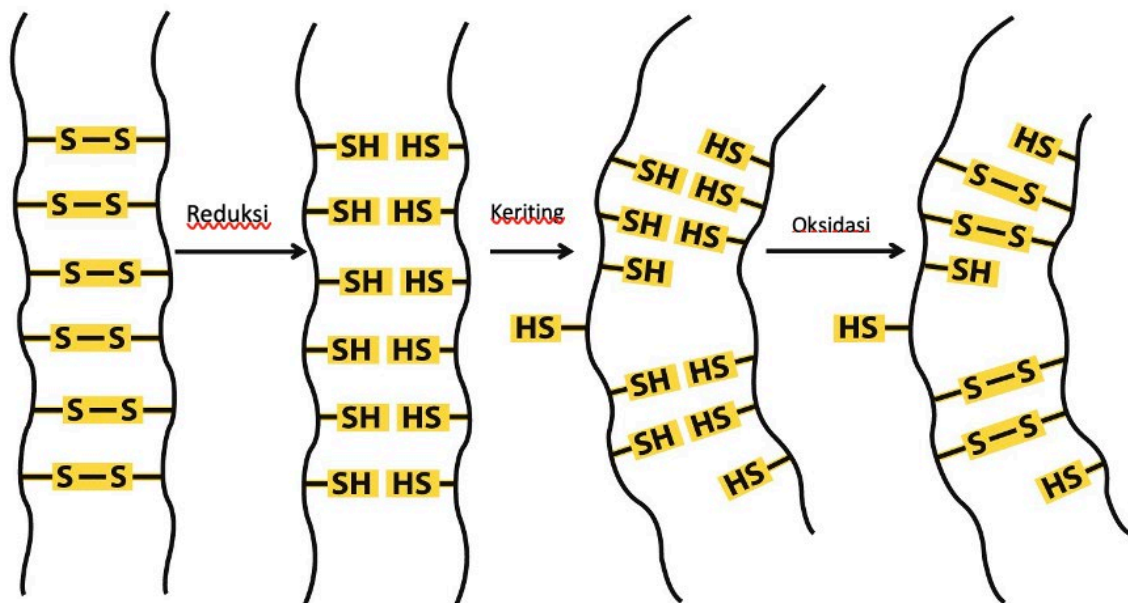


Gambar 102 Struktur belokan β
Sumber: Nelson & Cox, 2013

C. Struktur Tersier Protein

Struktur tersier mengacu pada tata ruang secara keseluruhan susunan atom dalam protein. Struktur tersier terutama disebabkan oleh interaksi antara gugus R dari asam amino yang membentuk protein. Interaksi gugus R yang berkontribusi pada struktur tersier termasuk ikatan hidrogen, ikatan disulfida, ikatan ion, interaksi dipol-dipol, dan gaya dispersi London, pada dasarnya, keseluruhan ikatan non-kovalen. Misalnya, gugus R dengan muatan yang sama akan saling tolak menolak, sedangkan gugus dengan muatan yang berlawanan dapat membentuk ikatan ion. Beberapa contoh dari struktur tersier protein adalah sebagai berikut:

1) Kimia mengeriting rambut



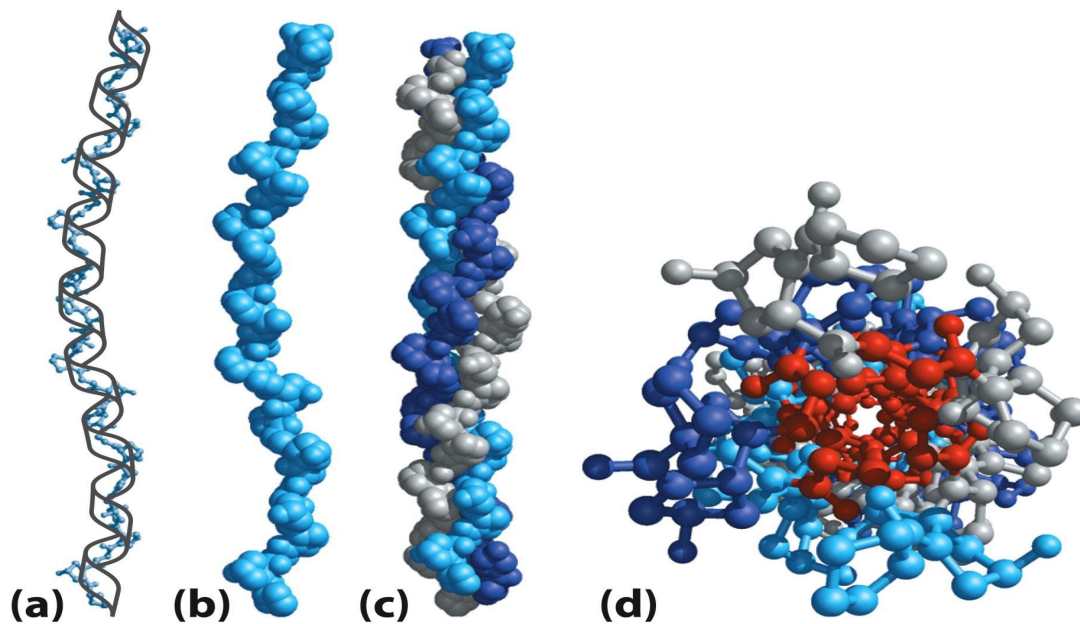
Gambar 103 Kimia mengeriting rambut

Rambut yang akan dikeriting pertama-tama digulung mengelilingi suatu bentuk yang sesuai. Larutan senyawa pereduksi biasanya senyawa yang mengandung suatu gugus tiol atau sulfhidril (-SH), lalu diberikan pada rambut dengan pemanasan. Senyawa pereduksi memecah ikatan disulfida dengan mereduksi residu asam amino sistin-sistin, satu pada masing-masing rantai. Uap panas memecah ikatan hidrogen dan menyebabkan Struktur α Helix pada rantai polipeptida keratin rambut menjadi terbuka dan meregang.

Setelah beberapa waktu larutan pereduksi di angkat, dan suatu pengoksidasi ditambah untuk memantapkan ikatan disulfida yang baru di antara pasangan residu sistein pada rantai polipeptida yang berdampingan, tetapi bukan pasangan yang sama dengan pasangan yang ada sebelum perlakuan. Dengan pencucian dan pendinginan rambut, rantai polipeptida berubah menjadi konformasi α Helix. Serat rambut sekarang menjadi keriting sesuai dengan model yang diinginkan, karena jembatan disulfida baru terbentuk, dan jembatan baru ini menimbulkan belokan/keriting pada untaian α Helix pada serat rambut.

2) Struktur Kolagen

Kolagen merupakan bagian penting dari jaringan ikat: tendon, tulang rawan, tulang, kornea mata. Setiap rantai kolagen adalah tangan kiri yang kaya Gly dan Pro spiral. Tiga rantai kolagen terjalin menjadi tangan kanan heliks rangkap tiga superheliks. Triple helix memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi daripada baja kawat dengan penampang yang sama. Banyak triple-heliks berkumpul menjadi fibril kolagen.



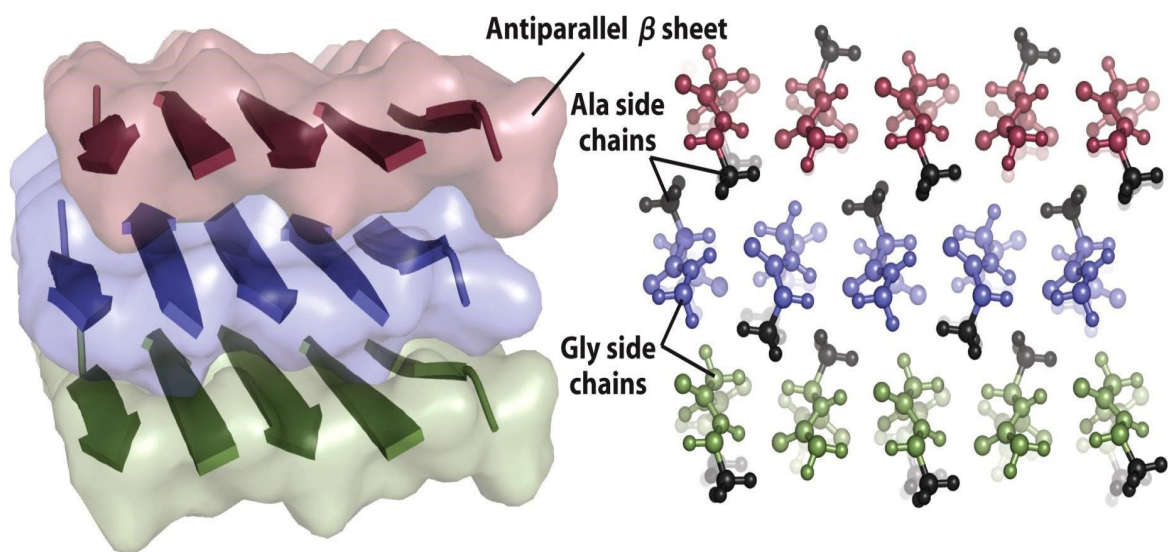
Gambar 104 Struktur Kolagen

Struktur kolagen. (a) Rantai kolagen memiliki struktur sekunder berulang yang unik untuk protein ini. Urutan tripeptida berulang Gly-X-Pro atau Gly-X-4-Hyp mengadopsi struktur heliks kidal dengan tiga residu per putaran. Urutan berulang yang digunakan untuk menghasilkan model ini adalah Gly-Pro-4-Hyp. (b) Model pengisi ruang dari rantai yang sama. (c) Tiga dari heliks ini (ditampilkan di sini dalam warna abu-abu, biru, dan ungu) melingkari satu sama lain dengan putaran tangan kanan. (d) Superhelix kolagen tiga untai ditunjukkan dari satu ujung, dalam representasi bola dan tongkat. Residu gly ditunjukkan dengan warna merah. Glisin, karena ukurannya yang kecil, diperlukan di persimpangan ketat di mana tiga rantai bersentuhan. Bola dalam ilustrasi ini tidak mewakili jari-jari van der Waals dari

masing-masing atom. Pusat superhelix beruntai tiga tidak berongga, seperti yang terlihat di sini, tetapi sangat padat.

3) Fibroin Sutra

Fibroin adalah protein utama dalam sutra dari ngengat dan laba-laba, struktur lembaran antiparalel. Rantai samping kecil (Ala dan Gly) memungkinkan pengemasan lembaran yang rapat. Struktur distabilkan oleh ikatan hidrogen dalam lembaran, Interaksi dispersi London antar lembaran.



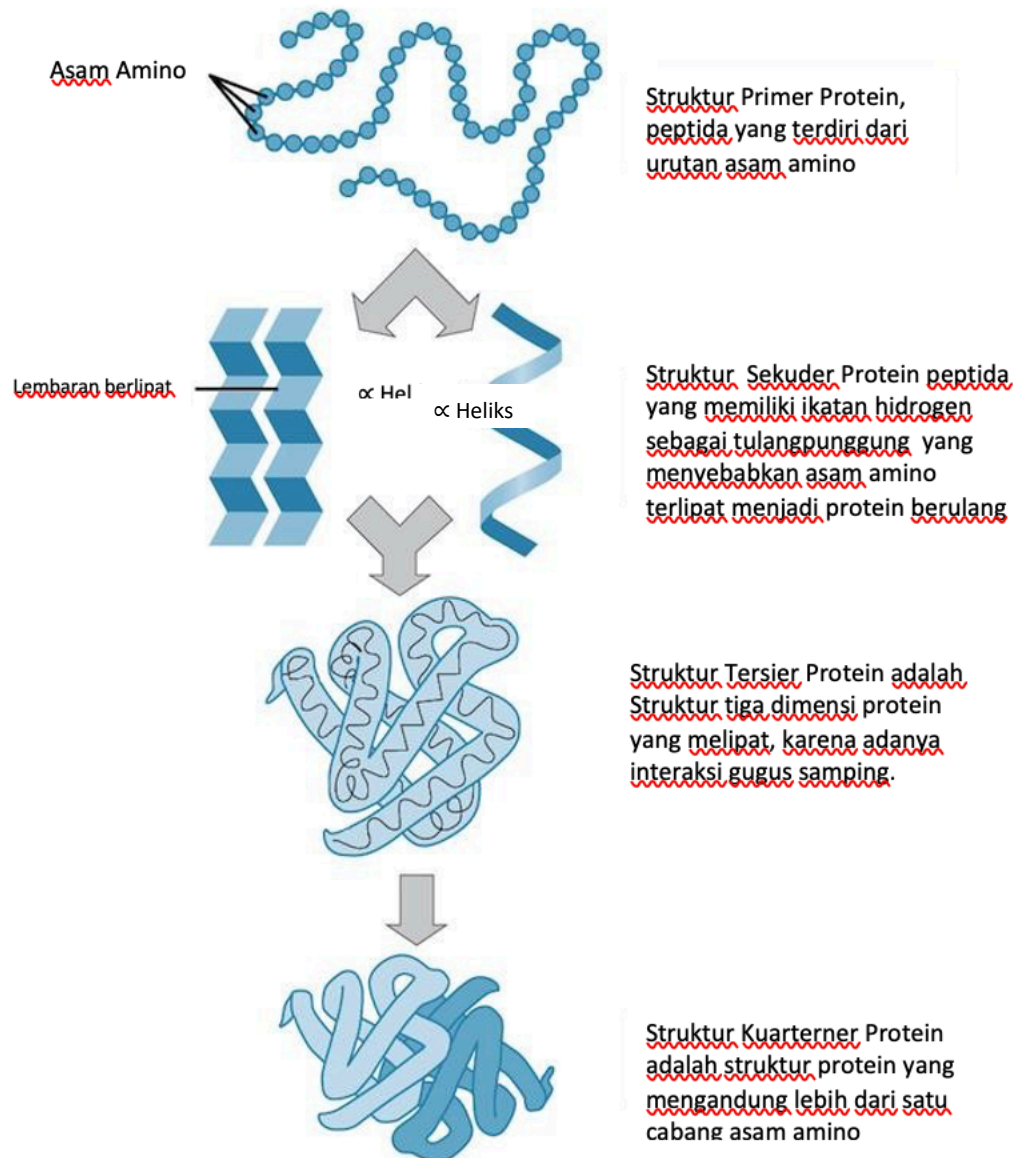
Gambar 105 Struktur Fibroin Sutra

D. Struktur Kuarterner protein.

Banyak protein terdiri dari rantai polipeptida tunggal dan hanya memiliki tiga tingkat struktur (yang baru saja kita bahas). Namun, beberapa protein terdiri dari beberapa rantai polipeptida, juga dikenal sebagai subunit. Ketika subunit ini bersatu melalui interaksi, membentuk struktur protein kuarternya.

Contoh protein dengan struktur kuarterner adalah hemoglobin. Seperti disebutkan sebelumnya, hemoglobin membawa oksigen dalam darah yang terdiri dari empat subunit, dua masing-masing dari α dan β . Contoh lain adalah DNA polimerase, enzim yang mensintesis untaian DNA baru dan terdiri dari sepuluh subunit. Secara umum,

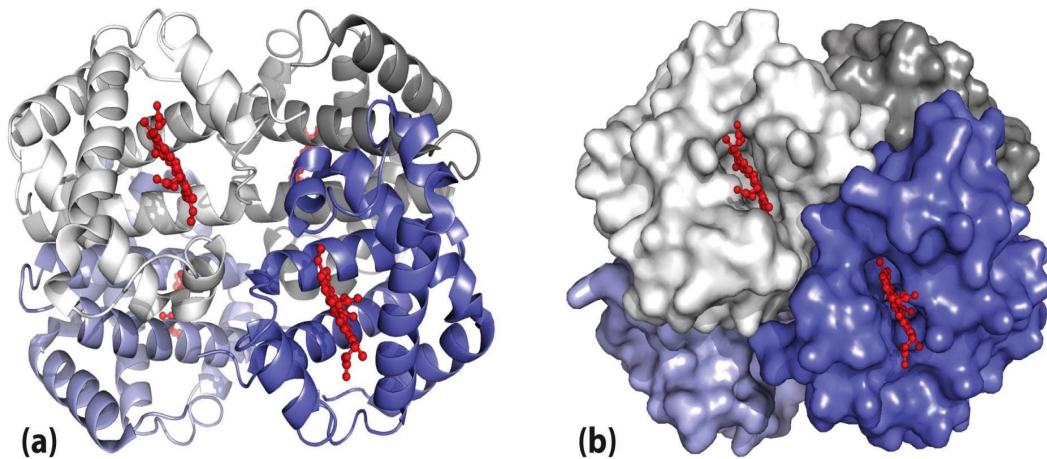
jenis interaksi yang sama yang berkontribusi pada struktur tersier (kebanyakan interaksi lemah, seperti ikatan hidrogen dan gaya dispersi London) juga menahan subunit bersama untuk memberikan struktur kuarterner.



Gambar 106 Struktur Protein Primer ke Kuarterner

Struktur kuarter deoksihemoglobin. Analisis difraksi sinar-X deoksihemoglobin (hemoglobin tanpa molekul oksigen yang terikat pada gugus heme) menunjukkan bagaimana keempat subunit polipeptida dikemas bersama. Lihat gambar 107 (a) Representasi pita mengungkapkan elemen struktural sekunder dari struktur dan posisi semua kofaktor heme. (b) Model kontur permukaan menunjukkan kantong di

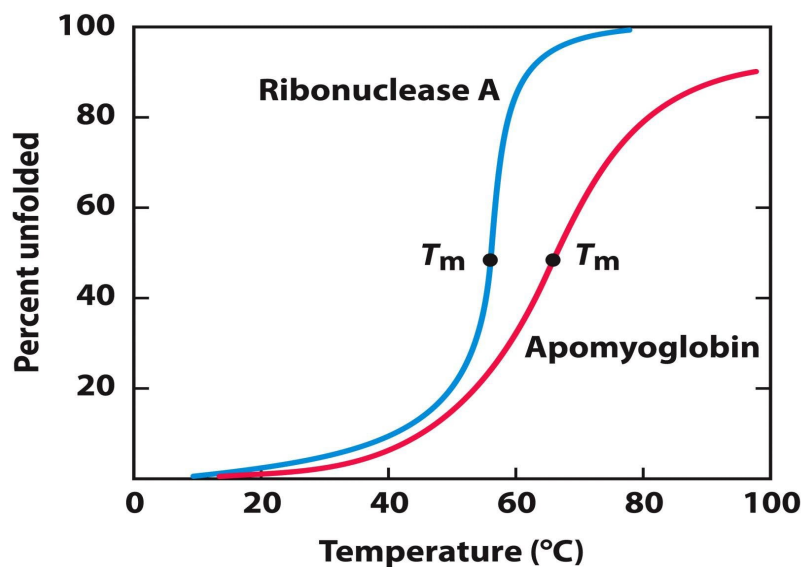
mana kofaktor heme terikat dan membantu memvisualisasikan pengepakan subunit. Subunit ditampilkan dalam nuansa abu-abu dan subunit dalam nuansa biru. Perhatikan bahwa kelompok heme (merah) relatif berjauhan.



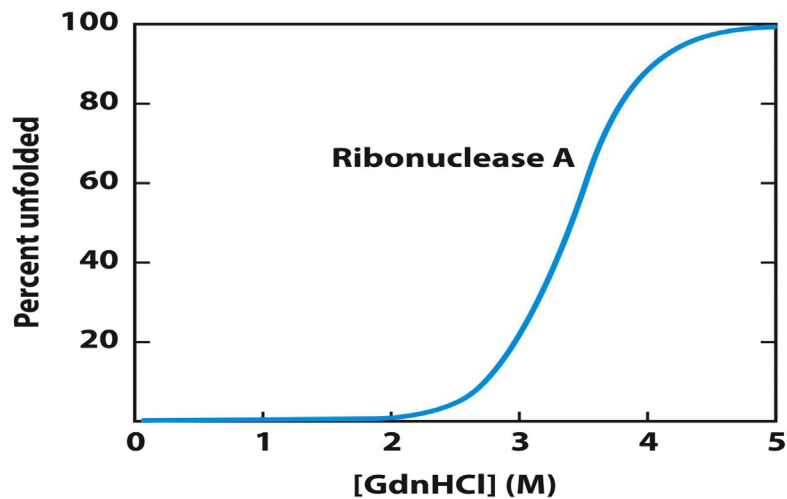
Gambar 107 Struktur Struktur Kuarterner Protein

e. **Stabilitas dan Lipatan Protein**

Fungsi protein bergantung pada struktur 3 dimensinya, hilangnya integritas struktural dengan disertai hilangnya aktivitasnya disebut denaturasi. Protein dapat didenaturasi oleh: panas atau dingin, pH ekstrem, Pelarut organic, Agen chaotropic: urea dan guanidinium hidroklorida



Gambar 108 Pengaruh Suhu terhadap Struktur Enzim



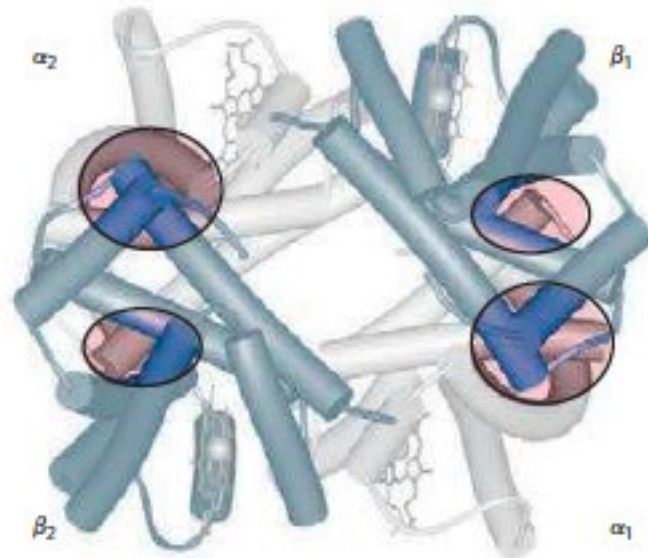
Gambar 109 Pengaruh Kosentrasi terhadap Struktur Enzim

f. **Protein oligomer**

Protein oligomer mempunyai struktur tersier dan kuarterner, protein oligomer adalah protein yang mempunyai dua atau lebih rantai polipeptida yang terpisah. Polipeptida di dalam protein oligomer dapat sama atau berbeda. Jumlah rantai polipeptida dalam suatu protein oligomer dapat ditemukan dengan menentukan jumlah residu terminal amino per molekul protein, dengan menggunakan pereaksi yang tepat seperti 2,4 dinitrofluorobenzen. Protein oligomer dengan empat rantai polipeptida yang terpisah, seperti hemoglobin, akan mempunyai empat residu terminal amino. Protein oligomer memiliki berat molekul yang lebih tinggi dan fungsi yang lebih kompleks dibandingkan dengan protein berantai tunggal.

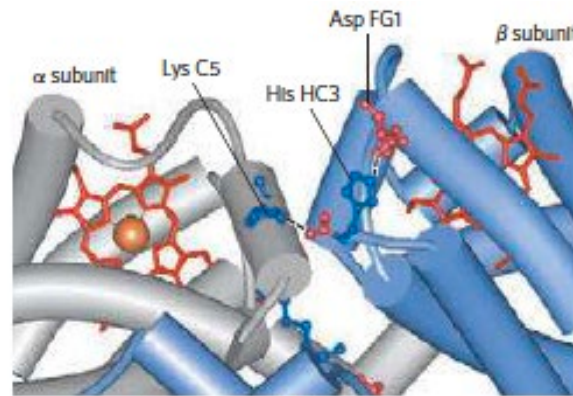
Contoh protein oligomer yang paling banyak diketahui adalah hemoglobin. Fungsinya sebagai pembawa oksigen pada sel darah merah diatur oleh pH darah dan kosentrasi CO₂. Protein oligomer pertama yang dianalisa sinar X, adalah hemoglobin (BM 64.500) yang mengandung empat rantai polipeptida dan empat gugus prostetik heme, yang mempunyai atom besi dalam bentuk fero Fe(II). Bagian protein yang disebut globin, terdiri dari dua rantai α (masing-masing mempunyai 141 residu) dan dua rantai β

(masing-masing mempunyai 146 residu). Karena hemoglobin 4 kali lebih besar dari myoglobin dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk memecahkan struktur tiga dimensinya, yang berhasil ditentukan oleh Max Perutz dan koleganya dari Cambridge.



Gambar 110 Interaksi dominan antara subunit hemoglobin

Interaksi dominan antara subunit hemoglobin (PDB ID 1HGA) Dalam representasi ini, α subunit terang dan β sub-unit gelap. Interaksi subunit terkuat (disorot) terjadi antara subunit yang berbeda. Ketika oksigen mengikat, kontak α, β berubah sedikit, tetapi ada perubahan besar pada kontak α, β , dengan beberapa pasangan ion putus.



(a)



(b)

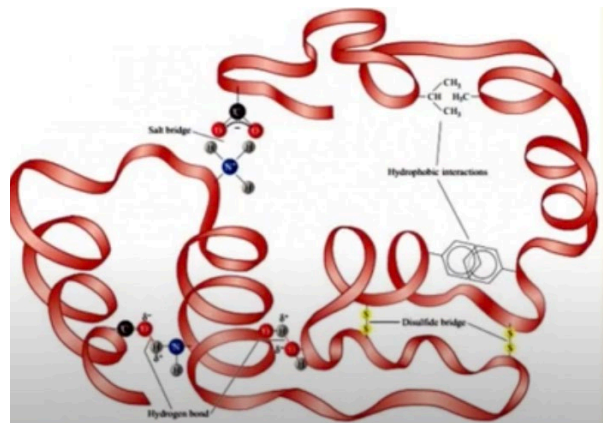
Gambar 111 Beberapa pasangan ion yang menstabilkan keadaan T dari deoxyhemoglobin (Sumber: Nelson & Cox, 2013)

Keterangan gambar: (a) Tampilan closeup dari sebagian molekul deoksihemoglobin dalam keadaan T (PDB ID 1HGA). Interaksi antara pasangan ion HC3-nya dan Asp FG1 dari β subunit (biru) dan antara Lys C5 dari α subunit (abu-abu) dan HC3-nya (gugus α karboksilnya) dari β subunit ditunjukkan dengan garis putus-putus. (Ingat bahwa HC3 adalah residu terminal karboksil dari β subunit.) (b) Interaksi antara pasangan ion ini, dan antara pasangan ion lainnya yang tidak ditunjukkan dalam (a), digambarkan dalam representasi rantai polipeptida hemoglobin yang diperpanjang.

Analisis sinar x telah menemukan bahwa molekul hemoglobin berbentuk agak bulat, dengan diameter kira-kira 5,5 nm. Masing-masing dari empat rantai mempunyai struktur tersier yang khas, yang mencirikan berlipatnya rantai. Keempat rantai polipeptida bersama-sama menyesuaikan diri didalam suatu susunan yang mendekati tetrahedral untuk membangun suatu struktur kuarterner hemoglobin yang khas.

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke enam biokimia 1 pada pokok bahasan struktur protein yang telah disajikan, bagaimana terbentuknya struktur primer, sekunder dan tersier protein?

Materi Struktur Protein dapat di lihat pada video berikut ini.



Gambar 112 Struktur Protein
Sumber: Sukaryawan & Sari 2021

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, setelah melakukan diskusi mengenai terbentuknya struktur primer, sekunder, tersier dan kuarterner protein. Kemudian bahaslah bersama kelompok saudara: Bagaimana struktur tersier protein dapat melakukan fungsi biologinya? Kerjakanlah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan.

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang struktur protein. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang struktur tersier protein melakukan fungsi biologinya. Buatlah Analisa yang memperlihatkan jenis struktur protein terhadap ikatan kimia yang terbentuk? Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

4. APLIKASI

Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang struktur tersier protein melakukan fungsi biologinya. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di upload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal-hal berikut ini.

Suatu Peptida yang terdiri dari asam amino:

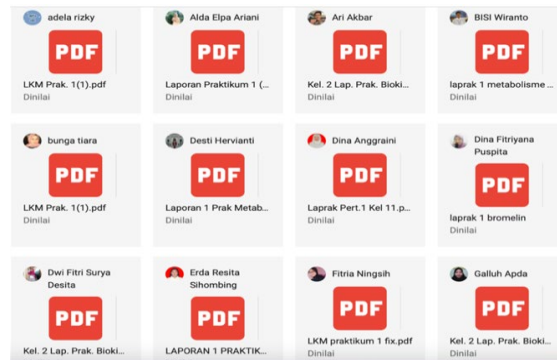
Fhe-Val-Asn-Gln-Hys-Leu-Cys-Gly-Ser-Lys-Leu-Val-Glu-Ala-Leu-Tyr-Leu-Val-Cys-Gly-Glu-Arg-Gly-Fhe-Fhe-Tyr-Thr-Pro-Lys-Ala-Gly-Thr-Ala-Hys-Cys-Arg-Ile-Trp- Ser-Tyr-Glu-Val-Leu-Gly-Ser-Thr-Cys-Tyr-Asn-Gln-Ser-Ser-met-Fhe-Lys-Ile-Pro-Tyr-Tyr-Lys.

- a. Gambarkan Struktur Primer Peptida tersebut
- b. Gambarkan Struktur Sekunder Peptida tersebut
- c. Gambarkan Struktur Tersier Peptida tersebut
- d. Gambarkan Struktur Kwarterner Protein haemoglobin

5. REFLEKSI

Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 6 struktur protein". Selanjutnya laporan tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id>. Laporan 6 struktur protein minimal memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka.

Contoh submit laporan 6 Protein



Gambar 113 Submit Laporan 6 Struktur Protein

Materi perkuliahan pokok bahasan Struktur Protein dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.

Struktur Protein

- Kemampuan akhir tiap tahapan belajar (Sub-CPMK):
- Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi protein (Sub-CPMK3).

Gambar 114 Paparan materi Struktur Protein

Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di submit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

1. Struktur protein adalah susunan tiga dimensi atom-atom dalam molekul protein, yang merupakan rantai asam amino. Untuk menjalankan fungsi biologinya, protein "melipat" menjadi satu atau lebih struktur tiga dimensi yang dipengaruhi oleh sejumlah interaksi non kovalen, seperti ikatan hidrogen, ikatan ionik, gaya vander waals, dan interaksi hidrofobik. Jelaskan dan tuliskan struktur protein berikut ini:
 - a. Struktur primer protein
 - b. Struktur sekunder protein
 - c. Struktur tersier protein
 - d. Struktur kwarterner protein
2. Struktur tersier terutama disebabkan oleh interaksi antara gugus R dari asam amino yang membentuk protein. Interaksi gugus R yang berkontribusi pada struktur tersier termasuk ikatan hidrogen, ikatan disulfida, ikatan ion, interaksi dipol-dipol, dan gaya dispersi London, pada dasarnya, keseluruhan ikatan non-kovalen. Jelaskan dan tuliskan mekanisme perubahan ikatan yang terjadi pada proses pengeritingan rambut.
3. Pembentukan belokan dan Jembatan di dalam Rantai Polipeptida. Pada polipeptida berikut ini, di manakah dapat dijumpai suatu belokan atau lengkungan? Di manakah jembatan disulfida dibentuk?

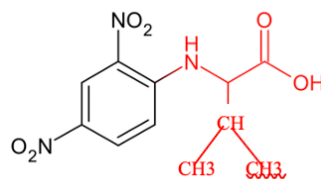
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ile	Ala	His	Thr	Tyr	Gly	Pro	Phe	Glu	Ala.	Ala
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21.	22
Met	Cys	Lys	Trp	Glu	Ala	Gln	Pro	Asp	Gly.	Met
23	24	25	26	27	28					
Glu	Cys	Ala	Phe	His	Arg					

4. Analisis sinar-x struktur tertier myoglobin dan protein globular berantai tunggal lainnya telah menghasilkan berapa kesimpulan umum mengenai bagaimana berlipatnya rantai polipeptida protein terlarut. Dengan pengetahuan ini, tunjukkan kemungkinan lokasi, apakah didalam atau di permukaan sebelah luar dari residu asam amino berikut ini, pada protein globular asli: aspartat, leusin, serin, valin, glutamin, dan lisin. Jelaskan
5. Suatu protein bersifat aktif biologis hanya jika struktur tiga-dimensinya benar. Protein disintesa dari informasi yang terkandung didalam deret penyandi DNA linear atau satu dimensi. Lebih jauh, Ribosom, menggabungkan deret asam amino secara linear atau satu dimensi. Dengan kenyataan ini, jelaskan bagaimana protein mempunyai aktifitas biologi dengan struktur tiga dimensi yang spesifik dapat dibentuk dari dalam sel. Berikanlah beberapa bukti percobaan bagi penjeasanmu.
6. Hipotesa bahwa deret asam amino linear dari suatu protein menentukan pola pelipatannya (struktur sekunder dan tertier) dapat diuji dengan membuka suatu protein dan membiarkannya melipat kembali secara spontan. Perbandingan aktivitas biologi dari protein tersebut sebelum dan sesudah berlipat memberikan suatu ukuran dari bagian protein tersebut yang telah kembali ke adaan aslinya. Sebagai contoh, ribonuklease terbuka secara sempurna dengan memotong keempat jembatan disulfida diikuti dengan penambahan 8 M urea. Jika urea tersebut sekarang dipisahkan dengan dialisis dan jembatan disulfida di biarkan terbentuk kembali pada keadaan yang terkontrol, 95 sampai 100 persen aktivitas protein dapat dikembalikan. Percobaan ini digambarkan pada Gambar berikut ini, Hasil percobaan yang serupa pada protein lain ditabelkan seperti berikut.

Protein	JUmlah ikatan disulfida	Aktivitas yang kembali (%)	
		Yang teramati	Dugaan*
Ribonuklease	4	95-100	~1
Lisosim	4	50-80	~1
Alkalin fosfatase	2	80	~33
Insulin (Sapi)	3	5-10	~6-7

*Jika ikatan disulfida terbentuk secara acak

- (a) Jika keempat jembatan disulfida pada ribonuklease yang terbuka dibentuk dengan pemasangan residu sistein secara acak sama sekali, aktivitas yang diramalkan hanya akan kira - kira 1 persen dari aktivitas semula. Mengapa anda meramalkan pengembalian aktivitas yang demikian rendah.
- (b) Pengembalian aktivitas ribonuklease, lisosim, dan alkalin fosfatase yang teramati setelah pembukaan dan perlipatan kembali cukup tinggi di bandingkan dengan aktivitas yang diramalkan jika jembatan disulfida terbentuk oleh pemasangan secara acak. Berikan suatu penjelasan bagi pengamatan ini.
- (c) Satu di antara contoh - contoh pada tabel jelas berbeda dari yang lain, yaitu insulin. Pengembalian aaktivitas yang diamati amat rendah, dan praktis sama dengan yang diramalkan oleh pembentukan jembatan disulfida secara acak. Apakah yang di tunjukkan oleh pengamatan mengenai struktur asli insulin? Berikanlah pendugaan bagaimana insulin mencapai kembali struktur aslinya.
7. Jumlah Rantai Polipeptida di dalam suatu protein Oligomer Contoh (660 mg) dari suatu protein oligomer dengan berat molekul 132000 diberikan 2,4-dinitrofluorobenzena dalam jumlah berlebih, pada kondisi sedikit basa, sampai reaksi kimia berjalan sempurna. Ikatan peptida protein lalu dihidrolisa sempurna oleh pemanasan dengan HCl pekat. Hidrolisatnya ditemukan mengandung 5,5 mg dari senyawa berikut ini:



Akan tetapi, senyawa turunan 2,4-dinitrofenil dari gugus α -amino asam amino lain tidak dapat ditemukan.

- (a) Jelaskan mengapa informasi ini dapat dipergunakan untuk menentukan jumlah rantai polipeptida di dalam suatu protein oligomer.
- (b) Hitunglah Jumlah rantai polipeptida pada protein ini.
8. Kecepatan Sintesa α -Keratin Rambut Dalam ukuran manusia, pertumbuhan rambut merupakan proses yang lambat, terjadi pada kecepatan 6 sampai 8

inci/tahun, Semua pertumbuhan ini terpusat pada akar serat rambut, tempat sintesa filamen α -keratin di dalam sel epidermal hidup dan penyusunan menjadi struktur serupa tambang. Unsur struktural dasar α -keratin adalah α -heliks, yang mengandung 3,6 asam amino dan tebal 0,54 nm per putaran. Dengan menganggap bahwa biosintesa rantai keratin α -heliks merupakan faktor pembatas kecepatan pertumbuhan rambut, hitunglah kecepatan pembentukan ikatan peptida rantai α -keratin (ikatan pep tida per detik) untuk menerangkan pengamatan akan pertumbuhan rambut per tahun.

9. Kandungan Sistin Menentukan Sifat-Sifat Mekanis Berbagai Protein Sejumlah protein alami amat kaya akan kandungan sistin, dan sifat mekaniknya (gaya regang, kekentalan, kekerasan, dan sebagainya) berkorelasi dengan kandungan sistin. Sebagai contoh, glutenin, protein yang kaya akan sistin pada gandum, merupakan komponen penyebab sifat merekat dan elastis adonan yang dibuat dari tepung gandum. Serupa dengan itu, sifat keras, dan liat kulit penyusut disebabkan oleh kandungan sistin yang tinggi pada α -keratinnya. Apakah dasar molekuler bagi hubungan antara kandungan sistin dan sifat-sifat mekanis protein?
10. Mengapa Wol Mengkerut? Jika mantel atau kaus kaki terbuat dari wol dicuci di dalam air panas dan/atau dikeringkan dengan pengering listrik, akan terjadi pengkerutan. Dengan pengetahuan anda mengenai struktur α -keratin, bagaimana anda menerangkan hal ini? Sutera, sebaliknya, tidak mengkerut pada kondisi yang sama. Jelaskan!

DAFTAR PUSTAKA

1. Al-Mossawi, A.H., Al-Garawi, Z.S. 2018. *Qualitative tests of amino acids and proteins and enzyme kinetics*. Baghdad: Mustansiriyah University.
2. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
3. Ramus, V. 2020. *Qualitative Tests for Proteins*. <https://www.youtube.com/watch?v=6YPWipP-Qe8&feature=youtu.be> (diakses pada tanggal 15 Oktober 2020).
4. Subroto, E., dkk. 2020. The Analysis Techniques Of Amino Acid And Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
5. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
6. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
7. Thenawidjaja. M. 1990. *Dasar-dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
8. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
9. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
10. Won Chan Kim. *Principles of Biochemistry*. <https://www.kaznaru.edu.kz> . diakses pada tanggal 25 september 2020.

BAB 5 ENZIM

5.1 SIFAT DAN FUNGSI, GUGUS PROSTETIK, REAKSI ENZIM

1. ORIENTASI

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa menguasai pondasi saintifik materi biokimia (CPMK3), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah mahasiswa menguasai pondasi saintifik materi enzim (Sub-CPMK3). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

Enzim sangat erat dengan kehidupan manusia, proses metabolisme yang terjadi pada makhluk hidup berlangsung secara enzimatis. Pada tahun 1878, Wilhelm Kuhne (1837-1900) pertama kali menggunakan istilah "*enzyme*", yang berasal dari bahasa Yunani yang berarti dalam bahan pengembang (ragi), kata ini digunakan untuk menjelaskan bahwa fermentasi alkohol merujuk pada aktivitas kimiawi yang dihasilkan oleh organism hidup. Pada tahun 1907, Eduard Bucher menemukan bahwa enzim dapat bekerja di luar sel hidup, kemudian pada tahun 1926, James B. Summer berhasil mengkristalisasi enzim urease dan menunjukkan bahwa enzim ini merupakan protein murni. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa protein murni dapat berupa enzim dan hal ini secara tuntas dibuktikan oleh Northrop dan Stanley yang meneliti enzim pepsin, tripsin, dan kimotripsin.

Enzim merupakan biomolekul protein yang berfungsi sebagai biokatalis, mengkatalisis reaksi yang terjadi pada makhluk hidup. Pada umumnya reaksi yang terjadi di sel terjadi secara enzimatis. Enzim mengkatalisis reaksi kimia secara efisien dan selektif. Enzim memiliki kekuatan katalitik yang luar biasa, seringkali jauh lebih besar daripada katalis sintesis atau katalis anorganik. Enzim memiliki tingkat spesifisitas yang tinggi untuk substratnya dan sangat mempercepat reaksi kimia.

Enzim berfungsi dalam kondisi suhu dan pH yang optimum, tidak seperti banyak katalis yang digunakan dalam kimia organik. Enzim sangat penting dalam setiap proses biokimia. Enzim mengkatalisasi ratusan reaksi bertahap dari metabolisme, menghemat dan mengubah energi kimia, dan membuat makromolekul biologi dari prekursor sederhana. Pada banyak penyakit, aktivitas satu atau lebih enzim tidak normal. Banyak obat yang bekerja melalui pengikatan pada enzim. Semua enzim adalah protein, tetapi tidak semua protein adalah enzim. Aktivitas katalitiknya bergantung pada integritas konformasi protein aslinya.

Beberapa enzim tidak memerlukan gugus kimia untuk aktivitas selain residu asam aminonya. Tetapi enzim yang lain membutuhkan komponen kimia tambahan dalam melakukan aktivitasnya. Komponen tambahan yang berasal dari molekul anorganik disebut kofaktor, seperti Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} . Apabila molekul berasal dari organik disebut Koenzim seperti Coenzim A. Selanjutnya jenis kofaktor dapat di lihat pada tabel berikut ini.

Tabel 13 Kofaktor

No	Ion	Enzim
1	Cu^{2+}	Sitokrom Oksidase
2	Fe^{2+} atau Fe^{3+}	Sitokrom Oksidase, Katalase, Peroksidase
3	K^{+}	Piruvat kitanase
4	Mg^{2+}	Heksokinase, Glukosa 6-fosfatase, piruvat kitansase
5	Mn^{2+}	Arginase, ribonukleotida reductase
6	Mo	Dinitrogenase
7	Ni^{2+}	Urease
8	Zn^{2+}	Karbonik anhidrase, alkohol dehidrogenase, karbosipeptidase A dan B

Koenzim biasanya bertindak sebagai pembawa sementara dari gugus fungsi tertentu. Sebagian besar berasal dari vitamin, yang merupakan nutrisi organik yang dibutuhkan dalam jumlah kecil dalam makanan. Beberapa enzim membutuhkan koenzim dan satu atau lebih ion logam untuk aktivitas. Koenzim atau ion logam yang terikat sangat erat atau bahkan terikat secara kovalen dengan protein enzim disebut gugus prostetik. Enzim yang lengkap dan aktif secara katalitik bersama dengan koenzim terikat dan/atau ion logam disebut holoenzim. Bagian protein dari enzim semacam itu disebut apoenzim atau apoprotein. Banyak enzim dimodifikasi oleh fosforilasi atau proses lainnya. Modifikasi sering digunakan untuk mengatur aktivitas enzim.

Tabel 14 Koenzim

NO.	Koenzim	Contoh gugus kimia yang ditransfer	Prekursor pada mamalia
1	Biositin	CO ₂	Biotin
2	Koenzim A	Gugus asil	Asam pantotenik dan komponen lainnya
3	5'-deoksiadenosilkobalamin (Koenzim B ₁₂)	Atom H dan gugus alkil	Vitamin B ₁₂
4	Flavin adenin dinukleotida	Elektron	Riboflavin (vitamin B ₂)
5	Lipoat	Elektron dan gugus asil	Tidak diperlukan dalam diet
6	Nikotinamida adenin dinukleotida	Ion hidrat (:H ⁻)	Asam nikotinat (Niacin)
7	Piridoksal fosfat	Gugus amino	Piridoksin (vitamin B ₆)
8	Tetrahidrofolat	Gugus satu-karbon	Folat
9	Tiamin pirofosfat	aldehid	Tiamin (vitamin B ₁)

A. Klasifikasi Enzim

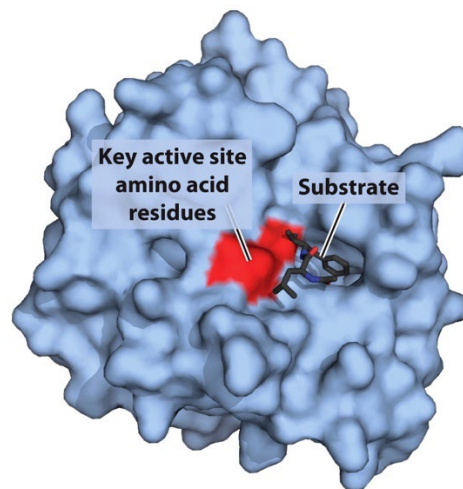
Banyak enzim telah diberi nama dengan menambahkan akhiran "-ase" ke nama substratnya atau pada kata atau frasa yang menjelaskan aktivitasnya. Contoh: substratnya amilum enzimnya amilase, substratnya lipid enzimnya lipase, substratnya urea enzimnya urease, substratnya arginin enzimnya arginase dan lain-lain. Selanjutnya ahli biokimia memberikan nama menurut perjanjian internasional telah mengadopsi sistem penamaan dan klasifikasi enzim berdasarkan jenis reaksi yang dikatalisis. Berdasarkan jenis reaksi yang di katalisis di bagi menjadi 6 golongan enzim.

Tabel 15 Klasifikasi Enzim Internasional

No Kelas	Nama Kelas	Jenis Reaksi yang Dikatalisis
1	Oksidoreduktase	Transfer elektron (Ion hidrida atau atom H).
2	Transferase	Reaksi transfer gugus fungsional
3	Hidrolase	Reaksi hidrolisis (transfer gugus fungsional ke air).
4	Liase	Pemutusan dari C-C, C-O, C-N, atau ikatan lainnya dengan eliminasi, pemisahan ikatan rangkap atau cincin, atau penambahan gugus pada ikatan rangkap.
5	Isomerase	Transfer gugus dalam molekul untuk menghasilkan bentuk isomer.
6	Ligase	Pembentukan ikatan C-C, C-S, C-O dan C-N melalui reaksi kondensasi dengan menggunakan ATP atau kofaktor.

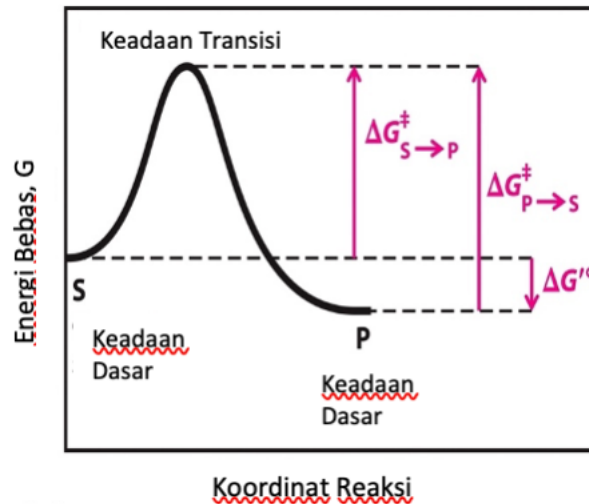
B. Enzim Sebagai Biokatalisator

Dalam kondisi yang relevan secara biologis, reaksi tanpa katalis cenderung lambat karena sebagian besar molekul biologis cukup stabil dalam pH netral, suhu ringan, lingkungan berair di dalam sel. Enzim sangat meningkatkan laju reaksi biologis dengan menyediakan lingkungan spesifik di mana reaksi dapat terjadi lebih cepat. Reaksi yang dikatalisis oleh enzim terjadi pada sisi enzim yang disebut sisi aktif enzim. Molekul reaktan yang bereaksi dengan enzim disebut sebagai substrat. Permukaan sisi aktif enzim merupakan residu asam amino dengan gugus substituen yang mengikat substrat dan mengkatalis transformasi kimianya.



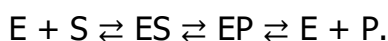
Gambar 115 Sisi aktif Enzim
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Reaksi apa pun, seperti $S \rightleftharpoons P$, dapat dijelaskan dengan diagram koordinat reaksi, di mana perubahan energi bebas selama reaksi digambarkan sebagai fungsi dari kemajuan reaksi. Perubahan energi bebas (ΔG^0), (dan posisi kesetimbangan) reaksi ditentukan oleh perbedaan energi bebas keadaan dasar S dan P. Laju reaksi tergantung pada ketinggian penghalang energi bebas antara S dan P, di puncak ini adalah keadaan transisi. Keadaan transisi bukanlah spesi kimia dengan kestabilan yang signifikan, dan tidak boleh disalahartikan sebagai perantara reaksi.

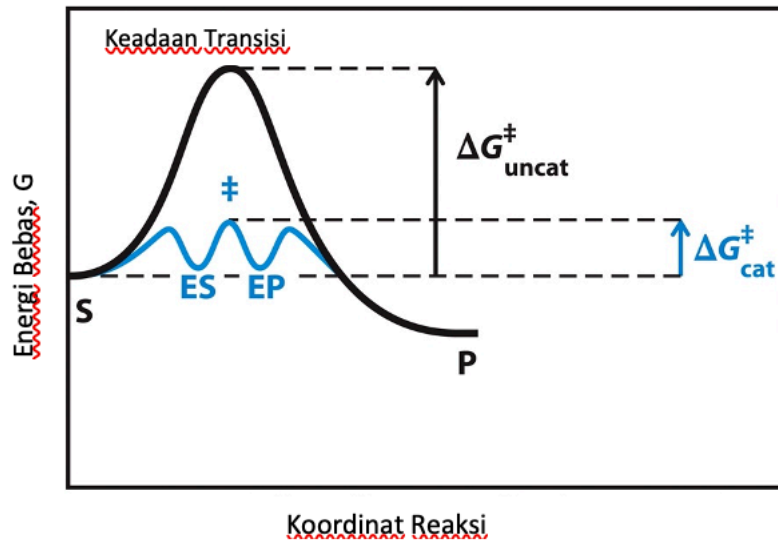


Gambar 116 Keadaan Transisi reaksi enzim

Sebaliknya, ini adalah momen molekuler singkat di mana peristiwa seperti pemutusan ikatan, pembentukan ikatan, dan pengembangan muatan telah berlanjut ke titik di mana peluruhan substrat atau produk sama mungkin. Perbedaan antara tingkat energi keadaan dasar dan keadaan transisi adalah energi aktivasi, ΔG^\ddagger . Laju reaksi berbanding terbalik dan secara eksponensial sebanding dengan nilai ΔG^\ddagger . Seperti katalis lain, enzim meningkatkan laju reaksi dengan menurunkan energi aktivasi. Enzim tidak berpengaruh pada posisi kesetimbangan reaksi. Contoh yang ditunjukkan adalah untuk enzim yang mengikuti langkah enzimatis sederhana.



(E-enzyme; S-substrat; P-product; ES-keadaan transisi antara enzim dan substrat; EP-keadaan transisi enzim-produk). Di hadapan enzim, tiga puncak terjadi dalam diagram koordinat reaksi. Puncak mana pun yang paling tinggi menandakan langkah pembatas laju dari reaksi keseluruhan. Seperti dibahas di bawah ini, energi ikat yang disediakan oleh interaksi enzim dengan keadaan transisi memberikan kontribusi yang kuat untuk menurunkan energi aktivasi reaksi, dan mempercepat laju reaksi.



Gambar 117 Interaksi ES Keadaan Transisi

Hubungan antara K'_{eq} and $\Delta G'^0$. Untuk mendeskripsikan perubahan energi bebas untuk reaksi, ahli kimia menetapkan serangkaian kondisi standar (suhu 298°K ; tekanan parsial setiap gas = 1 atm; konsentrasi setiap zat terlarut 1 M) dan menyatakan perubahan energi bebas untuk sistem reaksi di bawah ini kondisi sebagai ΔG^0 , perubahan energi bebas standar. Karena sistem biokimia biasanya memiliki konsentrasi H^+ jauh di bawah 1 M, ahli biokimia menetapkan perubahan energi bebas standar biokimia, $\Delta G'^0$, perubahan energi bebas standar pada pH 7.0.

Konstanta kesetimbangan untuk suatu reaksi (K'_{eq}) dalam kondisi standar secara matematis terkait dengan perubahan energi bebas standar untuk sebuah reaksi, $\Delta G'^0$, melalui persamaan $\Delta G'^0 = -2.303 RT \log K'_{eq}$. Dalam persamaan ini, R adalah konstanta gas, $8,315 \text{ J / mol.K}$, dan T adalah suhu absolut, 298°K (25°C). Nilai numerik untuk $\Delta G'^0$ sebagai fungsi K'_{eq} ditabulasikan pada Tabel dibawah ini. Perhatikan bahwa nilai negatif yang besar dari $\Delta G'^0$ mencerminkan kesetimbangan yang menguntungkan di mana rasio produk terhadap reaktan jauh lebih besar dari 1/1.

Tabel 16 Hubungan Antara K'_{eq} dan $\Delta G'^0$

K'_{eq}	$\Delta G'^0$ (kJ/mol)
10^{-6}	34.2
10^{-5}	28.5
10^{-4}	22.8
10^{-3}	17.1
10^{-2}	11.4
10^{-1}	5.7
1	0.0
10^1	-5.7
10^2	-11.4
10^3	-17.1

Catatan : Hubungan ini dihitung dari $\Delta G'^0 = -RT \ln K'_{eq}$

Hubungan antara ΔG^\ddagger dan kecepatan reaksi. Laju reaksi kimia ditentukan oleh konsentrasi reaktan dan oleh konstanta laju yang biasanya dilambangkan dengan k. Untuk reaksi unimolekuler $S \rightarrow P$, laju (atau kecepatan) reaksi V, mewakili jumlah S yang bereaksi per satuan waktu dinyatakan dengan persamaan laju, $V = k [S]$.

Dalam reaksi ini, kecepatannya hanya bergantung pada konsentrasi S. Ini adalah reaksi orde pertama. Faktor k adalah konstanta proporsionalitas yang mencerminkan probabilitas reaksi di bawah serangkaian kondisi (pH, suhu, dan lain-lain). Di sini, k adalah konstanta laju orde pertama dan memiliki satuan (s^{-1}). Jika laju reaksi bergantung pada konsentrasi dua senyawa yang berbeda, atau jika reaksi terjadi antara dua molekul dari senyawa yang sama, maka reaksinya adalah orde dua dan k adalah konstanta laju orde dua, satuan $M^{-1}s^{-1}$.

Persamaan laju kemudian menjadi $V = k [S1] [S2]$. Dari kimia fisika, dapat diturunkan bahwa besarnya konstanta laju berbanding terbalik dan secara eksponensial

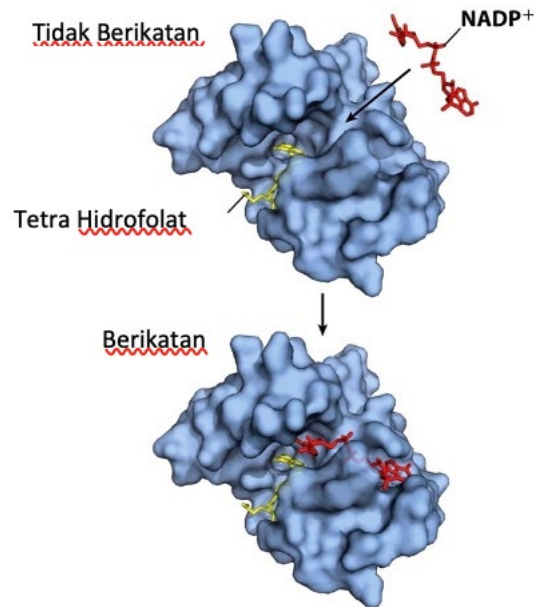
berkaitan dengan energi aktivasi, $\Delta G \ddagger$. Jadi, energi aktivasi yang lebih rendah berarti laju reaksi yang lebih cepat.

Kekuatan katalitik dan spesifik enzim. Enzim biasanya menghasilkan peningkatan kecepatan reaksi dalam kisaran 5 hingga 17 lipat seperti pada tabel dibawah ini. Enzim juga sangat spesifik, mudah membedakan antara substrat dengan struktur yang sangat mirip. Peningkatan laju yang diamati untuk enzim berasal dari dua bagian yang berbeda tetapi saling terkait. Pertama, gugus fungsi katalitik pada enzim bereaksi dengan substrat dan menurunkan penghalang energi aktivasi untuk reaksi dengan memberikan jalur reaksi alternatif berenergi rendah.

Tabel 17 Beberapa Peningkatan Kecepatan reaksi oleh enzim

No	Enzim	Peningkatan Kecepatan
1	Siklofilin	10^5
2	Karbonat anhidrase	10^7
3	Triose fosfat isomerase	10^9
4	Karboksipeptidase A	10^{11}
5	Fosfoglukomutase	10^{12}
6	Suksinil Ko-A transferase	10^{13}
7	Urease	10^{14}
8	Oritidine monofosfat dekarboksilase	10^{17}

Sisi aktif enzim memiliki kontur permukaan yang melengkapi bentuknya dengan substrat (dan produk). Hal ini diilustrasikan untuk dua substrat enzim dihidrofolat reduktase pada gambar dibawah ini. Komplementaritas struktural bertanggung jawab atas spesifisitas yang tinggi dari reaksi enzim. Gagasan bahwa enzim dan substrat saling melengkapi satu sama lain pertama kali dikemukakan oleh ahli kimia organik, Emil Fisher, pada tahun 1894. Dia menyatakan bahwa kedua komponen tersebut cocok bersama seperti gembok dan kunci. Model ini sangat mempengaruhi perkembangan biokimia.



Gambar 118 Enzim dan Subtrat
 Sumber: Nelson & Cox, 2013

Bentuk komplementer dari substrat dan tempat pengikatannya pada enzim, seperti halnya enzim dihidrofolat reduktase dengan substratnya NADP⁺ bentuk yang tidak terikat dan bentuk yang terikat, serta substrat terikat lainnya, tetrahydrofolate. Dalam model ini, NADP⁺ mengikat kantong yang melengkapinya dalam bentuk dan sifat ionik, sebuah ilustrasi dari hipotesis "gembok dan kunci" Emil Fischer tentang reaksi enzim. Pada kenyataannya, komplementaritas antara protein dan ligan jarang terjadi sempurna.

Substrat dan gugus fungsi enzim (rantai samping asam amino spesifik, ion logam, dan koenzim) merupakan gugus fungsi katalitik pada enzim dapat membentuk ikatan kovalen sementara dengan substrat dan mengaktifkannya untuk reaksi, atau gugus dapat dipindahkan dari substrat ke enzim. Dalam banyak kasus, reaksi ini hanya terjadi di situs aktif enzim. Interaksi kovalen antara enzim dan substrat menurunkan energi aktivasi (dengan demikian mempercepat reaksi) dengan menyediakan jalur reaksi alternatif dengan energi lebih rendah. Bagian kedua dari penjelasan terletak pada interaksi nonkovalen antara enzim dan substrat. Interaksi nonkovalen yang lemah membantu menstabilkan struktur protein dan interaksi protein-protein. Interaksi yang sama ini sangat penting untuk pembentukan

kompleks antara protein dan molekul kecil, termasuk substrat enzim. Sebagian besar energi yang dibutuhkan untuk menurunkan energi aktivasi berasal dari interaksi nonkovalen yang lemah antara substrat dan enzim.

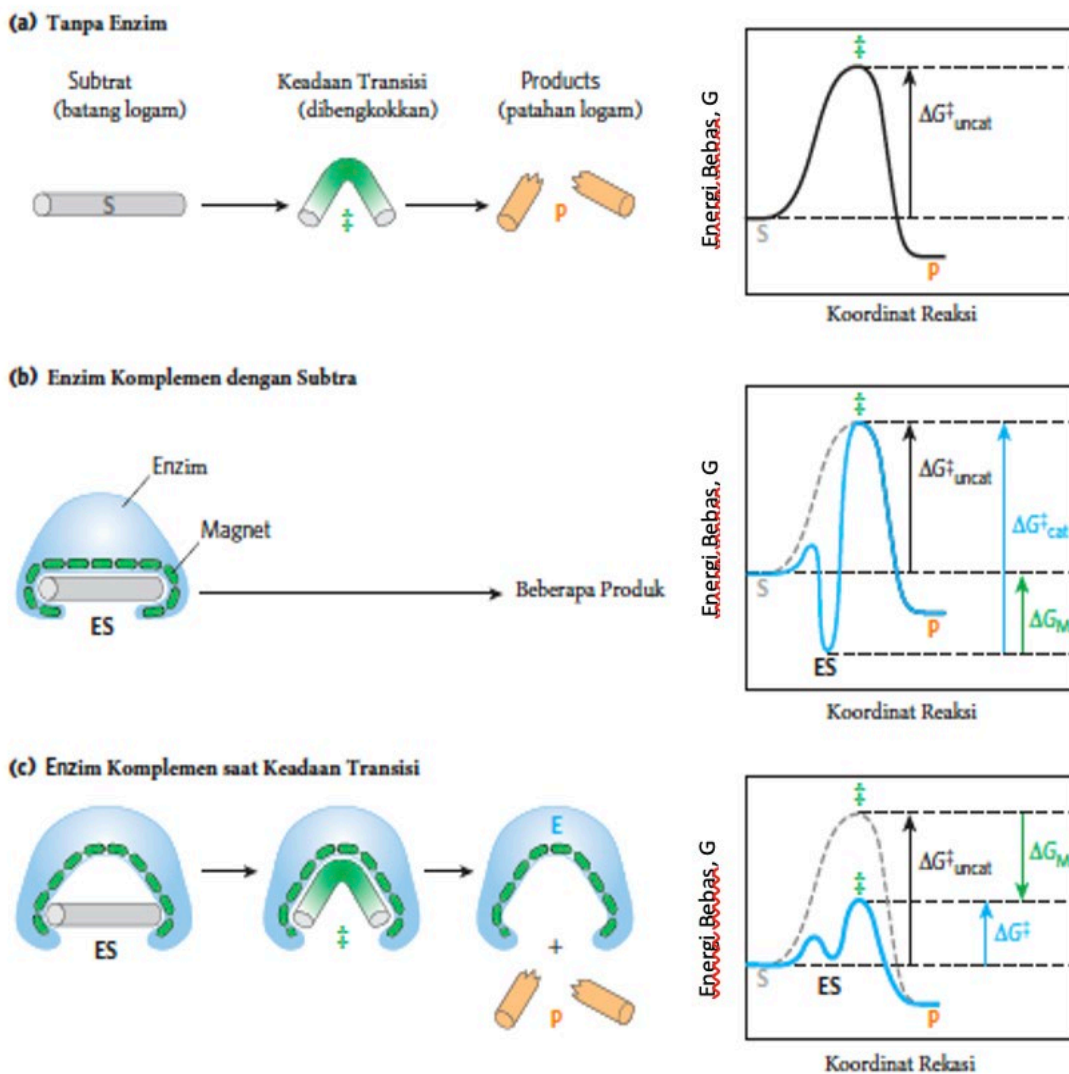
Apa yang benar-benar membedakan enzim dari kebanyakan katalis lainnya adalah pembentukan kompleks ES tertentu. Interaksi antara substrat dan enzim dalam kompleks ini dimediasi oleh kekuatan yang sama yang menstabilkan struktur protein, termasuk ikatan hidrogen dan interaksi hidrofobik dan ionik. Pembentukan setiap interaksi lemah di kompleks ES disertai dengan pelepasan sejumlah kecil energi bebas yang menstabilkan interaksi. Energi yang berasal dari interaksi sub enzim disebut energi ikat, ΔG_B . Signifikansinya melampaui stabilisasi sederhana dari interaksi enzim-substrat. Energi ikat adalah sumber utama energi bebas yang digunakan oleh enzim untuk menurunkan energi aktivasi reaksi.

Dua prinsip dasar dan saling terkait memberikan penjelasan umum tentang bagaimana enzim menggunakan energi ikat nonkovalen: Pertama, sebagian besar kekuatan katalitik enzim pada akhirnya berasal dari energi bebas yang dilepaskan dalam membentuk banyak ikatan lemah dan interaksi antara enzim dan substratnya. Energi ikat ini berkontribusi pada spesifisitas serta katalisis. Kedua adalah interaksi lemah dioptimalkan dalam keadaan transisi reaksi; situs aktif enzim saling melengkapi bukan dengan substrat itu sendiri tetapi dengan keadaan transisi yang dilalui substrat saat mereka diubah menjadi produk selama reaksi enzimatik.

Interaksi lemah antara enzim dan substrat dioptimalkan dalam keadaan transisi. Bagaimana cara enzim menggunakan energi ikat untuk menurunkan energi aktivasi suatu reaksi?. Pembentukan kompleks ES bukanlah penjelasan itu sendiri, meskipun beberapa pertimbangan awal mekanisme enzim dimulai dengan ide ini. Studi tentang spesifisitas enzim yang dilakukan oleh Emil Fischer membuatnya mengusulkan, pada tahun 1894, bahwa enzim secara struktural melengkapi substratnya, sehingga mereka cocok bersama seperti gembok dan kunci. Ide ini bahwa interaksi spesifik (eksklusif) antara dua molekul biologi dimediasi oleh permukaan molekul dengan bentuk yang saling melengkapi, telah sangat mempengaruhi perkembangan biokimia, dan interaksi semacam itu terletak di jantung banyak proses biokimia. Namun, hipotesis "gembok dan kunci" dapat menyesatkan ketika diterapkan pada katalisis enzimatik.

Hal ini sedikit menyulikan karena komplementaritas yang tepat antara enzim dan substratnya akan menjadi kontraproduktif untuk katalisis yang efisien. Peneliti biokimia kemudian menyadari bahwa enzim harus lebih melengkangi keadaan transisi reaksi daripada ke substrat agar katalisis efisien terjadi. Teori selanjutnya enzim dan substrat dapat bereaksi melalui mekanisme Induced Fit.

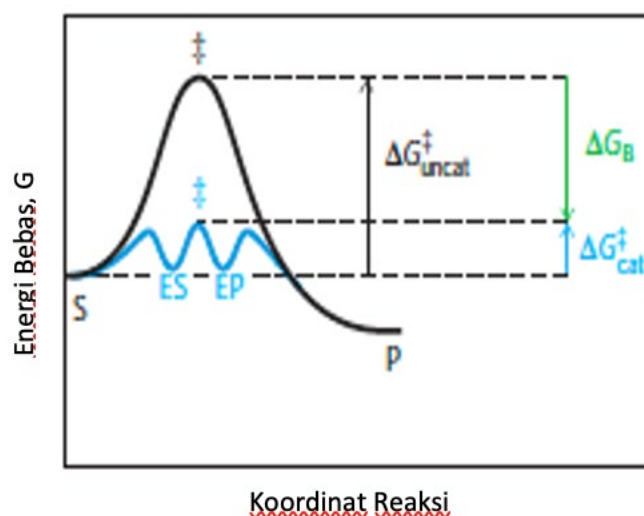
Komplementaritas status transisi menjelaskan peningkatan kecepatan, pentingnya komplementaritas keadaan transisi untuk peningkatan laju reaksi dapat diilustrasikan dengan menggunakan contoh "stickase" hipotetis yang mengkatalisis kerusakan batang logam, dan mengikat substrat melalui interaksi magnetik gambar dibawah ini. Dalam reaksi tanpa katalis, (Bagian a), batang harus terlebih dahulu ditekuk ke struktur keadaan transisi sebelum dipatahkan.



Gambar 119 Reaksi katalitik enzim
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Karena penghalang energi aktivasi yang tinggi dari keadaan transisi batang bengkok, reaksi keseluruhan (yang memiliki perubahan energi bebas negatif) adalah relatif lambat. Jika *stickase* benar-benar melengkangi batang logam (Bagian b), laju reaksi tidak akan meningkat karena enzim sebenarnya akan menstabilkan struktur logam. Di bawah kondisi ini, kompleks ES sesuai dengan palung dalam diagram koordinat reaksi yang menyebabkan substrat kesulitan keluar. Namun, jika *stickase* lebih melengkangi keadaan transisi reaksi (Bagian c), maka peningkatan energi bebas yang dibutuhkan untuk menarik tongkat ke dalam konformasi bengkok dan rusak sebagian akan diimbangi, atau dibayar, oleh interaksi magnetik (energi pengikat) antara enzim dan substrat dalam keadaan transisinya. Pembayaran energi ini diterjemahkan menjadi energi aktivasi bersih yang lebih rendah dan laju reaksi yang lebih cepat.

Enzim nyata bekerja dengan prinsip analog. Beberapa interaksi lemah terbentuk dalam kompleks ES, tetapi interaksi lengkap yang saling melengkangi antara substrat dan enzim hanya terbentuk ketika substrat mencapai keadaan transisi. Energi bebas (energi ikat) yang dilepaskan oleh pembentukan interaksi ini mengimbangi sebagian energi yang dibutuhkan untuk mencapai puncak energi. Penjumlahan energi aktivasi yang tidak menguntungkan (positif) ΔG^\ddagger dan energi ikat ΔG_B yang menguntungkan (negatif) menghasilkan energi aktivasi bersih yang lebih rendah seperti gambar di bawah ini.



Gambar 120 Energi bebas ΔG_B

Pada enzim, keadaan transisi bukanlah spesi yang stabil tetapi merupakan titik waktu singkat yang dihabiskan substrat pada puncak energi. Reaksi dengan katalis enzim jauh lebih cepat daripada proses tanpa katalis karena kurvanya jauh lebih kecil. Poin penting adalah bahwa interaksi pengikatan yang lemah antara enzim dan substrat memberikan kekuatan pendorong yang substansial untuk katalisis enzimatik. Kontribusi Energi Ikatan terhadap Spesifisitas Reaksi dan Katalisis. Agar reaksi berlangsung, faktor fisik dan termodinamika yang signifikan yang berkontribusi terhadap ΔG^\ddagger harus diatasi, Ini termasuk:

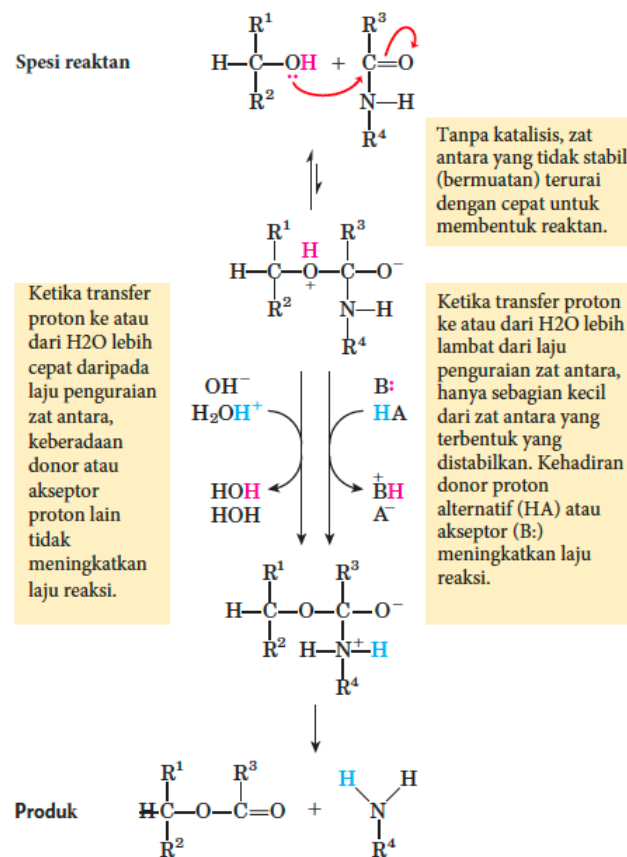
- 1) entropi (kebebasan bergerak) molekul dalam larutan, yang mengurangi kemungkinan enzim akan bereaksi bersama,
- 2) bagian luar molekul air berikatan hidrogen yang mengelilingi dan membantu menstabilkan sebagian besar biomolekul dalam larutan,
- 3) distorsi substrat yang harus terjadi dalam banyak reaksi, dan
- 4) kebutuhan untuk penyesuaian gugus fungsi katalitik pada enzim.

Semua faktor ini dapat diatasi karena energi ikat yang dilepaskan pada interaksi enzim dengan keadaan transisi, seperti yang dijelaskan pada slide berikutnya. Energi ikatan juga memberi enzim kekhususannya, yaitu kemampuan enzim untuk membedakan antara substratnya dan molekul pesaing dengan struktur serupa. Mekanisme di mana energi ikat mengkompensasi faktor fisik dan termodinamika yang menghambat laju reaksi adalah sebagai berikut.

- 1) Reduksi entropi: Pembatasan gerakan dua substrat yang akan bereaksi adalah salah satu manfaat mengikatnya ke enzim. Energi pengikat menahan substrat dalam orientasi yang tepat untuk bereaksi - kontribusi substansial untuk katalisis, karena tumbukan produktif antar molekul di larutan bisa sangat jarang.
- 2) Distorsi substrat: Energi ikatan yang melibatkan interaksi lemah yang terbentuk hanya dalam keadaan transisi reaksi membantu mengkompensasi distorsi secara termodinamika, terutama redistribusi elektronik, yang harus dialami substrat untuk bereaksi.
- 3) Penjajaran gugus katalitik: Enzim biasanya mengalami perubahan konformasi saat ikatan substrat yang disebabkan oleh beberapa interaksi lemah dengan substrat. Penyesuaian gugus fungsi katalitik disebut sebagai induksi fit, dan

berfungsi untuk membawa gugus fungsi tertentu pada enzim ke posisi yang tepat untuk mengkatalisis reaksi.

Kontribusi Lain untuk Katalisis Enzim: Katalisis Asam-basa Umum. Banyak reaksi biokimia melibatkan pembentukan zat antara bermuatan tidak stabil yang cenderung cepat rusak menjadi spesi pereaksi penyusunnya, sehingga memperlambat reaksi gambar disamping. Perantara bermuatan seringkali dapat distabilkan dengan transfer proton ke atau dari substrat atau zat antara untuk membentuk spesi yang lebih mudah terurai menjadi produk.

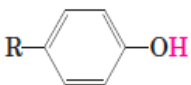
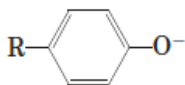


Gambar 121 Mekanisme reaksi enzim sebagai Katalis.

Pada Gambar 121 bagaimana katalis menghindari pengembangan muatan yang tidak menguntungkan selama pembelahan amida. Hidrolisis ikatan amida, yang ditunjukkan di sini, adalah reaksi yang sama seperti yang dikatalisis oleh kimotripsin dan protease lainnya. Pengembangan muatan tidak menguntungkan dan dapat dielakkan dengan pemberian proton oleh H₃O⁺ (katalisis asam spesifik) atau HA (katalisis asam umum), di mana HA mewakili asam apa pun. Demikian pula, muatan

dapat dinetralkan dengan abstraksi proton oleh OH⁻ (katalis basa spesifik) atau B: (katalis basa umum), di mana B: mewakili basa apa pun.

Katalisis, seperti dalam reaksi kimia organik, yang hanya menggunakan ion H⁺ atau OH⁻ yang ada dalam larutan disebut dengan katalisis asam basa spesifik. Transfer proton yang dimediasi oleh asam dan basa lemah selain air, seperti gugus fungsi dalam rantai samping asam amino, disebut sebagai katalisis asam basa umum. Rantai samping asam amino yang umumnya terlibat dalam katalisis asam-basa umum tercantum pada Gambar dibawah ini.

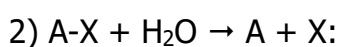
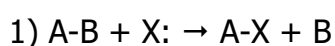
Residu Asam Amino	Bentuk Asam (donor proton)	Bentuk Basa (aseptor proton)
Glu, Asp	R-COOH	R-COO ⁻
Lys, Arg	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{R}-\text{N}^+\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$	R-NH ₂
Cys	R-SH	R-S ⁻
His	$\begin{array}{c} \text{R}-\text{C}=\text{CH} \\ / \quad \backslash \\ \text{HN} \quad \text{N}^+\text{H} \\ \backslash \quad / \\ \text{C} \\ \\ \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{R}-\text{C}=\text{CH} \\ / \quad \backslash \\ \text{HN} \quad \text{N} \\ \backslash \quad / \\ \text{C} \\ \\ \text{H} \end{array}$
Ser	R-OH	R-O ⁻
Tyr		

Gambar 122 Bentuk Asam dan Basa Residu Asam Amino

Dalam katalisis kovalen, ikatan kovalen transien terbentuk antara enzim dan substrat. Pertimbangkan hidrolisis ikatan antara grup A dan B:



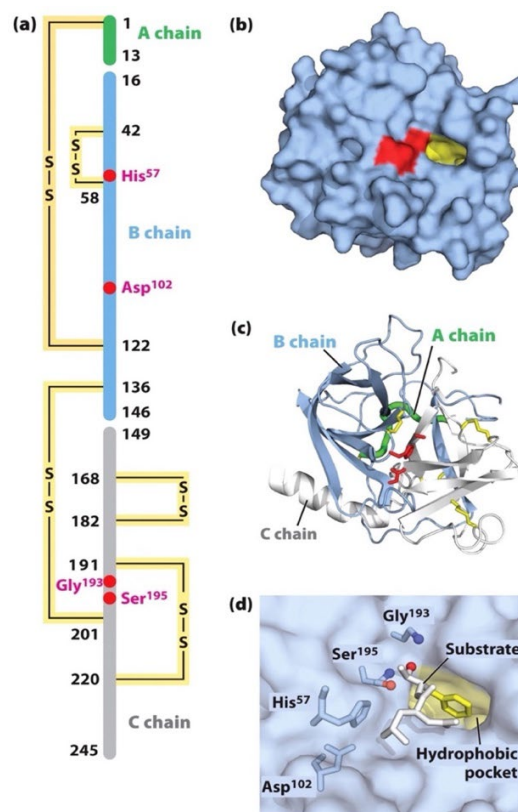
Dengan adanya katalis kovalen (enzim dengan gugus nukleofilik X:, reaksinya menjadi:



Ini mengubah jalur reaksi, dan menghasilkan katalisis jika jalur baru memiliki energi aktivasi yang lebih rendah daripada jalur yang tidak dikatalisis. Kedua langkah baru

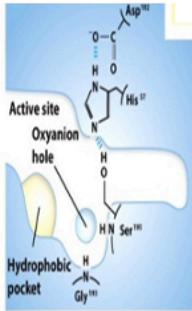
tersebut harus lebih cepat daripada reaksi tanpa katalis. Sejumlah rantai samping asam amino, termasuk semua gugus fungsi dari beberapa kofaktor enzim dapat berfungsi sebagai nukleofil dalam pembentukan ikatan kovalen dengan substrat. Kompleks kovalen ini selalu mengalami reaksi lebih lanjut untuk meregenerasi enzim bebas. Kontribusi Lain untuk Katalisis Enzim: Katalisis Ion Logam, logam, apakah terikat erat dengan enzim atau diambil dari larutan bersama dengan substrat, dapat berpartisipasi dalam katalisis dengan beberapa cara. Interaksi ionik antara logam terikat enzim dan substrat dapat membantu mengarahkan substrat untuk reaksi atau menstabilkan keadaan transisi reaksi bermuatan. Penggunaan interaksi pengikatan lemah antara logam dan substrat ini mirip dengan beberapa penggunaan energi pengikatan enzim-substrat yang dijelaskan sebelumnya. Logam juga dapat memediasi reaksi reduksi oksidasi dengan perubahan reversibel dalam bilangan oksidasi ion logam. Hampir sepertiga dari semua enzim membutuhkan satu atau lebih ion logam untuk aktivitas katalitik.

Mekanisme reaksi enzim, struktur chymotrypsin.

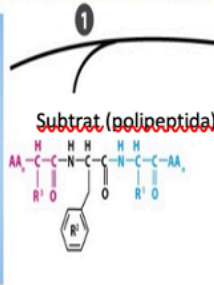


Gambar 123 struktur chymotrypsin

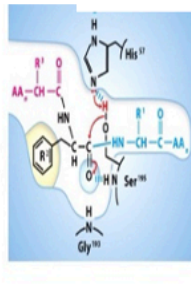
Kimotripsin (enzim bebas)



Ketika substrat mengikat rantai, sampai residu yang berdekatan dengan ikatan peptida yang akan bereaksi berlokasi dikantong hidrofobik pada enzim, memosisikan ikatan peptida untuk diserang.

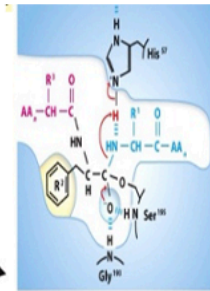


Kompleks Enzim-Substrat

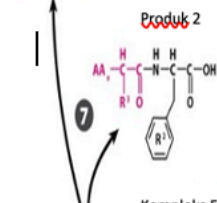


Interaksi Ser195 dan His57 menghasilkan ion alkoksida, yang sangat nukleofilik pada Ser195; ion tersebut menyerang gugus karbonyl peptida, membentuk asil-enzim tetrahedral. Hal ini disertai dengan pembentukan muatan negatif sementara pada oksigen karbonyl substrat yang distabilkan oleh ikatan hidrogen di lubang oksianion.

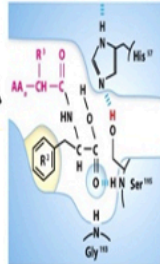
Kedadaan Intermediet (Aksilasi)



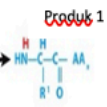
Ketidakstabilan muatan negatif pada substrat oksigen karbonyl menyebabkan runtuhnya intermediet tetrahedral; perombakan kembali ikatan rangkai dengan karbon menyebabkan ikatan antara karbon dan gugus amino dari ikatan peptida, memutus ikatan peptida. Gugus amino dipotongkan oleh His57, untuk memfasilitasi perombakannya.



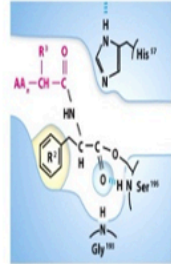
Kompleks Enzim-Produk 2



Disosiasi produk kedua dari situs aktif, membebaskan enzim bebas.

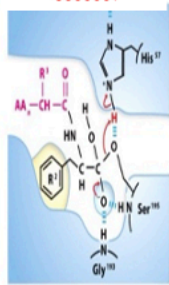


Acyl-enzyme intermediate

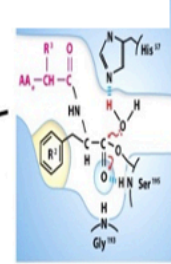


Nukleofil	Elektrofil
$-\text{O}^-$ Oksigen bermuatan negatif (seperti dalam gugus hidroksil yang tidak terprotonasi atau asam karboksilat yang terionisasi)	$\text{C}=\text{O}$ Atom karbon dari gugus karbonyl (oksigen yang lebih elektronegatif dari gugus karbonyl menarik elektron menjauh dari karbon)
$-\text{S}^-$ sulfhidril bermuatan negatif	$\text{C}=\text{N}^+$ Gugus amina terprotonasi (diaktifkan untuk serangan nukleofilik pada karbon dengan protonasi amina)
C^- karbanion	$\text{O}=\text{P}(\text{O})_2\text{R}$ Fosfor dari gugus fosfat
$-\text{N}^-$ Gugus amina tidak bermuatan	H^+ Proton
HN (imidazol ring) imidazol	
$\text{H}-\text{O}^-$ Ion hidroksida	

Intermediet (deakilasi)



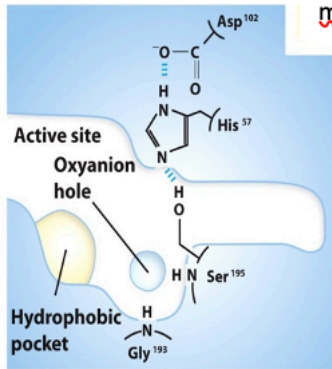
Asil-Enzim intermediet



Busabunya intermediet tetrahedral membentuk produk kedua, anion karboksilat, dan membebaskan Ser195.

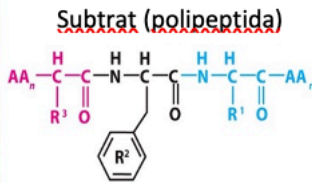
Molekul air yang masuk diaktifkan oleh katalisis basa, membebaskan ion hidroksida nukleofilik yang kuat. Serangan hidroksida pada ikatan ester dari asil-enzim menghasilkan intermediet tetrahedral kedua, dengan oksigen di lubang oksianion kembali mengambil muatan negatif.

Kimotripsin (enzim bebas)

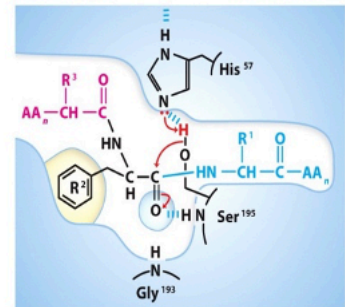


Ketika substrat mengikat, rantai samping residu yang berdekatan dengan ikatan peptida yang akan bereaksi berlokasi dikantong hidrofobik pada enzim, memposisikan ikatan peptida

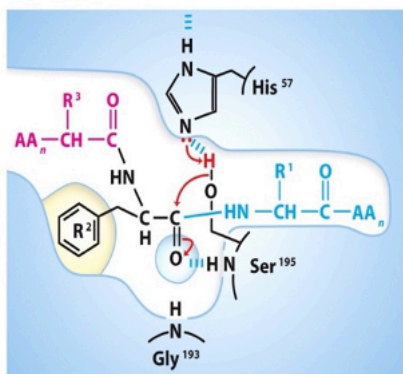
1



Kompleks Ezim-Substrat



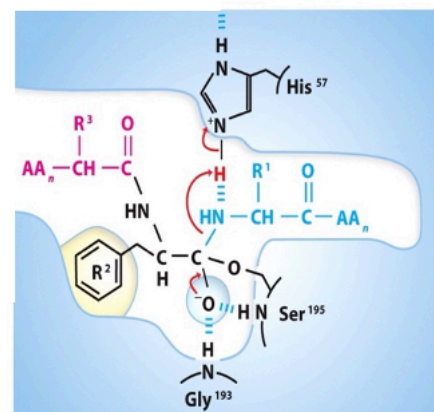
Kompleks Ezim-Substrat



Interaksi Ser195 dan His57 menghasilkan ion alkoksida yang sangat nukleofilik pada Ser195; ion menyerang gugus karbonil peptida, membentuk asil-enzim tetrahedral. Hal ini disertai dengan pembentukan muatan negatif sementara, pada oksigen karbonil substrat, yang distabilkan oleh ikatan hidrogen di lubang oksianion,

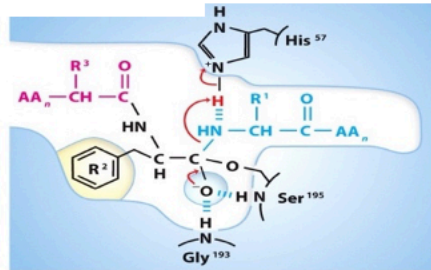
2

Keadaan intermediat (Akilasi)

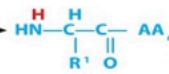


Keadaan
intermediet
(Akilasi)

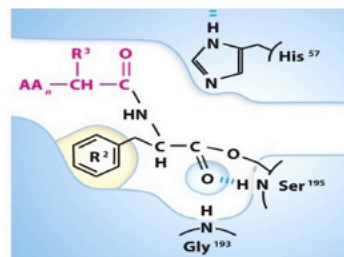
Ketidastabilan muatan negatif pada substrat oksigen karbonil menyebabkan runtuhnya intermediet tetrahedral; pembentukan kembali ikatan rangkap dengan karbon menggantikan ikatan antara karbon dan gugus amino dari ikatan peptida, memutus ikatan peptida. Gugus pergi amino diprotonkan oleh His57, untuk memfasilitasi perpindahannya.



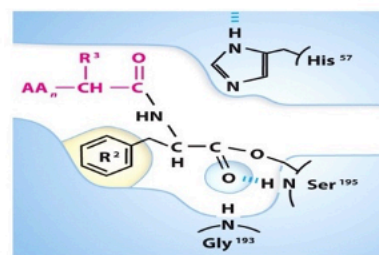
Produk 1



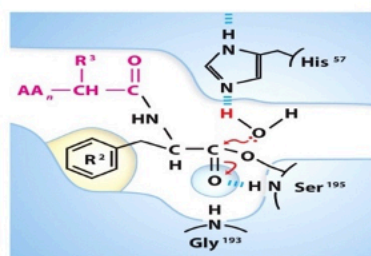
Intermediet Asil-Enzim



Intermediet Asil-Enzim

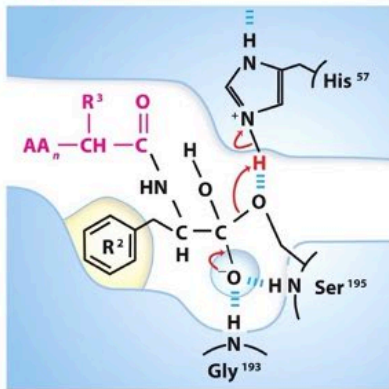


Intermediet Asil-Enzim

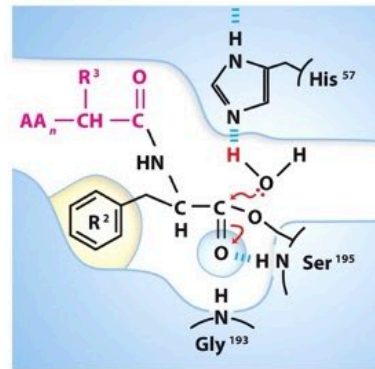


Molekul air yang masuk dideprotonasi oleh katalisis basa, menghasilkan ion hidroksida nukleofilik yang kuat. Serangan hidroksida pada ikatan ester dari asil-enzim menghasilkan intermediet tetrahedral kedua, dengan oksigen di lubang oksianion kembali mengambil muatan negatif.

Keadaan intermediet (de Akilasi)



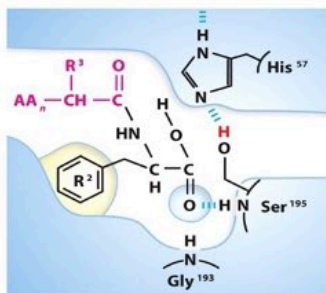
Intermediat Asil-Enzim



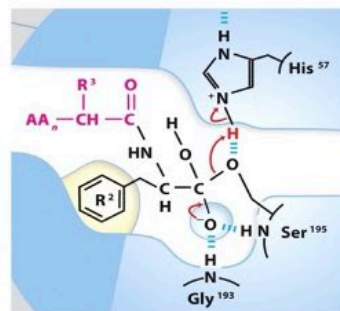
5

Rusaknya intermediet tetrahedral membentuk produk kedua, anion karboksilat, dan menggantikan Ser195.

Kompleks Enzim Produk 2



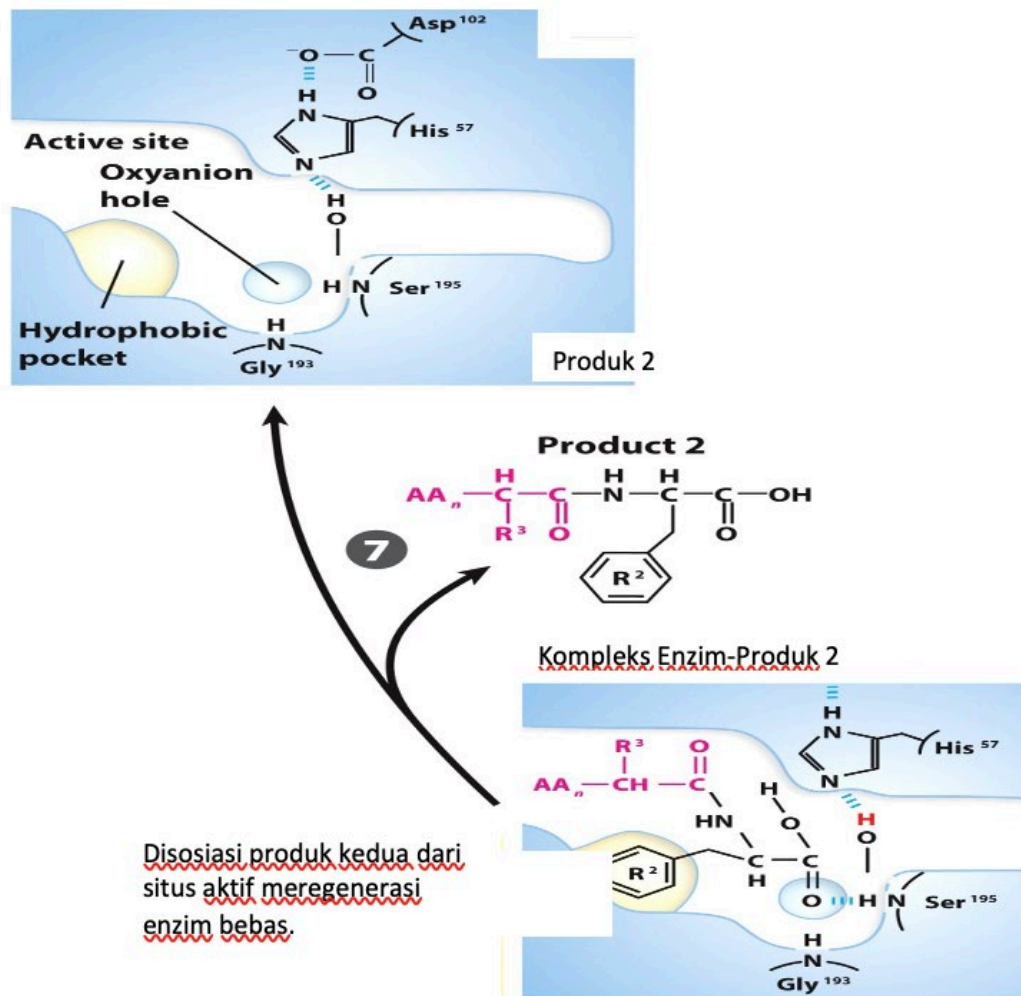
Intermediat (deakilasi)



6

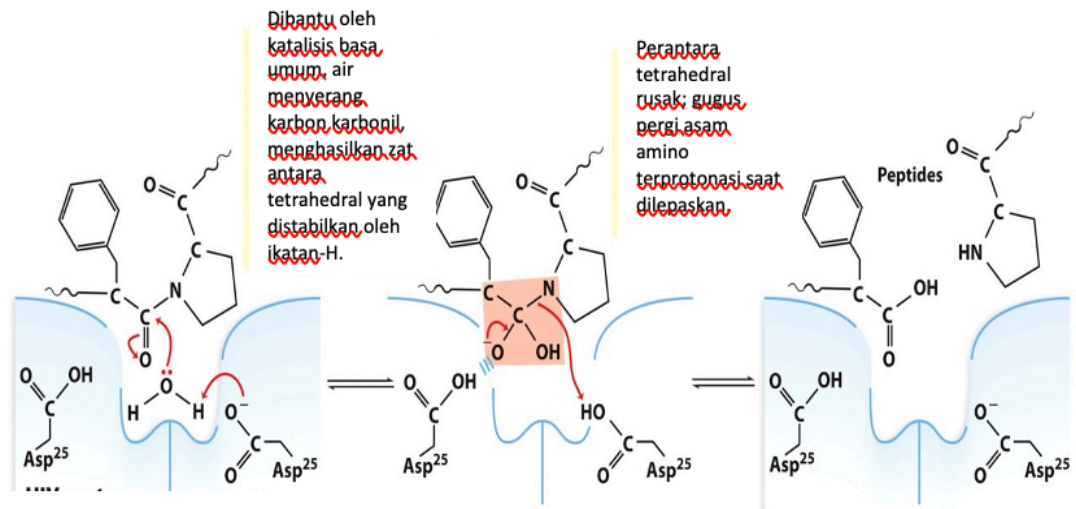
Rusaknya intermediet tetrahedral membentuk produk kedua, anion karboksilat, dan menggantikan Ser195.

Kimotripsin (Enzim Bebas)



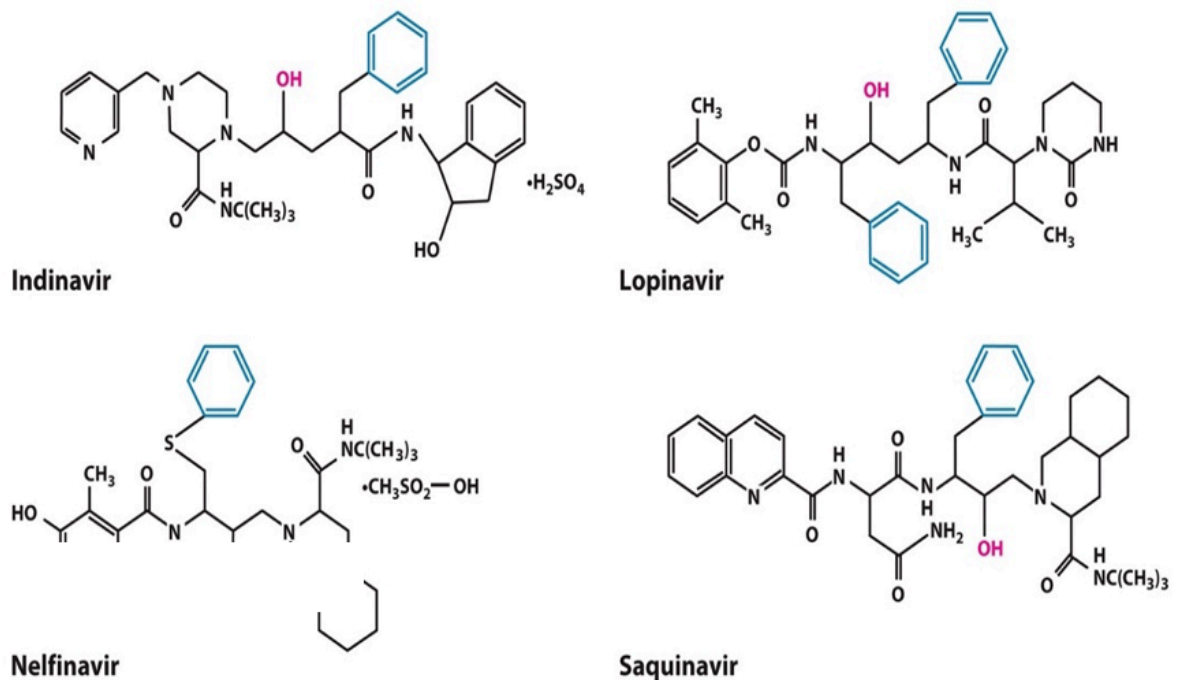
Gambar 124. Mekanisme reaksi kimotripsin
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Mekanisme reaksi HIV protease



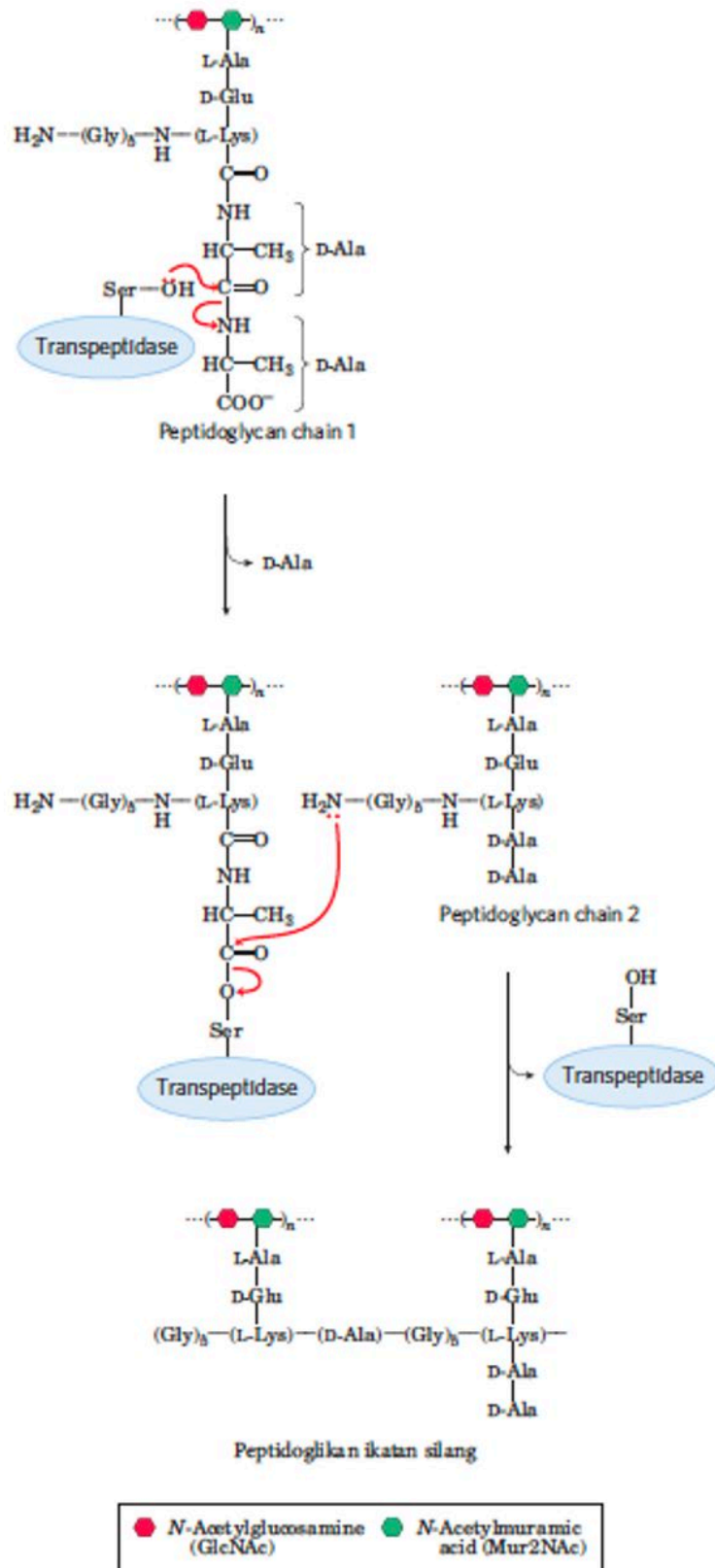
Gambar 125 Mekanisme reaksi HIV protease

Inhibitor HIV protease



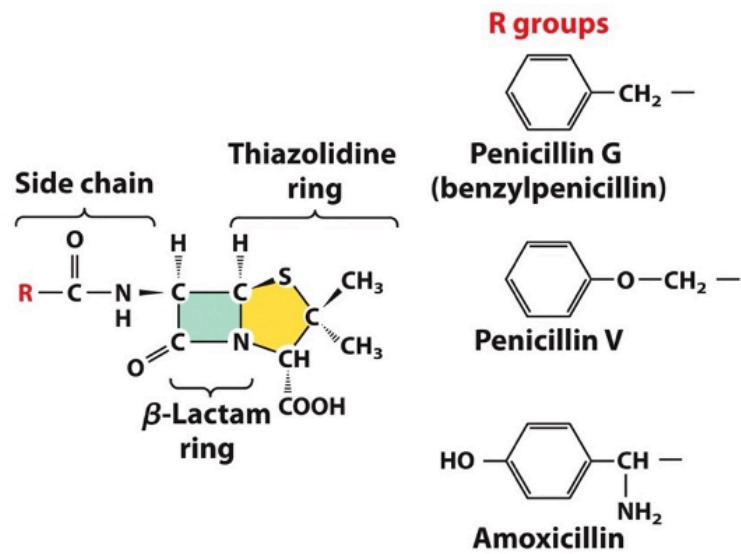
Gambar 126 Inhibitor HIV protease

Reaksi transpeptidase

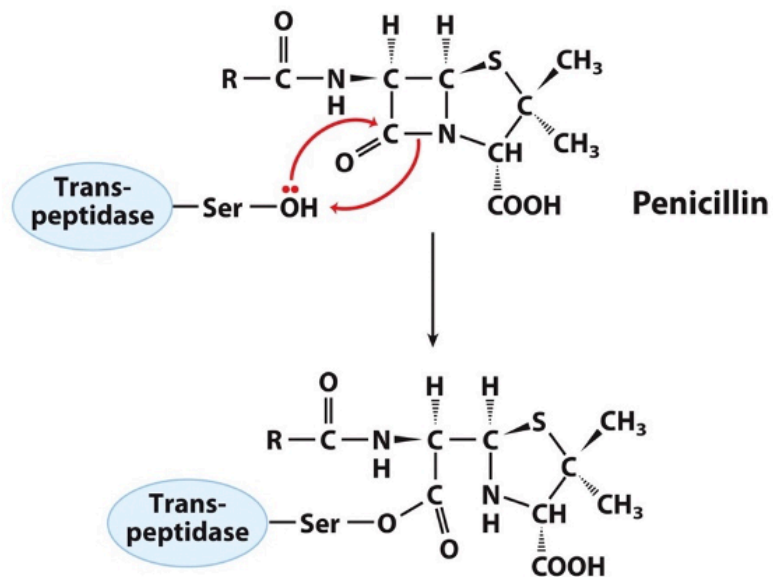


Gambar 127 Reaksi transpeptidase

Mekanisme Reaksi penisilin

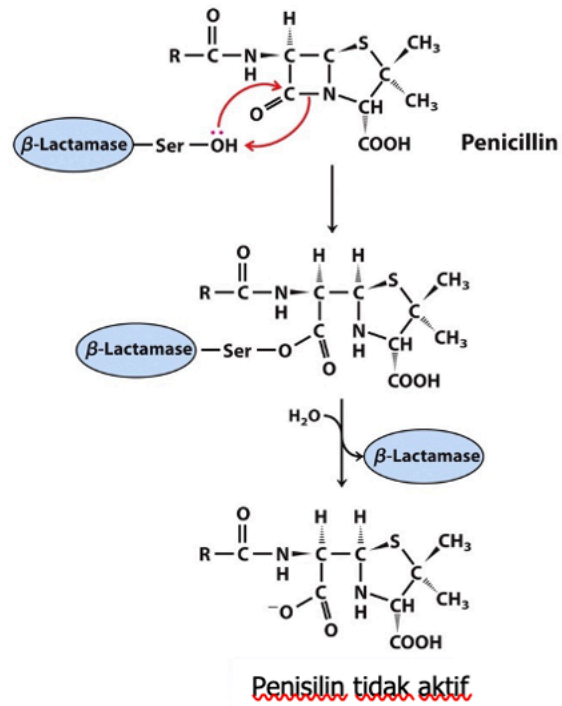


Struktur umum Penisilin

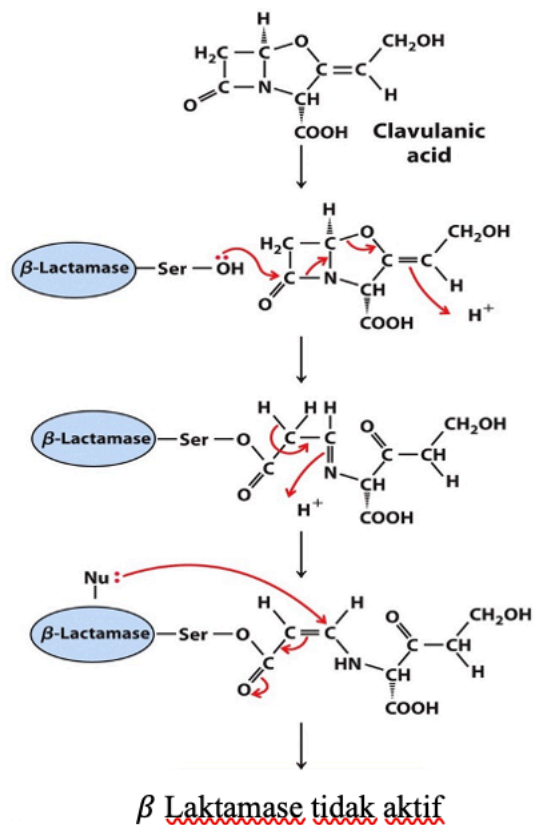


Kesetabilan menurun,
transpeptidase tidak aktif

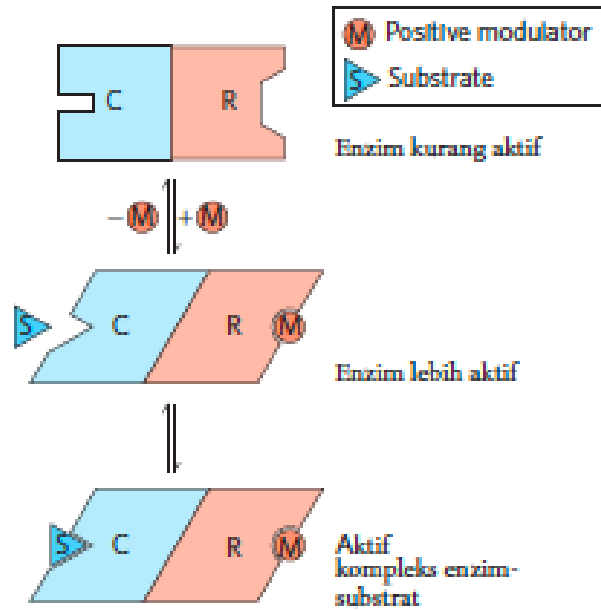
Beta laktamase menonaktifkan penisilin



Inaktivasi beta laktamase oleh asam klavulanat

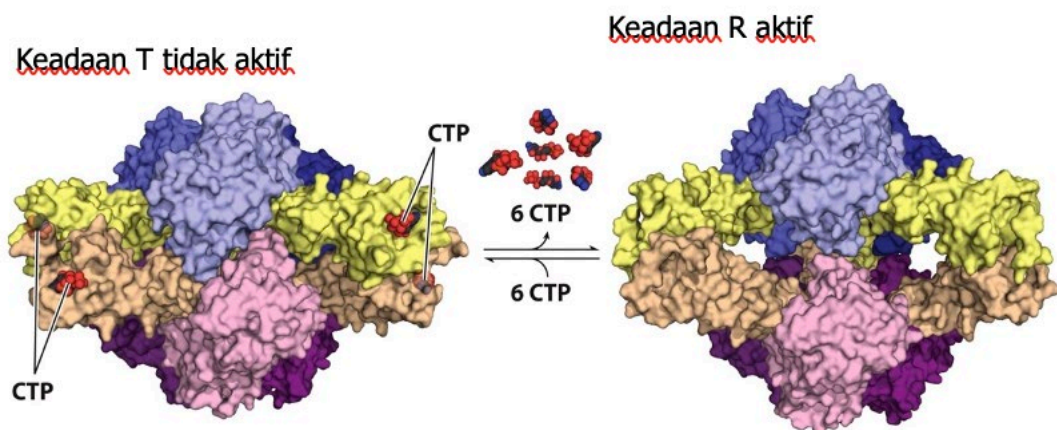


Interaksi subunit dalam enzim alosterik, dan interaksi dengan inhibitor dan activator.



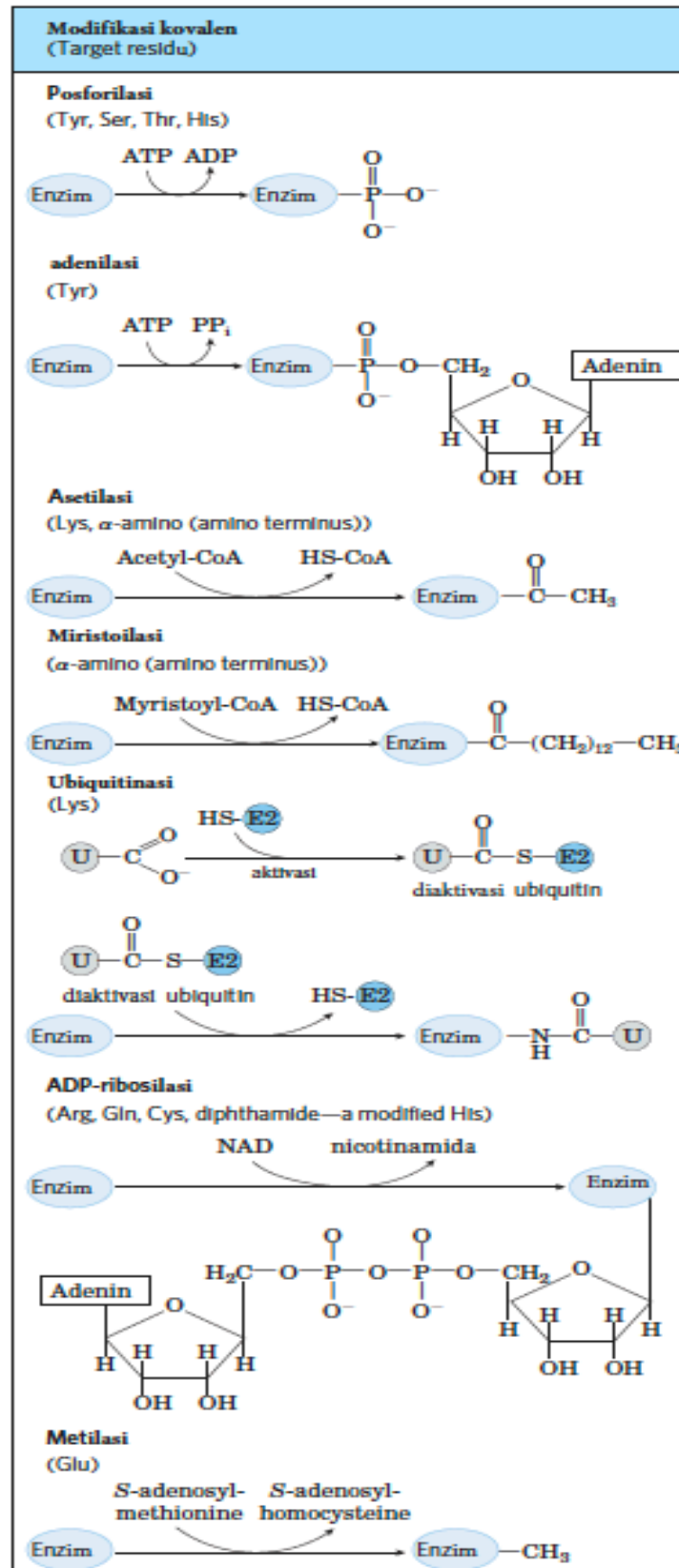
Gambar 128 Interaksi subunit dalam enzim alosterik

Aspartat transcarbamoilase, enzim alosterik

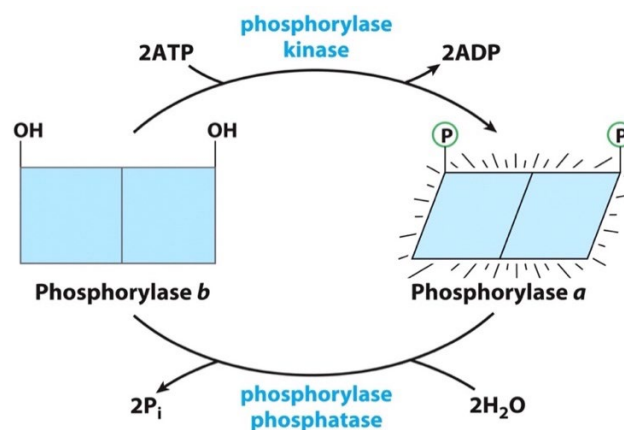


Gambar 129 Struktur Aspartat transcarbamoilase

Regulasi aktivitas enzim dengan modifikasi kovalen.
 Beberapa reaksi modifikasi enzim adalah sebagai berikut.



Regulasi aktivitas enzim dengan modifikasi kovalen.



Gambar 130 Regulasi aktivitas enzim

Regulasi aktivitas glikogen fosforilase otot dengan fosforilasi. Dalam bentuk enzim yang lebih aktif, fosforilase a, residu Ser spesifik, satu di setiap subunit, difosforilasi. Fosforilase a diubah menjadi fosforilase b yang kurang aktif oleh hilangnya gugus fosforil ini secara enzimatis, yang dipromosikan oleh fosfoprotein fosfatase 1 (PP1). Fosforilase b dapat diubah kembali (diaktifkan kembali) menjadi fosforilase a oleh aksi fosforilase kinase.

Beberapa Fosforilasi Memungkinkan Kontrol Regulasi: Residu Ser, Thr, atau Tyr yang biasanya difosforilasi dalam protein yang diatur terjadi dalam motif struktural umum, yang disebut urutan konsensus, yang dikenali oleh protein kinase spesifik (Tabel 12). Beberapa kinase bersifat basofilik, lebih disukai memfosforilasi residu yang memiliki gugus tetangga yang lain memiliki preferensi substrat yang berbeda, seperti untuk residu di dekat residu Pro. Urutan asam amino bukan satu-satunya faktor penting dalam menentukan apakah residu yang diberikan akan terfosforilasi. Pelipatan protein menyatukan residu yang jauh dalam urutan primer; struktur tiga dimensi yang dihasilkan dapat menentukan apakah protein kinase memiliki akses ke residu tertentu dan dapat mengenalinya sebagai substrat. Faktor lain yang mempengaruhi spesifisitas substrat protein kinase tertentu adalah kedekatan residu terfosforilasi lainnya.

Regulasi dengan fosforilasi seringkali rumit. Beberapa protein memiliki urutan konsensus yang dikenali oleh beberapa protein kinase yang berbeda, yang masing-masing dapat memfosforilasi protein dan mengubah aktivitas enzimatisnya. Dalam beberapa kasus, fosforilasi bersifat hierarkis: residu tertentu dapat difosforilasi hanya

jika residu tetangga telah terfosforilasi. Misalnya, glikogen sintase, enzim yang mengkatalisis kondensasi monomer glukosa untuk membentuk glikogen, tidak aktif oleh fosforilasi residu Ser spesifik dan juga dimodulasi oleh setidaknya empat protein kinase lain yang memfosforilasi empat situs lain di enzim. Enzim bukanlah substrat, untuk glikogen sintase kinase 3, misalnya, sampai satu situs telah difosforilasi oleh kasein kinase II. Beberapa fosforilasi menghambat glikogen sintase lebih dari yang lain, dan beberapa kombinasi fosforilasi bersifat kumulatif. Fosforilasi regulasi ganda ini memberikan potensi modulasi aktivitas enzim yang sangat halus.

Untuk berfungsi sebagai mekanisme pengaturan yang efektif, fosforilasi harus reversibel. Secara umum, gugus fosforil ditambahkan dan dihilangkan oleh enzim yang berbeda, dan oleh karena itu prosesnya dapat diatur secara terpisah. Sel mengandung famili fosfoprotein fosfatase yang menghidrolisis P –Ser, P –Thr, dan P –Tyr ester, melepaskan Pi. Fosfoprotein fosfatase yang kita ketahui sejauh ini hanya bekerja pada subset fosfoprotein, tetapi mereka menunjukkan spesifisitas substrat yang lebih sedikit daripada protein kinase.

Tabel 18 Urutan Konsensus untuk Protein Kinase

Protein kinase	Urutan Konsensus dan residu terfosfoliasi
Protein kinase A	-x-R-[RK]-x-[ST]-B-
Protein kinase G	-x-R-[RK]-x-[ST]-x-
Protein kinase C	-[RK](2)-x-[ST]-B-[RK](2)-
Protein kinase B	-x-R-x-[ST]-x-K-
Ca ²⁺ /kalmodulin kinase I	-B-x-R-x(2)-[ST]-x(3)-B-
Ca ²⁺ /kalmodulin kinase II	-B-x-[RK]-x(2)-[ST]-x(2)-
Kinase rantai ringan miosin (otot polos)	-K(2)-R-x(2)-S-x-B(2)-
Fosforilase b kinase	-K-R-K-Q-I-S-V-R-
Kinase yang diatur sinyal ekstraseluler (ERK)	-P-x-[ST]-P(2)-
Protein kinase yang bergantung pada siklin (cdc2)	-x-[ST]-P-x-[KR]-
Kasein kinase I	-[SpTp]-x(2)-[ST]-B*
Kasein kinase II	-x-[ST]-x(2)-[ED]-x-
β-Kinase reseptor adrenergic	-[DE](n)-[ST]-x(3)
Rodopsin kinase	-x(2)-[ST]-E(n)-
Reseptor insulin kinase	-x-E(3)-Y-M(4)-K(2)-S-R-G-D-Y-M-T-M-Q-I-G-K(3)-L-P-A-T-G-D-Y-M-N-M-S-P-V-G-D-
Faktor pertumbuhan epidermis reseptor kinase	-E(4)-Y-F-E-L-V-

Catatan: Ditampilkan di sini adalah urutan konsensus yang disimpulkan (dalam tipe roman) dan urutan sebenarnya dari substrat yang diketahui (miring). Residu Ser (S),

Thr (T), atau Tyr (Y) yang mengalami fosforilasi berwarna merah; semua residu asam amino ditampilkan sebagai singkatan satu huruf. x mewakili asam amino apa pun; B, setiap asam amino hidrofobik. Sp, Tp, dan Yp adalah residu Ser, Thr, dan Tyr yang harus sudah difosforilasi agar kinase dapat mengenali situs tersebut. *Situs target terbaik memiliki dua residu asam amino yang memisahkan residu Ser/Thr terfosforilasi dan target; lokasi target dengan satu atau tiga residu yang mengganggu berfungsi pada tingkat yang dikurangi.

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke tujuh biokimia 1 pada pokok bahasan enzim yang telah disajikan, kemudian amatilah peristiwa atau kejadian sehari-hari disekeliling saudara beberapa produk yang menggunakan jasa enzim?

Materi bahasan enzim dapat di lihat pada video berikut ini.



Gambar 131 Enzim
Sumber: Sukaryawan & Sari 2021

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, kemudian amatilah didareah sekeliling anda beberapa proses pengolahan pangan atau proses lainnya yang menggunakan bantuan enzim seperti pembuatan tape, pembuatan asam cuka, pembuatan nata decoco, dan lain-lain. Bahaslah bersama kelompok saudara bagaimana mekanisme enzim melakukan proses tersebut? Kerjakanlah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan.

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang aplikasi penggunaan enzim. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang aplikasi penggunaan enzim. Buatlah Analisa hasil yang menunjukkan jumlah produk, lama waktu yang digunakan, dan kualitas produknya. Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

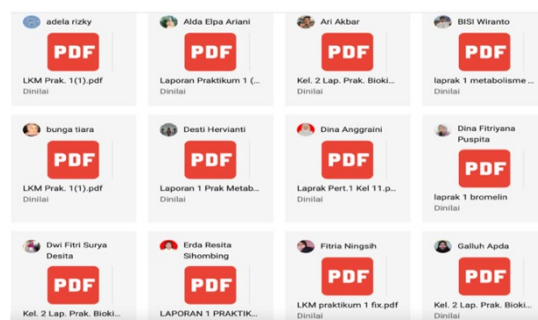
4. APLIKASI

Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang aplikasi penggunaan enzim. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di upload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal-hal berikut ini.

- a. Bagaimana reaksi enzimatik berperan dalam proses proyek saudara?
- b. Bahaslah tentang substratnya, kualitas produk dan waktu yang diperlukan,
- c. Buatlah grafik antara substrat terhadap waktu yang diperlukan.
- d. Bahas dengan kelompok saudara bagaimana enzim tersebut digolongkan?
- e. Bahaslah apa keuntungan reaksi enzimatis?

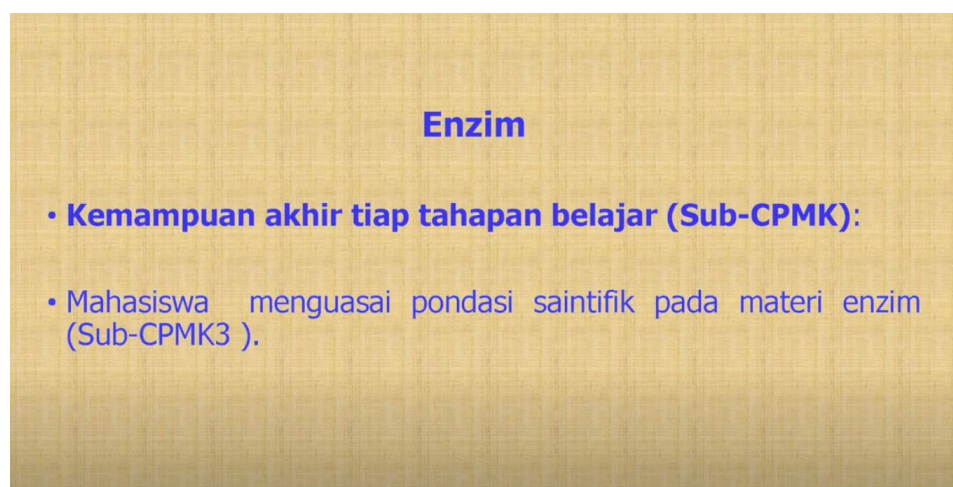
5. REFLEKSI

Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 7 aplikasi penggunaan enzim". Selanjutnya laporan tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id>. Laporan 7 aplikasi penggunaan enzim minimal memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka. Contoh submit laporan 7 Enzim



Gambar 132 Submit Laporan Enzim

Materi perkuliahan pokok bahasan enzim dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.



Gambar 133 Paparan Materi Enzim

Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di disubmit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

1. Enzim merupakan biomolekul protein yang berfungsi sebagai biokatalis, mengkatalisis reaksi yang terjadi pada makhluk hidup. Jelaskan enzim bereaksi spesifik dengan substraknya yang menghasilkan produk tunggal. Jelaskan bagaimana Enzim dan Subtrat dapat bereaksi ?
2. Interaksi lemah antara enzim dan substrat dioptimalkan dalam keadaan transisi. Bagaimana cara enzim menggunakan energi ikat untuk menurunkan energi aktivasi suatu reaksi?.
3. Rasa manis jagung segar yang baru dipetik disebabkan oleh tingkat gula yang tinggi di dalam biji jagung. Jagung yang dibeli di toko (beberapa hari setelah dipetik) tidak terasa manis, karena kira-kira 50 persen dari gula bebas pada jagung diubah menjadi pati dalam waktu satu hari setelah dipetik. Untuk mempertahankan rasa manis jagung segar, jagung dengan pelepahnya dicelupkan ke dalam air panas selama beberapa menit ("di blancing"), lalu didinginkan di dalam air dingin. Jagung yang diproses dengan cara tersebut dan disimpan di dalam pendingin beku, dapat mempertahankan rasanya. Apakah dasar biokimiawi dari prosedur ini?
4. Untuk memperoleh pendugaan awal terhadap konsentrasi enzim yang sebenarnya di dalam suatu sel bakteri, anggaplah bahwa sel tersebut mengandung 1000 jenis enzim di dalam larutan sitosol. Kita dapat menyederhanakan problem ini dengan menganggap lebih jauh bahwa masing-masing enzim berat molekulnya 100.000 dan bahwa semua (1000) enzim tersebut terdapat pada konsentrasi yang sama. Jika volume sitosol di dalam satu sel bakteri (bentuk silinder berdiameter 1 μm dengan tinggi 2,0 μm)

mencapai $4,5 \mu\text{m}^3$ dan sitosol (spesifik gravitasi 1,20) mengandung 20 persen protein terlarut (% berat), dan jika protein terlarut tersebut terdiri semuanya dari enzim yang berbeda, hitunglah rata-rata konsentrasi molar enzim di dalam sel model ini.

5. Enzim urease meningkatkan kecepatan hidrolisis urea pada pH 8,0 dan suhu 20°C oleh faktor 10^{14} . Jika sejumlah tertentu urease dapat menghidrolisa sempurna sejumlah tertentu urea dalam 5 menit pada 20°C dan pH 8,0, berapa lamakah urea tersebut akan terhidrolisa pada keadaan yang sama, tanpa penambahan urease? Anggaplah bahwa kedua reaksi terjadi di dalam sistem steril sehingga bakteri tidak dapat mencernakan urea.

6. Sisi aktif suatu enzim biasanya terdiri pada suatu kantung pada permukaan enzim yang dilapisi oleh rantai samping asam amino yang diperlukan untuk mengikat substrat dan mengkatalisa transformasi kimia. Karboksipeptidase, yang berturut-turut melepaskan residu asam amino terminal karboksil dari substrat peptida, terdiri dari satu rantai tunggal polipeptida dengan 307 asam amino. Ketiga gugus katalitik esensialnya, yang berada pada sisi aktif diberikan oleh arginin 145, tirosin 248, dan asam glutamat 270, nomor-nomor tersebut menunjukkan letak asam amino pada deretnya.
 - a. Jika rantai karboksipeptidase merupakan α heliks yang sempurna, seberapa jauh jarak antara (dalam nanometer) arginin 145 dan tirosin 248? Berapa jarak antara arginin 145 dan asam glutamat 270?
 - b. Jelaskan bagaimana ketiga asam amino ini yang terpisah jauh pada sekuen, dapat mengkatalisa reaksi yang terjadi pada jarak hanya beberapa persepuluh nanometer.
 - c. Jika hanya ketiga gugus katalitik ini yang terlibat didalam mekanisme hidrolisis, mengapa penting bagi enzim untuk mengandung sejumlah besar residu asam amino.

DAFTAR PUSTAKA

1. Al-Mossawi, A.H., Al-Garawi, Z.S. 2018. *Qualitative tests of amino acids and proteins and enzyme kinetics*. Baghdad: Mustansiriyah University.
2. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
3. Ramus, V. 2020. *Qualitative Tests for Proteins*. <https://www.youtube.com/watch?v=6YPWipP-Qe8&feature=youtu.be> (diakses pada tanggal 15 Oktober 2020).
4. Subroto, E., dkk. 2020. The Analysis Techniques Of Amino Acid And Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
5. Sukaryawan, M. 2014. *Biokimia*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
6. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
7. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
8. Thenawidjaja. M. 1990. *Dasar-dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
9. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
10. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
11. Won Chan Kim. *Principles of Biochemistry*. <https://www.kaznaru.edu.kz> . diakses pada tanggal 25 september 2020.

5.2 KINETIKA DAN REAKSI ENZIM

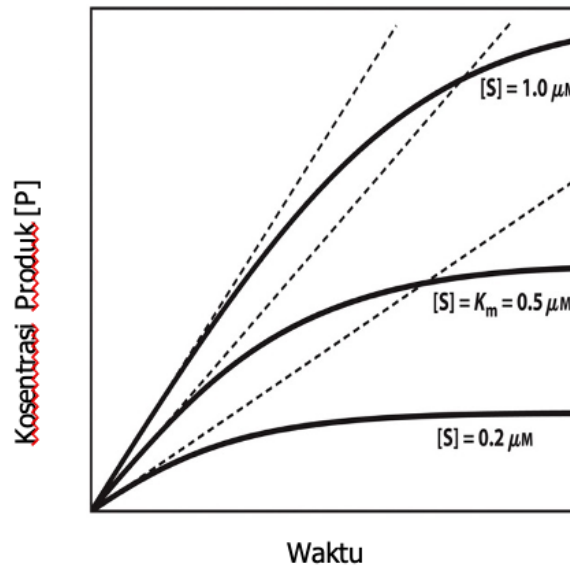
1. ORIENTASI

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa menguasai pondasi saintifik materi biokimia (CPMK3), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah mahasiswa menguasai pondasi saintifik materi enzim (Sub-CPMK3). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

A. Kinetika Reaksi Enzim

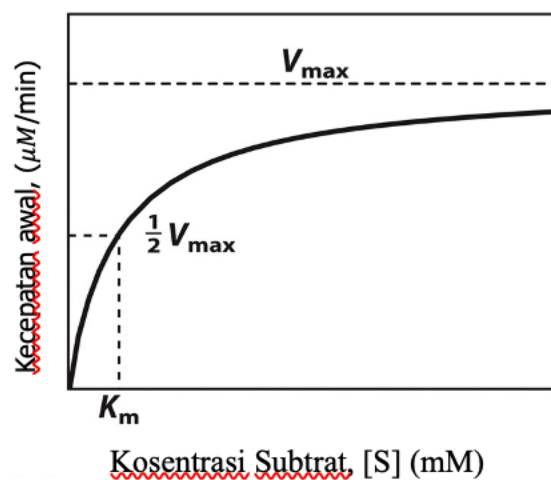
Untuk menentukan laju reaksi enzim dan bagaimana reaksi enzim berubah persatuan waktu dikenal sebagai kinetika enzim. Faktor kunci yang mempengaruhi laju reaksi yang dikatalisis oleh enzim adalah konsentrasi substrat, $[S]$. Perubahan konsentrasi substrat bahwa $[S]$ berubah selama reaksi in vitro karena substrat diubah menjadi produk. Salah satu pendekatan penyederhanaan dalam eksperimen kinetik adalah mengukur laju awal (kecepatan awal), yang disebut V_0 .

Dalam reaksi khas, enzim dapat bereaksi dalam jumlah nanomolar, sedangkan $[S]$ mungkin lima atau enam kali lipat lebih tinggi. Jika hanya permulaan reaksi yang dipantau (seringkali 60 detik pertama atau kurang), maka perubahan $[S]$ dapat dibatasi hingga beberapa persen, dan $[S]$ dapat dianggap konstan. V_0 kemudian dapat diperiksa sebagai fungsi $[S]$ yang disesuaikan dengan menggunakan beberapa reaksi.



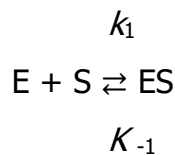
Gambar 134 Kecepatan awal reaksi yang dikatalisis enzim.

Pengaruh Konsentrasi Substrat terhadap Kecepatan Reaksi. Efek pada V_o dari berbagai konsentrasi $[S]$ ketika konsentrasi enzim dipertahankan konstan ditunjukkan pada Gambar 135, gambar ini adalah tampilan plot kinetik V_o vs $[S]$. Pada konsentrasi substrat yang relatif rendah, V_o meningkat hampir secara linier dengan peningkatan $[S]$. Pada konsentrasi substrat yang lebih tinggi, V_o meningkat dengan jumlah yang lebih kecil sebagai respons terhadap peningkatan $[S]$. Akhirnya, tercapai suatu titik di mana peningkatan V_o semakin kecil seiring dengan peningkatan $[S]$. Daerah V_o pada kurva yang hampir konstan dekat dengan kecepatan maksimum, V_{max} .

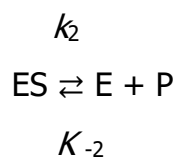


Gambar 135 Konsentrasi substrat awal terhadap kecepatan

Peranan Kompleks ES, Kompleks ES adalah kunci untuk memahami perilaku kinetik suatu enzim. Pada tahun 1913, Leonor Michaelis dan Maud Menten, mengembangkan persamaan kinetik untuk menjelaskan perilaku banyak enzim sederhana. Kunci untuk pengembangan persamaannya, adalah asumsi bahwa enzim pertama kali bergabung dengan substratnya untuk membentuk kompleks enzim-substrat dalam langkah reversibel yang relatif cepat:



Kompleks ES kemudian terurai dalam langkah kedua yang lebih lambat untuk menghasilkan enzim bebas dan produk reaksi P:



Jika reaksi kedua yang lebih lambat membatasi laju reaksi keseluruhan, laju keseluruhan harus sebanding dengan konsentrasi spesi yang bereaksi pada langkah kedua, yaitu ES. Pada saat tertentu dalam reaksi yang dikatalisis enzim, enzim ada dalam dua bentuk, bentuk E yang bebas atau tidak bergabung dan bentuk gabungan ES. Pada [S] rendah, sebagian besar enzim berada dalam bentuk E yang tidak bergabung. Di sini, laju sebanding dengan [S] karena arah persamaan pertama di atas didorong ke arah pembentukan lebih banyak ES ketika [S] meningkat.

Laju maksimum dari reaksi yang dikatalisis (V_{max}) diamati ketika hampir semua enzim ada dalam kompleks ES dan [E] semakin kecil. Dalam kondisi ini, enzim jenuh dengan substratnya, sehingga peningkatan [S] lebih lanjut tidak berpengaruh pada laju. Kondisi ini terjadi ketika [S] cukup tinggi sehingga pada dasarnya semua enzim bebas telah diubah menjadi bentuk ES. Efek kejenuhan adalah karakteristik yang membedakan dari katalis enzimatik dan bertanggung jawab untuk kurva konstan yang diamati. Pola yang terlihat pada gambar itu kadang-kadang disebut sebagai kinetika kejenuhan.

Ketika enzim pertama kali dicampur dengan substrat berlebih, ada periode awal, keadaan pra-stabil, di mana konsentrasi ES terbentuk. Periode ini biasanya terlalu pendek untuk diamati dengan mudah, hanya berlangsung beberapa mikrodetik, dan tidak terlihat. Reaksi dengan cepat mencapai keadaan tunak di mana [ES] tetap kira-kira konstan dari waktu ke waktu. V_0 yang diukur umumnya mencerminkan *steady state*, meskipun V_0 terbatas pada bagian awal reaksi. Analisis laju awal ini disebut sebagai kinetika *steady state*.

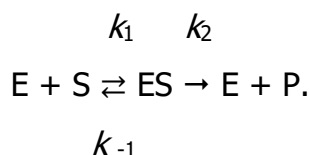
Turunan dari Persamaan Michaelis dan Menten (MM)

Kurva kinetik yang menyatakan hubungan antara V_0 dan [S] memiliki bentuk umum yang sama (hiperbola persegi panjang) untuk sebagian besar enzim, yang dapat dinyatakan secara aljabar dengan persamaan MM. Michaelis dan Menten menurunkan persamaan ini mulai dari hipotesis dasar mereka bahwa langkah pembatas laju dalam reaksi enzimatik adalah pemecahan kompleks ES menjadi produk dan enzim bebas.

Persamaan MM adalah:

$$V_0 = V_{\max}[S]/(K_m + [S]).$$

Semua istilah ini, [S], V_0 , V_{\max} , serta konstanta yang disebut konstanta Michaelis, K_m , dapat dengan mudah diukur secara eksperimental. Penurunan persamaan MM dimulai dengan dua langkah dasar pembentukan dan pemecahan ES. Pada awal reaksi, konsentrasi produk [P] dapat diabaikan, dan asumsi penyederhanaan dibuat bahwa reaksi P S (dijelaskan oleh k_{-2}) dapat diabaikan. Reaksi keseluruhan kemudian berkurang menjadi:



V_0 ditentukan oleh pemecahan ES untuk membentuk produk, yang ditentukan oleh [ES] melalui persamaan:

$$V_0 = k_2[ES].$$

Karena [ES] dalam persamaan di atas tidak mudah diukur secara eksperimental, ekspresi alternatif untuk istilah ini harus ditemukan. Pertama, istilah [Et], yang

mewakili konsentrasi enzim total (jumlah enzim bebas dan enzim terikat substrat) diperkenalkan. Enzim yang tidak terikat $[E]$ kemudian dapat diwakili oleh $[E_t] - [ES]$. Juga, karena $[S]$ biasanya jauh lebih besar dari $[E_t]$, jumlah substrat yang terikat oleh enzim pada waktu tertentu dapat diabaikan dibandingkan dengan total $[S]$. Dengan mengingat kondisi ini, langkah-langkah berikut mengarah ke ekspresi untuk V_o dalam hal parameter yang mudah diukur.

Langkah 1 Laju pembentukan dan pemecahan ES ditentukan oleh langkah-langkah yang diatur oleh konstanta laju k_1 (pembentukan) dan k_{-1} , k_2 (penguraian), sesuai dengan ekspresi.

$$\text{Laju pembentukan ES} = k_1([E_t] - [ES])[S]$$

$$\text{Laju penguraian ES} = k_{-1}[ES] + k_2[ES]$$

Langkah 2 Sekarang kita membuat asumsi penting: bahwa laju reaksi awal mencerminkan keadaan tunak di mana $[ES]$ konstan yaitu, laju pembentukan ES sama dengan laju penguraiannya, ini disebut asumsi kondisi mapan. Ekspresi dalam Persamaan di atas dapat disamakan untuk keadaan tunak, memberikan:

$$k_1([E_t] - [ES])[S] = k_{-1}[ES] + k_2[ES]$$

Langkah 3 Dalam serangkaian langkah aljabar, sekarang kita selesaikan Persamaan di atas untuk $[ES]$. Pertama, ruas kiri dikalikan dan ruas kanan disederhanakan menjadi:

$$k_1[E_t][S] - k_1[ES][S] = (k_{-1} + k_2)[ES]$$

Menambahkan suku $k_1[ES][S]$ ke kedua ruas persamaan dan menyederhanakannya menghasilkan:

$$k_1[E_t][S] = (k_1[S] + k_{-1} + k_2)[ES]$$

Kemudian memecahkan persamaan ini untuk $[ES]$:

$$\text{Ini } [ES] = \frac{k_1[E_t][S]}{k_1[S] + k_{-1} + k_2} \quad \text{nakan lebih lanjut, menjadi satu ekspresi:}$$

$$[ES] = \frac{[E_t][S]}{[S] + (k_2 + k_{-1})/k_1}$$

Istilah $(k_2 + k_{-1})/k_1$ didefinisikan sebagai konstanta Michaelis, K_m . Mensubstitusikan ini ke dalam Persamaan sebelumnya menyederhanakan ekspresi menjadi:

$$[ES] = \frac{[E_t][S]}{K_m + [S]}$$

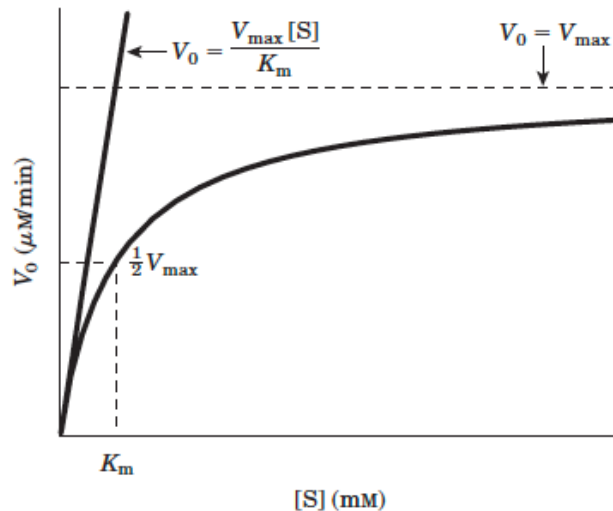
Langkah 4 Sekarang kita dapat menyatakan V_0 dalam bentuk $[ES]$. Menggantikan ruas kanan persamaan untuk $[ES]$ sehingga persamaan memberikan:

$$V_0 = \frac{k_2[E_t][S]}{K_m + [S]}$$

Persamaan ini dapat lebih disederhanakan. Karena kecepatan maksimum terjadi ketika enzim jenuh (yaitu, dengan $[ES] = [E_t]$) V_{max} dapat didefinisikan sebagai $k_2[E_t]$. Sehingga persamaan menjadi:

$$V_0 = \frac{V_{max} [S]}{K_m + [S]}$$

Ini adalah persamaan Michaelis-Menten, persamaan laju untuk reaksi yang dikatalisis oleh enzim satu substrat. Ini adalah pernyataan hubungan kuantitatif antara kecepatan awal V_0 , kecepatan maksimum V_{max} , dan konsentrasi substrat awal $[S]$, semuanya berhubungan melalui konstanta Michaelis K_m . Perhatikan bahwa K_m memiliki satuan konsentrasi. Apakah persamaan tersebut sesuai dengan pengamatan eksperimental? Ya; kita dapat mengkonfirmasi ini dengan mempertimbangkan situasi pembatas di mana $[S]$ sangat tinggi atau sangat rendah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar di bawah ini. Hubungan numerik yang penting muncul dari persamaan Michaelis-Menten dalam kasus khusus ketika V_0 tepat setengah V_{max} .



Gambar 136 Ketergantungan kecepatan awal pada konsentrasi substrat.

Grafik ini menunjukkan parameter kinetik yang menentukan batas kurva pada [S] tinggi dan rendah. Pada [S] rendah, $K_m \gg [S]$ dan suku [S] pada penyebut persamaan Michaelis-Menten. Persamaan disederhanakan menjadi $V_0 = V_{max}[S]/K_m$ dan V_0 menunjukkan ketergantungan linier pada [S], seperti yang diamati di sini. Pada [S] tinggi, di mana $[S] \gg K_m$, suku K_m dalam penyebut persamaan Michaelis-Menten menjadi tidak signifikan dan persamaan disederhanakan menjadi $V_0 = V_{max}$; ini konsisten dengan kurva tinggi yang diamati pada [S] tinggi. Oleh karena itu, persamaan Michaelis-Menten konsisten dengan ketergantungan yang teramati dari V_0 pada [S], dan bentuk kurva didefinisikan oleh istilah V_{max}/K_m pada [S] rendah dan V_{max} pada [S] tinggi.

Persamaan MM menggambarkan perilaku kinetik dari banyak sekali enzim, dan semua enzim yang menunjukkan ketergantungan hiperbolik V_0 pada [S] dikatakan mengikuti kinetika Michaelis-Menten. Namun persamaan MM tidak bergantung pada mekanisme reaksi dua langkah yang relatif sederhana yang dibahas di atas. Banyak enzim yang mengikuti kinetika MM memiliki mekanisme yang sangat berbeda, dan enzim yang mengkatalisis reaksi dengan enam atau delapan langkah yang dapat diidentifikasi sering menunjukkan perilaku kinetik keadaan tunak yang sama. Meskipun persamaan MM berlaku untuk banyak enzim, baik besaran maupun arti sebenarnya dari V_{max} dan K_m dapat berbeda dari satu enzim ke enzim lainnya. Ini adalah batasan penting dari pendekatan kondisi mapan untuk kinetika enzim.

Persamaan MM dapat ditunjukkan untuk menjelaskan dengan benar kurva V_0 vs $[S]$ dari banyak enzim dengan mempertimbangkan situasi pembatas di mana $[S]$ sangat tinggi atau sangat rendah. Pada $[S]$ rendah, $K_m \gg [S]$ dan $[S]$ pada penyebut persamaan MM menjadi tidak signifikan. Persamaan disederhanakan menjadi $V_0 = V_{max}[S]/K_m$ dan V_0 menunjukkan ketergantungan linier pada $[S]$, seperti yang diamati di sisi kiri grafik V_0 vs $[S]$. Pada $[S]$ tinggi, di mana $[S] \gg K_m$, K_m dalam penyebut persamaan MM menjadi tidak signifikan dan persamaan disederhanakan menjadi $V_0 = V_{max}$. Ini konsisten dengan daerah tinggi kurva di V_0 yang diamati pada $[S]$ tinggi dalam grafik kinetik. Hubungan numerik yang penting muncul dari persamaan MM dalam kasus khusus ketika V_0 tepat satu setengah V_{max} .

Disini:

$$V_{maks}/2 = V_{maks}[S]/(K_m + [S]).$$

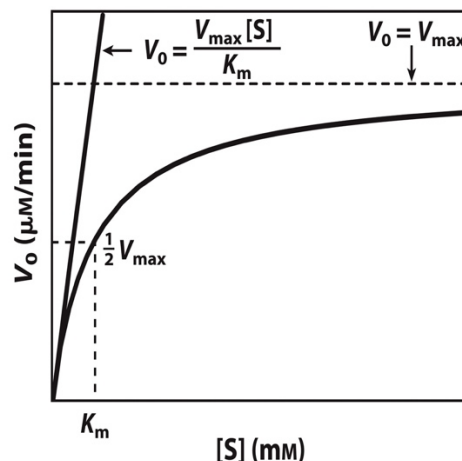
Saat membagi dengan V_{max} , persamaannya adalah

$$1/2 = [S]/(K_m + [S]).$$

Setelah menyelesaikan untuk K_m , kita mendapatkan

$$K_m + [S] = 2[S], \text{ atau } K_m = [S].$$

Ini adalah definisi K_m yang sangat berguna dan praktis. K_m setara dengan konsentrasi substrat di mana V_0 adalah satu-setengah V_{max} .



Gambar 137. Ketergantungan kecepatan awal pada konsentrasi substrat.

Karena plot V_0 vs $[S]$ untuk reaksi yang dikatalisis enzim secara pendekatan asimtotik nilai V_{max} pada $[S]$ tinggi, sulit untuk secara akurat menentukan V_{max} (dan dengan demikian, K_m) dari grafik tersebut. Masalah ini segera diselesaikan dengan

mengubah persamaan kinetik Michaelis-Menten menjadi apa yang disebut persamaan timbal balik ganda (persamaan Lineweaver-Burk) yang menggambarkan plot linier dari mana V_{max} dan K_m dapat dengan mudah diperoleh. Persamaan Lineweaver-Burk diturunkan dengan terlebih dahulu mengambil kebalikan dari kedua ruas persamaan Michaelis-Menten.

$$1/V_0 = (K_m + [S])/V_{max}[S]$$

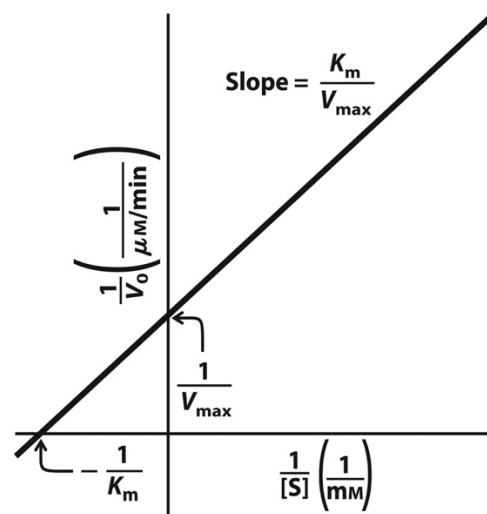
Memisahkan komponen pembilang di ruas kanan persamaan memberikan

$$1/V_0 = K_m/V_{max}[S] + [S]/V_{max}[S]$$

Disederhanakan menjadi

$$1/V_0 = K_m/V_{max}[S] + 1/V_{max}$$

Plot $1/V_0$ vs $1/[S]$ memberikan garis lurus, perpotongan y adalah $1/V_{max}$ dan perpotongan x adalah $-1/K_m$.



Gambar 138 Plot Lineweaver-Burk.

Arti dari K_m

- K_m dapat sangat bervariasi dari satu enzim ke enzim lainnya, dan bahkan untuk substrat yang berbeda dari enzim yang sama.
- K_m kadang-kadang digunakan (sering tidak tepat) sebagai indikator afinitas suatu enzim terhadap substratnya. Arti sebenarnya dari K_m tergantung pada aspek spesifik dari mekanisme reaksi seperti jumlah dan laju relatif dari masing-masing langkah.

- Misalnya, untuk reaksi dengan dua langkah, $K_m = (k_2 + k_{-1})/k_1$. Jika k_2 sebenarnya adalah pembatas laju, maka $k_2 \ll k_{-1}$, dan K_m tereduksi menjadi k_{-1}/k_1 , yang merupakan konstanta disosiasi, K_d dari kompleks ES. Dimana kondisi ini berlaku, K_m memang mewakili ukuran afinitas enzim untuk substratnya.
- Namun skenario ini sering tidak berlaku untuk semua enzim karena perbedaan kontribusi konstanta laju individu terhadap laju reaksi keseluruhan. Jadi K_m tidak selalu dapat dianggap sebagai ukuran sederhana dari afinitas suatu enzim terhadap substratnya.

Tabel 19 Harga K_m untuk beberapa Enzim dan Subtrat

No	Enzim	Subtrat	K_m (mM)
1	Heksokinase (Otak)	ATP	0,4
		D- Glukosa	0,05
		D- Fruktosa	1,5
2	Karbonat anhidrase	HCO_3^-	26
3	Kimotripsin	Glisiltirosiniglisin	108
		N-Benzoyltirosinamida	2,5
4	β Galaktosidase	D-Laktosa	4,0
5	Treonin dehidratase	L- Treonin	5,0

Konstanta Spesifisitas (k_{cat}/K_m)

- Bersama-sama, parameter k_{cat} dan K_m dapat digunakan untuk mengevaluasi efisiensi katalitik suatu enzim. Cara terbaik untuk menentukan efisiensi katalitik suatu enzim adalah dengan menentukan rasio k_{cat}/K_m untuk reaksinya.

- Parameter ini, kadang-kadang disebut konstanta spesifisitas, adalah konstanta laju untuk konversi E + S menjadi E + P. Ketika $[S] \ll K_m$, bentuk persamaan MM sebelumnya diubah menjadi.

$$V_0 = (k_{cat}/K_m)([E_t][S]).$$

- V_0 dalam hal ini tergantung pada konsentrasi dua reaktan, $[E_t]$ dan $[S]$. Oleh karena itu, ini adalah persamaan laju orde kedua dan konstanta k_{cat}/K_m adalah konstanta laju orde kedua dengan unit $M^{-1}s^{-1}$.
- Ada batas atas k_{cat}/K_m , yang ditentukan oleh laju di mana E dan S dapat berdifusi bersama dalam larutan berair. Batas yang dikendalikan difusi ini adalah 10^8 hingga $10^9 M^{-1}s^{-1}$, dan banyak enzim memiliki k_{cat}/K_m di dekat kisaran ini. Enzim tersebut dikatakan telah mencapai kesempurnaan katalitik.

Tabel 20 enzim dengan k_{cat}/K_m batas difusi-terkontrol (10^8 ke $10^9 M^{-1}s^{-1}$)

Enzim	Substrat	k_{cat} (s^{-1})	K_m (M)	k_{cat} / K_m ($M^{-1}s^{-1}$)
Asetilkolinesterase	Asetilkolin	1.4×10^4	9×10^{-5}	1.6×10^8
Karbonat anhidrase	CO ₂	1×10^6	1.2×10^{-2}	8.3×10^7
	HCO ₃ ⁻	4×10^5	2.6×10^{-2}	1.5×10^7
Katalase	H ₂ O ₂	4×10^7	1.1×10^0	4×10^7
Krotonase	Krotonil-CoA	5.7×10^3	2×10^{-5}	2.8×10^8
Fumarase	Fumarat	8×10^2	5×10^{-6}	1.6×10^8
	Malat	9×10^2	2.5×10^{-5}	3.6×10^7
β-Laktamase	benzilpenisilin	2.0×10^3	2×10^{-5}	1×10^8

Reaksi bisubstrat

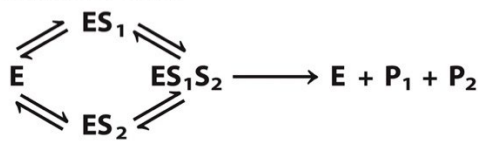
Dalam sebagian besar reaksi enzimatik, dua atau lebih molekul substrat yang berbeda berikatan dengan enzim dan berpartisipasi dalam reaksi. Laju reaksi bisubstrat tersebut juga dapat dianalisis dengan pendekatan MM. Reaksi dengan dua substrat biasanya melibatkan transfer atom atau gugus fungsi dari satu substrat ke substrat lainnya. Reaksi-reaksi ini dapat berlangsung melalui beberapa jalur yang berbeda. Dalam beberapa kasus, kedua substrat terikat pada enzim secara bersamaan di beberapa titik selama reaksi, membentuk kompleks terner nonkovalen.

Seperti disebutkan pada gambar, substrat dapat mengikat dalam urutan acak atau dalam urutan tertentu. Dalam kasus lain, substrat pertama diubah menjadi produk dan terdisosiasi sebelum substrat kedua mengikat, sehingga tidak ada kompleks terner yang terbentuk. Contohnya adalah mekanisme Ping-Pong, atau perpindahan ganda. Dalam reaksi ini, gugus fungsi sering ditransfer dari substrat pertama ke substrat kedua.

Reaksi bisubstrat

(a) Enzyme reaction involving a ternary complex

Random order



Ordered



(b) Enzyme reaction in which no ternary complex is formed



B. Inhibisi Reaksi Enzim.

Inhibitor enzim adalah molekul yang mengganggu katalisis, memperlambat atau menghentikan reaksi enzimatik. Inhibitor enzim adalah salah satu agen kimia paling penting yang diketahui. Misalnya, aspirin (asetilsalisilat) menghambat enzim yang mengkatalisis langkah pertama dalam sintesis prostaglandin, senyawa yang terlibat dalam banyak proses, termasuk beberapa yang menyebabkan rasa sakit. Studi tentang inhibitor enzim juga telah memberikan informasi berharga tentang mekanisme enzim dan telah membantu menentukan jalur metabolisme. Ada dua kelas besar inhibitor enzim: inhibitor reversibel dan ireversibel.

1. Inhibisi Kompetitif

Salah satu contoh penghambatan enzim reversibel akan dibahas: penghambatan kompetitif. Inhibitor kompetitif (I) bersaing dengan substrat untuk mengikat sisi aktif enzim. Sementara inhibitor menempati sisi aktif, inhibitor mencegah pengikatan substrat ke enzim dan menghalangi reaksi. Banyak inhibitor kompetitif secara struktural mirip dengan substrat dan bergabung dengan enzim untuk membentuk kompleks EI, tetapi tanpa mengarah ke katalisis. Inhibisi kompetitif dapat dianalisis secara kuantitatif dengan kinetika steady-state.

Dengan adanya inhibitor kompetitif, persamaan MM menjadi:

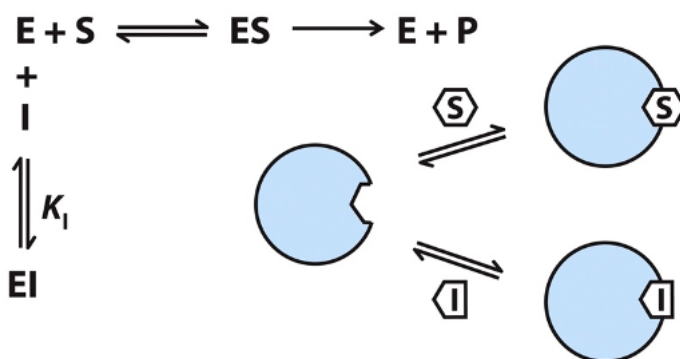
$$V_0 = V_{\max}[S]/(\alpha K_m + [S])$$

Dimana

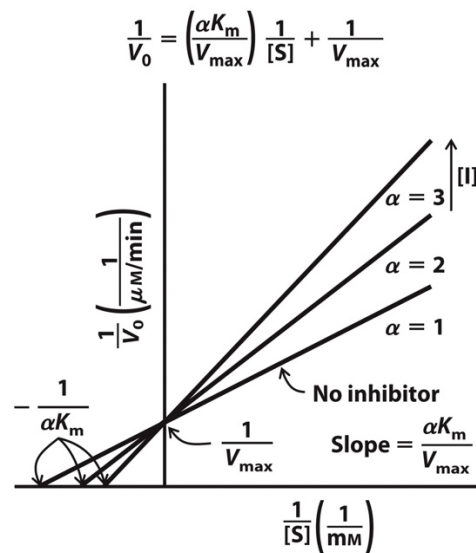
$$\alpha = 1 + [I]/K_I \text{ and } K_I = [E][I]/[EI].$$

Variabel yang ditentukan secara eksperimental K_m , K_m yang diamati dengan adanya inhibitor kompetitif, sering disebut K_m "nyata".

Inhibisi Kompetitif



Karena inhibitor kompetitif mengikat secara reversibel ke enzim, kompetisi dapat menjadi bias untuk mendukung substrat hanya dengan menambahkan lebih banyak substrat ke reaksi. Ketika $[S]$ jauh melebihi $[I]$, kemungkinan inhibitor akan mengikat enzim diminimalkan dan reaksi menunjukkan V_{\max} normal. Namun, $[S]$ di mana $V_0 = 1/2 V_{\max}$, K_m nyata, meningkat dengan adanya inhibitor oleh faktor. Pengaruh ini pada K_m yang jelas, dikombinasikan dengan tidak adanya efek pada V_{\max} , adalah penghambatan kompetitif dan mudah diungkapkan dalam plot kinetik timbal balik ganda.

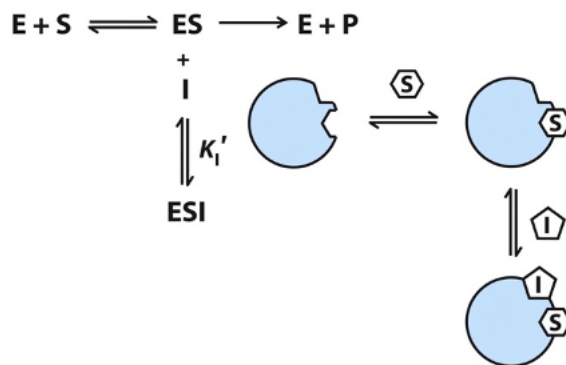


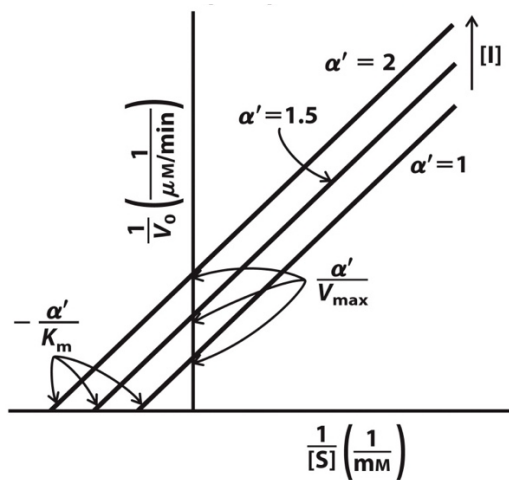
Gambar 139 Grafik Inhibisi Kompetitif

2. Inhibisi Unkompetitif

Inhibisi unkompetitif terjadi dimana inhibitor tidak dapat langsung bereaksi dengan enzim, tetapi dapat mengikat kompleks enzim-subtrat (ES), sehingga mengalami pembentukan produk. Pada saat bereaksi dengan enzim, enzim merubah konformasinya membentuk kompleks (ES) dan menghasilkan produk. Komplek (ES yang terjadi menyebabkan sisi pengikatan inhibitor merubah konformasinya bersesuaian dengan sisi pengikatan. Jika inhibitor mengikat kompleks (ES) dan terbentuk kompleks enzim-subtrat-inhibitor (ESI) maka tidak akan menghasilkan produk.

Inhibisi Unkompetitif



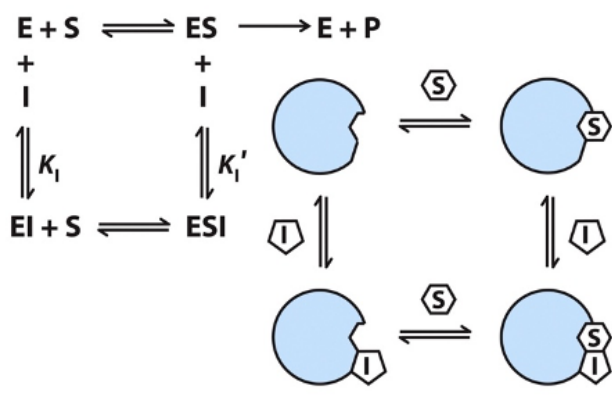


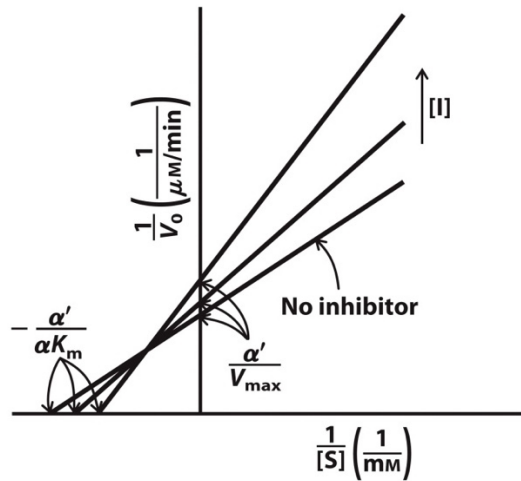
Gambar 140 Grafik Inhibisi Unkompetitif

3. Inhibisi Campuran

Inhibisi campuran apabila enzim memiliki lebih dari satu pusat aktif enzim. Inhibisi ini enzim dapat bereaksi secara langsung dengan inhibitor membentuk kompleks enzim-inhibitor (EI), demikian juga enzim dapat bereaksi langsung dengan substrat membentuk kompleks enzim-substrat (ES). Pada saat substrat bereaksi dengan enzim, membentuk kompleks (ES) maka menghasilkan menghasilkan produk. Jika kompleks enzim-substrat bereaksi dengan inhibitor membentuk kompleks enzim-substrat-inhibitor (ESI), maka tidak menghasilkan produk. Demikian juga Pada saat inhibitor bereaksi dengan enzim membentuk Komplek (EI) selanjutnya masih dapat bereaksi dengan substrat membentuk kompleks enzim-inhibitor-substrat (E-I-S), kompleks ini tidak menghasilkan produk.

Inhibisi Campuran

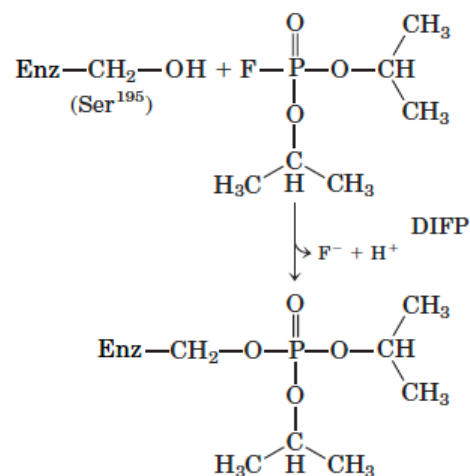




Gambar 141 Grafik Inhibisi Kompetitif Campuran

Inhibisi Ireversibel

Inhibitor ireversibel mengikat secara kovalen atau menghancurkan gugus fungsi pada enzim yang penting untuk aktivitas enzim. Inhibitor ini juga dapat menghambat enzim dengan membentuk asosiasi nonkovalen yang sangat stabil dengan enzim. Contoh inhibitor kovalen ireversibel dari protease, kimotripsin, ditunjukkan pada berikut. Chymotrypsin mengandung residu serin reaktif di sisi aktifnya yang terlibat erat dalam katalisis pembelahan ikatan peptida. Serin ini akan bereaksi dengan inhibitor diisopropylfluorophosphate (DIFP) yang memodifikasi residu serin secara reversibel, dan dengan demikian menghambat aktivitas proteolitik. Berbeda dengan ibuprofen, aspirin adalah penghambat enzim COX kovalen ireversibel.

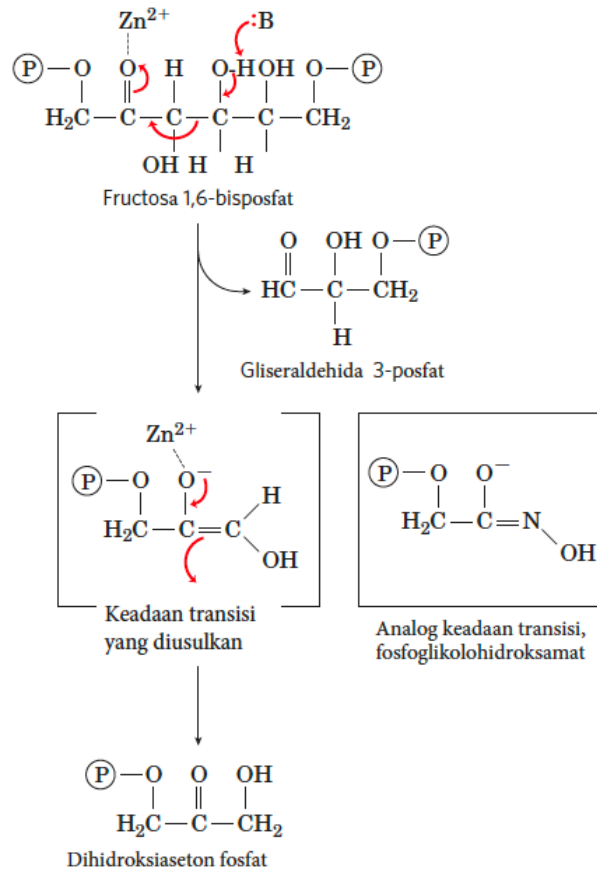


Mekanisme Inaktivator.

Inhibitor ireversibel adalah inaktivator berbasis mekanisme (bunuh diri). Senyawa ini relatif tidak reaktif sampai mereka mengikat sisi aktif enzim tertentu. Inaktivator bunuh diri mengalami beberapa langkah kimia pertama dari reaksi enzimatik normal, tetapi alih-alih diubah menjadi produk normal, inaktivator diubah menjadi senyawa yang sangat reaktif yang bergabung secara ireversibel dengan enzim. Inhibitor ini mendapatkan namanya karena membajak reaksi enzim normal untuk menonaktifkan enzim. Karena obat yang berfungsi sebagai inaktivator sangat spesifik untuk enzim targetnya, obat tersebut sering memiliki keuntungan dengan sedikit efek samping. Contoh inhibitor ini digunakan dalam pengobatan penyakit.

Keadaan transisi

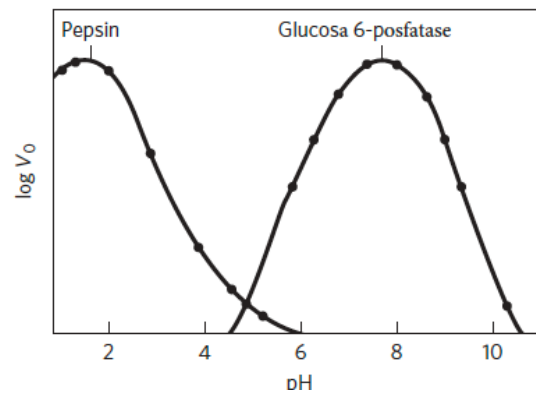
Inhibitor enzim ireversibel tidak perlu berikatan secara kovalen dengan enzim jika ikatan nonkovalen sangat erat sehingga inhibitor jarang berdisosiasi. Inhibitor tersebut biasanya menyerupai struktur keadaan transisi yang diprediksi dari reaksi dan disebut analog keadaan transisi. Senyawa ini mengikat lebih erat pada enzim daripada substrat karena mereka lebih cocok dengan sisi aktif. Misalnya, analog keadaan transisi yang dirancang untuk menghambat enzim glikolitik aldolase mengikat enzim tersebut lebih dari empat kali lipat lebih erat daripada substrat sebenarnya. Pengamatan bahwa molekul-molekul tersebut secara efektif merupakan penghambat enzim yang ireversibel, mendukung konsep bahwa situs aktif enzim paling komplementer dengan keadaan transisi reaksi. Terakhir, obat anti-HIV yang menghambat fungsi protease yang dibutuhkan virus sebenarnya adalah analog keadaan transisi.



Profil aktivitas enzim terhadap pH

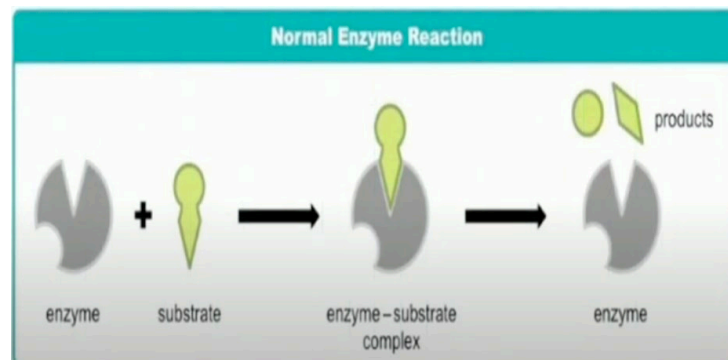
Enzim memiliki pH optimum di mana aktivitasnya maksimal. Pada nilai pH yang lebih tinggi atau lebih rendah, aktivitasnya menurun. Ini karena rantai samping asam amino yang dapat terionisasi yang penting untuk katalisis reaksi, atau mempertahankan struktur enzim, harus mempertahankan keadaan ionisasi tertentu agar berfungsi dengan baik. Kisaran pH di mana enzim mengalami perubahan aktivitas dapat memberikan petunjuk tentang jenis residu asam amino yang terlibat dalam katalisis. Perubahan aktivitas di dekat pH 7,0, misalnya, sering mencerminkan titrasi residu His. Namun, efek pH pada aktivitas harus ditafsirkan dengan hati-hati, karena dalam lingkungan protein yang padat, pKa rantai samping asam amino dapat bervariasi secara signifikan dari pKa asam amino bebas dalam larutan. pH optimum untuk aktivitas suatu enzim umumnya mendekati pH lingkungan di mana enzim berfungsi secara normal. Misalnya, pH optimum pepsin, suatu enzim pencernaan

lambung, adalah sekitar 1,6. PH optimum enzim sitoplasma, glukosa 6-fosfatase, hepatosit adalah sekitar 7,8



Gambar 142 Profil aktivitas pH dari dua enzim.

Selanjutnya materi kinetika enzim dapat di lihat pada video berikut ini.



Gambar 143 Kinetika Enzim
Sumber: Sukaryawan & Sari 2021

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke delapan biokimia 1 pada pokok bahasan kinetika dan reaksi enzim yang telah disajikan, kemudian amatilah didareah sekeliling saudara atau beberapa industry di sekitar saudara yang menggunakan beberapa inhibitor untuk mengendalikan reaksi enzim.

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, kemudian amatilah didaerah sekeliling anda beberapa proses penghambatan terhadap reaksi enzim. Bahaslah bersama kelompok saudara bagaimana inhibitor bekerja dalam mengendalikan reaksi enzim ? Kerjakanlah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan.

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang penghambatan reaksi enzim. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang penghambatan reaksi enzim. Buatlah Analisa hasil yang menunjukkan bahwa inhibitor yang digunakan dapat mengendalikan reaksi enzim. Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

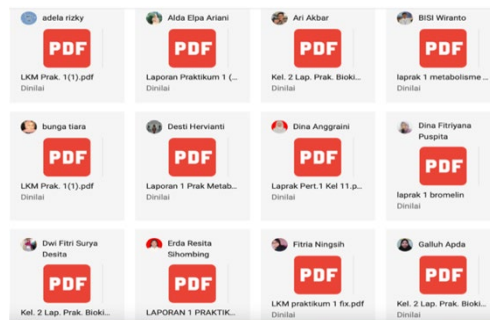
4. APLIKASI

Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang penghambatan reaksi enzim. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di aupload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal-hal berikut ini

- a. Bahaslah bagaimana mekanisme inhibisi reaksi enzim terjadi?
- b. Bahaslah bagaimana inhibitor mempengaruhi substrat dalam reaksi enzim?
- c. Buatlah grafik pengaruh inhibitor terhadap reaksi enzim dengan substrat.
- d. Bahaslah apa pentingnya inhibitor dalam suatu industry tertentu?

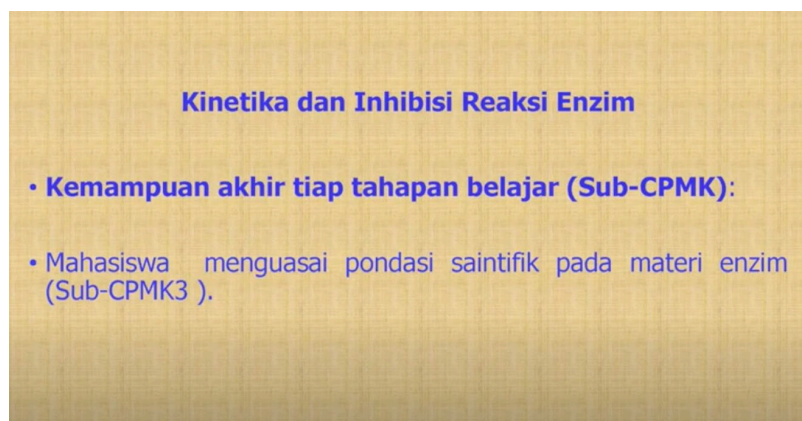
5. REFLEKSI

Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 8 penghambatan reaksi enzim". Selanjutnya laporan tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id>. Laporan 8 penghambatan reaksi enzim minimal memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka. Contoh submit laporan 8 kinetikai enzim



Gambar 144 Submit Laporan kinetika Enzim

Materi perkuliahan pokok kinetika enzim dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.

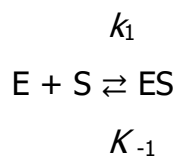


Gambar 145 Paparan materi Kinetika Enzim

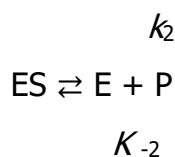
Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di disubmit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

1. Michaelis-Menten, mengembangkan persamaan kinetik untuk menjelaskan perilaku banyak enzim sederhana. Kunci untuk pengembangan persamaannya, adalah asumsi bahwa enzim pertama kali bergabung dengan substratnya untuk membentuk kompleks enzim-substrat dalam langkah reversibel yang relatif cepat:



Kompleks ES kemudian terurai dalam langkah kedua yang lebih lambat untuk menghasilkan enzim bebas dan produk reaksi P:



Buktikan bahwa : $V_0 = \frac{V_{\max} [S]}{K_m + [S]}$

2. Inhibitor enzim adalah molekul yang mengganggu katalisis, memperlambat atau menghentikan reaksi enzimatik. Inhibitor enzim adalah salah satu agen kimia paling penting yang diketahui. Tuliskan dan jelaskan Inhibisi reaksi Enzim.
 - a. Kompetitif
 - b. Non Kompetitif
 - c. Mixed Kompetitif

3. Pendugaan V_{maks} dan K_M oleh Pengamatan. Walaupun metoda grafik tersedia bagi penentuan secara tepat nilai-nilai V_{maks} dan K_M reaksi yang dikatalisa oleh enzim, nilai-nilai ini dengan cepat dapat diduga dari kecepatan reaksi pada peningkatan konsentrasi substrat. Dengan menggunakan definisi V_{maks} dan K_M , buatlah pendugaan nilai V_{maks} dan K_M bagi reaksi enzimatik dengan data dibawah ini :

[S], M	$V_{\mu\text{mol/L}}$ menit
$2,5 \times 10^{-6}$	28
$4,0 \times 10^{-6}$	40
1×10^{-6}	70
2×10^{-6}	95
4×10^{-6}	112
1×10^{-1}	128
2×10^{-1}	139
1×10^{-2}	140

4. Makna V_{maks} Dalam percobaan di labarotarorium, dua mahasiswa secara terpisah mengisolasi dehidrogenasi laktat, yang mengkatalisa reduksi piruvat menjadi laktat dari jantung ayam. Enzim tersebut diperoleh dalam bentuk larutan pekat. Mahasiswa tersebut lalu mengukur aktivitas larutan enzimnya sebagai fungsi konsentrasi substrat pada kondisi yang sama dengan menentukan V_{maks} dan K_M preparat masing – masing. Pada saat mereka membandingkan hasilnya, mereka memperoleh bahwa nilai K_M mereka ternyata identik, tetapi V_{maks} jauh berbeda. Salah satu mahasiswa berpendapat bahwa perbedaan harga V_{maks} meyakinkan bahwa mereka telah mengisolasi bentuk yang berbeda dari enzim yang sama. mahasiswa lain berpendapat bahwa walaupun diperoleh harga V_{maks} yang berbeda, maka telah mengisolasi bentuk enzim yang sama. Siapa yang benar? Jelaskan. Bagaimana mereka dapat memecahkan perbedaan ini? Jelaskan.

5. Hubungan di antara Kecepatan Reaksi dan Konsentrasi Substrat: Persamaan Michaelis Menten

(a) Pada konsentrasi berapakah suatu enzim dengan kecepatan transformasi substrat setinggi 30 $\mu\text{mol}/\text{menit}$ mg dan K_M 0,005M memperlihatkan seperempat kecepatan maksimumnya?

(b) Tentukan bagian V_{maks} yang akan dicapai pada konsentrasi substrat $\frac{1}{2}K_M$, $2K_M$, dan $10K_M$

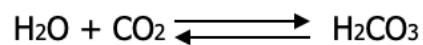
6. Analisis Grafis V_{maks} dan Nilai K_M . Data percobaan berikut ini dikumpulkan selama penelitian aktivitas katalitik suatu peptidase usus yang mampu menghidrolisa dipeptida glisilglisin :



[S], mM	1,5	2,0	3,0	4,0	8,0	16,0
Produk yang terbentuk, mg/menit	0,21	0,24	0,28	0,33	0,40	0,45

Dari data diatas, tentukanlah melalui analisis grafik (lihat kotak9-2) harga K_M dan V_{maks} bagi preparat enzim ini.

7. Bilangan Putaran Anhidrase Karbonat. Anhidrase karbonat sel darah, dengan berat molekul 30.000, merupakan enzim paling aktif yang telah diketahui. Enzim ini mengkatalisa hidrasi dapat balik CO_2



yang penting dalam transport CO_2 dari jaringan menuju paru-paru. Jika 10 μg anhidrase karbonat murni mengkatalisa hidrasi 0,30 g CO_2 dalam 1 menit pada 37 $^\circ\text{C}$ pada kondisi optimal, hitunglah putaram anhidrase karbonat.

DAFTAR PUSTAKA

1. Al-Mossawi, A.H., Al-Garawi, Z.S. 2018. *Qualitative tests of amino acids and proteins and enzyme kinetics*. Baghdad: Mustansiriyah University.
2. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
3. Ramus, V. 2020. *Qualitative Tests for Proteins*. <https://www.youtube.com/watch?v=6YPWipP-Qe8&feature=youtu.be> (diakses pada tanggal 15 Oktober 2020).
4. Subroto, E., dkk. 2020. The Analysis Techniques Of Amino Acid And Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
5. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
6. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
7. Thenawidjaja. M.1990. *Dasar-dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
8. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
9. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
10. Won Chan Kim. *Principles of Biochemistry*. <https://www.kaznaru.edu.kz> . diakses pada tanggal 25 september 2020.

BAB 6 HORMON, ANTIGEN, ANTIBODI VITAMIN DAN MINERAL

1. ORIENTASI

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa mampu mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora sesuai dengan keahliannya berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam rangka menghasilkan solusi, gagasan, desain atau kritik seni (CPMK4), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah mahasiswa mampu mengkaji implikasi materi hormon, antigen, antibody, vitamin dan mineral dalam kehidupan sehari-hari (Sub-CPMK4). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

A. Hormon

Hormon adalah zat kimia yang bertindak sebagai pembawa pesan yang mengirimkan sinyal dari satu sel ke sel lainnya. Ketika berikatan dengan sel lain yang menjadi sasaran pesan, hormon dapat mengubah beberapa aspek fungsi sel, termasuk pertumbuhan sel, metabolisme, atau fungsi lainnya. Hormon dapat diklasifikasikan menurut komposisi kimia, sifat kelarutan, lokasi reseptor, dan sifat sinyal yang digunakan untuk memediasi aksi hormonal di dalam sel. Hormon yang mengikat permukaan sel berkomunikasi dengan proses metabolisme intraseluler melalui molekul perantara yang disebut pembawa pesan kedua (hormon itu sendiri adalah pembawa pesan pertama), yang dihasilkan sebagai konsekuensi dari interaksi ligan-reseptor. Konsep pembawa pesan kedua muncul dari pengamatan bahwa epinefrin berikatan dengan membran plasma sel tertentu dan meningkatkan cAMP intraseluler. Ini diikuti oleh serangkaian percobaan di mana cAMP ditemukan memediasi efek dari banyak hormon. Sampai saat ini, hanya satu

hormon, faktor natriuretik atrium (ANF), yang menggunakan cGMP sebagai pembawa pesan kedua.

Sifat-sifat dan kekhususan dari hormon adalah:

- a. Zat ini merupakan pengatur fisiologis terhadap kelangsungan hidup sesuatu organ atau sesuatu sistem. Sistem pengadaan gula di dalam darah misalnya di atur oleh beberapa hormon, diantaranya hormon insulin dan glukagon. Insulin akan mempertinggi aktivitas dari permeabilitas membran sel terhadap gula darah. Akibatnya produksi insulin yang berlebihan akan mengakibatkan menurunnya kadar gula di dalam darah.
- b. Zat ini mempunyai efektifitas yang tinggi meskipun hanya diberikan dalam jumlah yang sangat sedikit. Selanjutnya hormon dihasilkan oleh sel hidup yang sehat dari sebuah kelenjar endokrin. Kelenjar endokrin tidak memiliki saluran, maka hormon yang dihasilkannya langsung disekresikan kedalam pembuluh darah. Setelah masuk kedalam pembuluh darah maka hormon akan diantar melalui sistem peredaran darah ke sesuatu organ tujuan tertentu yang relatif jauh dari kelenjar penghasil hormonnya.
- c. Zat ini dalam jumlah sedikit harus efektif dalam melakukan fungsinya sebagai pengatur fisiologis. Jumlah sedikit ini tidaklah sama antara satu hormon dengan hormon yang lainnya. Hormon yang lain seperti hormon perangsang kelenjar tyroid yang dihasilkan oleh hipofisa (TSH) akan efektif bila mendapatkan rangsangan dari hormon yang dihasilkan oleh hypothalamus (*Tyroid stimulating hormone releasing hormone*) atau TSHRH yang mencapai peringkat picogram (10^{-12} gram).

1) Karakterisasi Hormon

Cara pertama untuk mengkarakterisasi hormon adalah dengan melihat jarak di mana hormon tersebut bekerja. Hormon dapat diklasifikasikan pada tiga cara utama sebagai berikut:

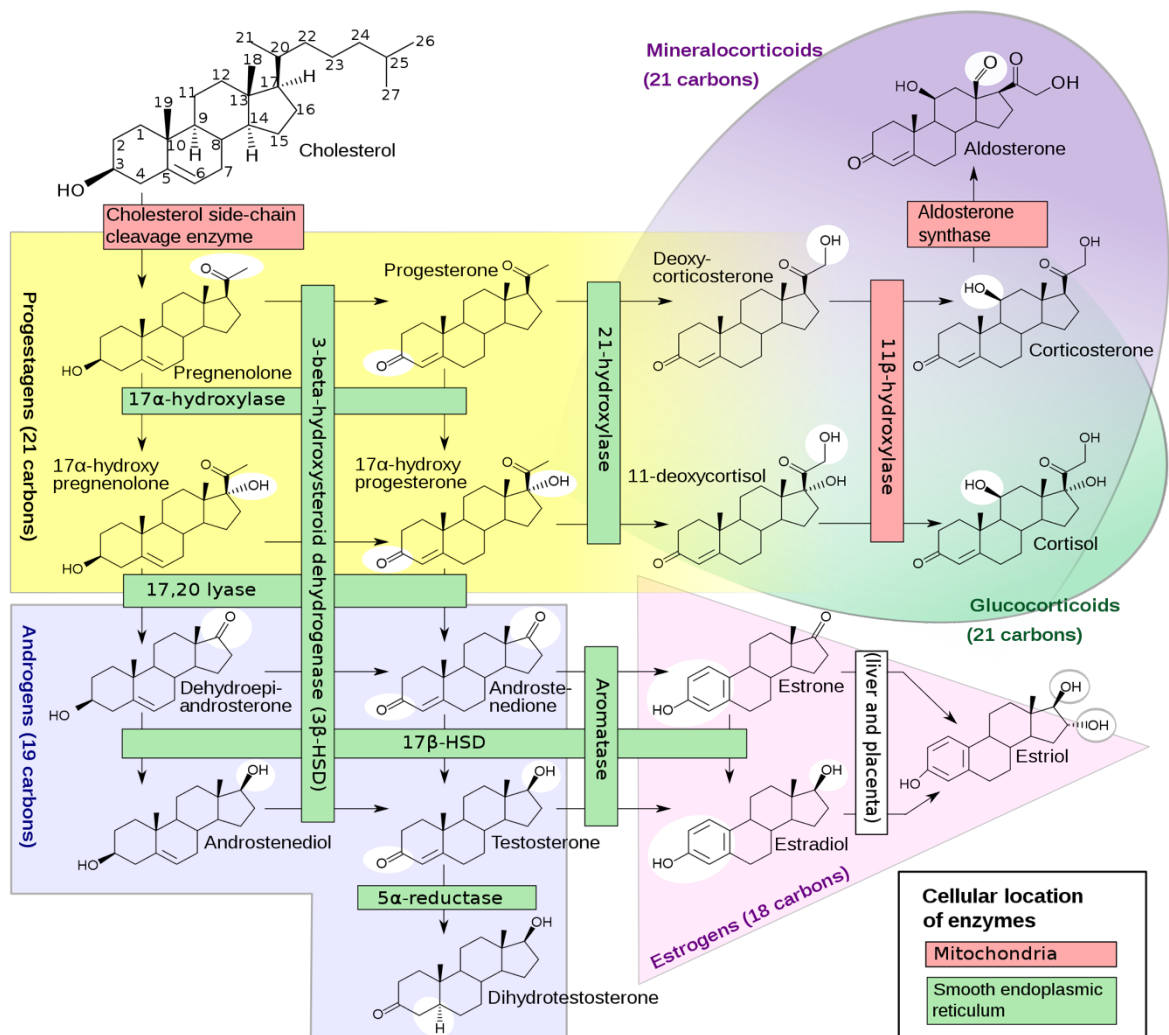
- Autokrin: Hormon autokrin adalah hormon yang bekerja pada sel yang sama yang melepaskannya.
- Parakrin: Hormon parakrin adalah hormon yang bekerja pada sel yang berdekatan dengan sel yang melepaskannya. Contoh hormon parakrin termasuk

faktor pertumbuhan, yaitu protein yang merangsang proliferasi dan diferensiasi sel. Secara khusus, pertimbangkan pengikatan sel darah putih ke sel T. Ketika sel darah putih berikatan dengan sel T, ia melepaskan faktor pertumbuhan protein yang disebut interleukin-1. Hal ini menyebabkan sel T berproliferasi dan berdiferensiasi.

- Endokrin: Hormon endokrin adalah hormon yang dilepaskan ke dalam aliran darah oleh kelenjar endokrin, sel-sel reseptor jauh dari sumbernya. Contoh hormon endokrin adalah insulin, yang dilepaskan oleh pankreas ke dalam aliran darah, ia mengatur pengambilan glukosa oleh sel-sel hati dan otot.

Ada tiga klasifikasi utama yang harus diperhatikan:

- a. Steroid: Hormon steroid sebagian besar merupakan turunan kolesterol.



Gambar 146 Kolesterol dan turunannya

Hormon steroid dapat dikelompokkan menurut reseptor yang diikat: glukokortikoid, mineralokortikoid, androgen, estrogen, dan progestogen. Hormon steroid pada umumnya disintesa dari kolesterol didalam gonad dan kelenjar adrenal. Bentuk dari hormon ini, biasanya adalah lipid, bukan peptida, dan mempunyai kurir khusus berbentuk globulin. Hormon steroid biasanya bersifat katabolisme.

Tabel 21 Klasifikasi Hormon

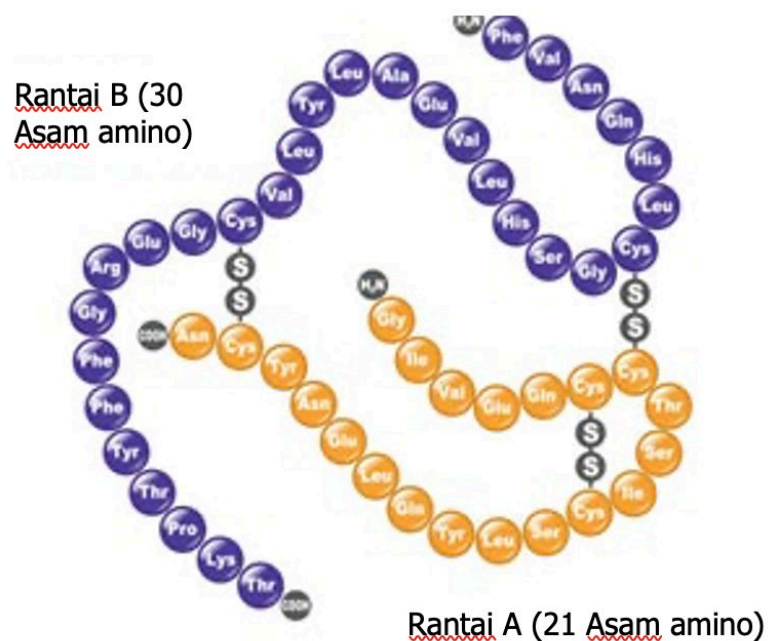
Hormon		[sembunyi]	
Prekursor	DHEA · ProT · T4		
Hormon	Intraselular	TH T4 · T3 · T2 · T1	
		Steroid <ul style="list-style-type: none"> Kortikosteroid <ul style="list-style-type: none"> Glukokortikoid Kortisol Mineralokortikoid Aldosteron · CORT Kalsitriol 	
		Peptida <ul style="list-style-type: none"> Faktor transkripsi AP-1 · C/EBP-α · β · NF-κB · FLIP · STAT · 1 · 2 · 3 · 4 · 5 · 6 Insulin · CGRP · CRH · SREBP · Androgen · Estrogen · Pregnenolon · Progestagen · P4 · Testosteron 	
	Ekstraselular	Glikoprotein hCG · FSH · GPIHBP-1 · LH · TSH	
		Katekolamin Adrenalin · PIH · Noradrenalin	
		Peptida ACTH · AM · Angiotensin · CT · Gastrin · Glukagon · GnRH · GH · GHIH · GHRH · GHS · IAPP · OT · PRL · TRH · VP	
		Sitokin <ul style="list-style-type: none"> Kemokina C5a · CCL2 · CCL5 · GSM-CSF · LPS · MCP-1 · IL-1 · IL-2 · IL-3 · IL-4 · IL-5 · IL-6 · IL-8 · IL-10 · IL-12 · IL-13 · IL-15 · IL-18 · IP-10 · RETN EPO · Interleukin · G-CSF · OM · LIF · IFN · CD · TNF-α · LT · Ligand · TGF · MIF 	
		Tropik	Faktor neurotropik <ul style="list-style-type: none"> Neurotrofin PSAP · SAP · NGF GFL Sitokin neuropoletik Neurotransmitter 5-HT Melatonin
			Faktor pertumbuhan EGF · HGF · MAP · PDGF · TGF · TPO
			ACTH · FSH · LH · TSH
		Inkretin GLP-1 · GIP	
	ET		
	Metabolit		
Prenoid			
Adrenokortikotopik · Eritropoietin · Feromon · Leptin · Isotosin · Gastrin · Laktogen · Mesotosin · Vasotosin			

- b. Asam amino: Beberapa hormon (dan neurotransmitter) diturunkan dari asam amino.
- c. Polipeptida: Banyak hormon adalah rantai asam amino.

2) Hormon Fungsional

a. Insulin

Insulin adalah hormon polipeptida yang disintesis di pankreas oleh sel, yang membentuk molekul rantai tunggal yang disebut proinsulin. Enzim mengeluarkan sebagian dari molekul proinsulin yang disebut peptida c, menghasilkan molekul insulin yang sebenarnya. Saat dibutuhkan, sel akan melepaskan insulin bersama dengan peptida c ke dalam aliran darah melalui eksositosis. Peran insulin dalam tubuh sudah diketahui dengan baik, dengan peran utamanya adalah untuk mengontrol pengambilan glukosa oleh sel-sel hati dan otot dan juga penyimpanan glukosa dalam bentuk glikogen.



Gambar 147 Insulin

Diabetes hasil dari kurangnya sekresi insulin oleh pankreas. Tanpa insulin, sel mengambil glukosa dengan sangat lambat. Kurangnya insulin menyebabkan ketidakmampuan untuk menggunakan glukosa darah untuk bahan bakar. Insulin adalah sinyal untuk kadar glukosa darah tinggi dan meningkatkan transportasi glukosa ke dalam sel. Hal ini merangsang sintesis glikogen, lemak, dan protein. Atau menghambat pemecahan glikogen, lemak, dan protein. Insulin, yang disekresikan oleh sel pankreas sebagai respons terhadap peningkatan kadar glukosa darah, merupakan sinyal bahwa glukosa berlimpah. Insulin berikatan

dengan reseptor spesifik pada permukaan sel dan memberikan efek metaboliknya melalui jalur sinyal yang melibatkan cascade fosforilasi reseptor tirosin kinase. Perhatikan bahwa insulin merangsang proses penyimpanan dan pada saat yang sama menghambat jalur degradatif.

Pankreas mengeluarkan insulin atau glukagon sebagai respons terhadap perubahan glukosa darah. Ketika glukosa memasuki aliran darah dari usus setelah makan kaya karbohidrat, peningkatan glukosa darah yang dihasilkan menyebabkan peningkatan sekresi insulin (dan penurunan sekresi glukagon). Pelepasan insulin oleh pankreas sebagian besar diatur oleh tingkat glukosa dalam darah yang dipasok ke pankreas. Hormon peptida insulin, glukagon, dan somatostatin diproduksi oleh kelompok sel pankreas khusus, sel Langerhans. Setiap jenis sel menghasilkan satu hormon: glukagon, insulin, somatostatin.

Sekresi insulin, Ketika glukosa darah naik, transporter GLUT2 membawa glukosa ke dalam sel- β , di mana ia segera diubah menjadi glukosa 6-fosfat oleh heksokinase (glukokinase) dan memasuki glikolisis. Peningkatan laju katabolisme glukosa meningkatkan [ATP], menyebabkan penutupan saluran K^+ bergerbang ATP di membran plasma. Pengurangan penghabisan K^+ mendepolarisasi membran, sehingga membuka saluran Ca^{2+} yang peka terhadap tegangan di membran plasma. Influx Ca^{2+} yang dihasilkan memicu pelepasan insulin melalui eksositosis. Rangsangan dari sistem saraf parasimpatis dan simpatis juga masing-masing merangsang dan menghambat pelepasan insulin. Insulin menurunkan glukosa darah dengan merangsang pengambilan glukosa oleh jaringan; glukosa darah yang berkurang dideteksi oleh sel sebagai fluks yang berkurang melalui reaksi heksokinase; ini memperlambat atau menghentikan pelepasan insulin. Regulasi umpan balik ini mempertahankan konsentrasi glukosa darah hampir konstan meskipun fluktuasi besar dalam asupan makanan.

Insulin melawan kadar glukosa tinggi dalam darah. Insulin merangsang pengambilan glukosa oleh otot dan jaringan adiposa, di mana glukosa diubah menjadi glukosa 6-fosfat. Di hati, insulin juga mengaktifkan glikogen sintase dan menginaktivasi

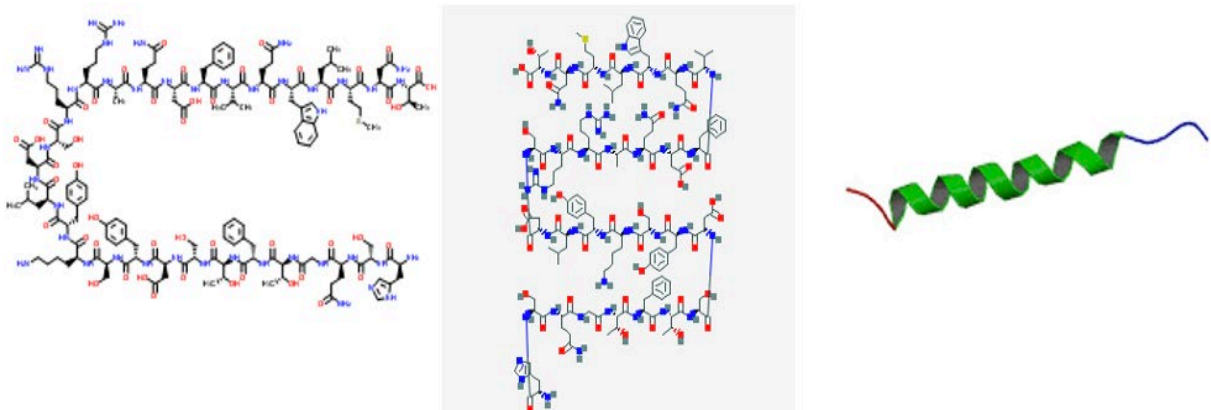
glikogen fosforilase, sehingga sebagian besar glukosa 6-fosfat disalurkan menjadi glikogen. Insulin juga merangsang penyimpanan kelebihan bahan bakar sebagai lemak. Di hati, insulin mengaktifkan oksidasi glukosa 6-fosfat menjadi piruvat melalui glikolisis dan oksidasi piruvat menjadi asetil-KoA. Jika tidak dioksidasi lebih lanjut untuk produksi energi, asetil-KoA ini digunakan untuk sintesis asam lemak di hati, dan asam lemak diekspor sebagai trigliserida ke jaringan adiposa. Asam lemak ini pada akhirnya berasal dari kelebihan glukosa yang diambil dari darah oleh hati. Singkatnya, efek insulin adalah untuk mendukung konversi kelebihan glukosa darah menjadi dua bentuk penyimpanan: glikogen (dalam hati dan otot) dan triasilgliserol (dalam jaringan adiposa).

Diabetes Mellitus timbul dari cacat dalam produksi insulin atau tindakan. Diabetes mellitus, yang disebabkan oleh defisiensi sekresi atau kerja insulin, adalah penyakit yang relatif umum. Ada dua kelas klinis utama diabetes mellitus: diabetes tipe I, atau diabetes mellitus tergantung insulin (IDDM), dan diabetes tipe II, atau diabetes mellitus tidak tergantung insulin (NIDDM), juga disebut diabetes resisten insulin. Pada diabetes tipe I, penyakit ini dimulai sejak dini dan dengan cepat menjadi parah. Penyakit ini merespon terhadap injeksi insulin, karena efek metabolik berasal dari sel pankreas dan akibatnya ketidakmampuan untuk memproduksi insulin yang cukup. IDDM membutuhkan terapi insulin dan kontrol seumur hidup yang hati-hati terhadap keseimbangan antara asupan makanan dan dosis insulin. Gejala khas diabetes tipe I (dan tipe II) adalah rasa haus yang berlebihan dan sering buang air kecil (poliuria), yang menyebabkan asupan air dalam jumlah besar (polidipsia) ("diabetes mellitus" berarti "ekskresi urin manis yang berlebihan"). Gejala-gejala ini disebabkan oleh ekskresi glukosa dalam jumlah besar dalam urin, suatu kondisi yang dikenal sebagai glukosuria. Diabetes tipe II lambat berkembang (biasanya pada orang tua yang gemuk), dan gejalanya lebih ringan dan sering tidak dikenali pada awalnya. Ini benar-benar sekelompok penyakit di mana aktivitas regulasi insulin rusak: insulin diproduksi, tetapi beberapa fitur dari sistem respons insulin rusak. Orang-orang ini resisten terhadap insulin. Individu dengan kedua jenis diabetes tidak dapat mengambil glukosa secara efisien dari darah; ingat bahwa insulin memicu pergerakan transporter glukosa GLUT4 ke membran plasma otot dan jaringan

adiposa. Perubahan metabolik karakteristik lain pada diabetes adalah oksidasi asam lemak yang berlebihan tetapi tidak lengkap di hati. Sekresi insulin mencerminkan ukuran cadangan lemak (adipositas) dan keseimbangan energi saat ini (kadar glukosa darah). Insulin bekerja pada reseptor insulin di hipotalamus untuk menghambat makan. Insulin juga memberi sinyal pada otot, hati, dan jaringan adiposa untuk meningkatkan reaksi katabolik, termasuk oksidasi lemak, yang mengakibatkan penurunan berat badan.

b. Glukagon

Glukagon, hormon peptida yang disintesis dan disekresikan dari sel Langerhans pankreas, meningkatkan kadar glukosa darah. Efeknya berlawanan dengan insulin, yang menurunkan kadar glukosa darah. Pankreas melepaskan glukagon ketika kadar gula darah (glukosa) turun terlalu rendah. Glukagon menyebabkan hati mengubah glikogen yang disimpan menjadi glukosa, yang dilepaskan ke dalam aliran darah. Kadar glukosa darah yang tinggi merangsang pelepasan insulin. Insulin memungkinkan glukosa untuk diambil dan digunakan oleh jaringan yang bergantung pada insulin. Dengan demikian, glukagon dan insulin adalah bagian dari sistem umpan balik yang menjaga kadar glukosa darah pada tingkat yang stabil. Struktur primer dari Glukagon adalah yang terdiri dari 29 asam amino dan mempunyai massa molekul 3483 Da. His-Ser-Gln-Gly-Thr-Phe-Thr-Ser-Asp-Tyr-Ser-Lys-Tyr-Leu-Asp-Ser-Arg-Arg-Ala-Gln-Asp-Phe-Val-Gln-Trp-Leu-Met-Asn-Thr.



Gambar 148 Struktur Glukagon

Regulasi dan fungsi, Sekresi glukagon dirangsang oleh hipoglikemia, epinefrin, arginin, alanin, asetilkolin, dan kolesistokinin. Sekresi glukagon dihambat oleh somatostatin, insulin, peningkatan asam lemak bebas dan asam keto ke dalam darah, dan peningkatan produksi urea. Glukosa disimpan di hati dalam bentuk glikogen, yang merupakan rantai polimer seperti pati yang terdiri dari molekul glukosa. Sel hati (hepatosit) memiliki reseptor glukagon. Ketika glukagon berikatan dengan reseptor glukagon, sel-sel hati mengubah polimer glikogen menjadi molekul glukosa individu, dan melepaskannya ke dalam aliran darah, dalam proses yang dikenal sebagai glikogenolisis. Saat simpanan ini habis, glukagon kemudian mendorong hati dan ginjal untuk mensintesis glukosa tambahan melalui glukoneogenesis. Glukagon mematikan glikolisis di hati, menyebabkan zat antara glikolitik dialihkan ke glukoneogenesis.

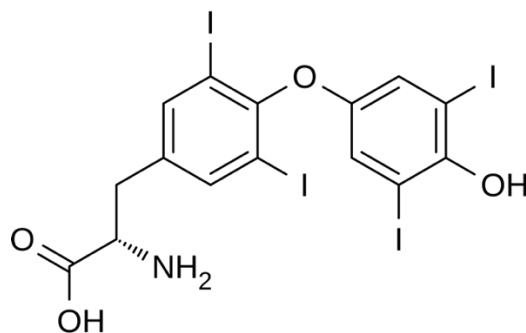
Glukagon adalah sinyal untuk kadar glukosa darah rendah. Ini merangsang pemecahan glikogen, lemak, dan protein. Ini menghambat sintesis glikogen, lemak, dan protein. Beberapa jam setelah asupan karbohidrat makanan, kadar glukosa darah turun sedikit karena oksidasi glukosa yang sedang berlangsung oleh otak dan jaringan lain. Meskipun target utamanya adalah hati, glukagon (seperti epinefrin) juga mempengaruhi jaringan adiposa, mengaktifkan pemecahan TAG dengan mengaktifkan triasilgliserol lipase dan membebaskan asam lemak bebas, yang diekspor ke hati dan jaringan lain sebagai bahan bakar, menghemat glukosa untuk otak. Oleh karena itu, efek bersih glukagon adalah untuk merangsang sintesis dan pelepasan glukosa oleh hati dan untuk memobilisasi asam lemak dari jaringan adiposa, untuk digunakan sebagai pengganti glukosa sebagai bahan bakar untuk jaringan selain otak.

Selama puasa dan kelaparan, metabolisme bergeser untuk menyediakan bahan bakar otak. Cadangan bahan bakar manusia dewasa yang sehat terdiri dari tiga jenis: glikogen yang disimpan di hati dan, dalam jumlah yang relatif kecil, di otot; triasilgliserol dalam jumlah besar dalam jaringan adiposa; dan protein jaringan, yang dapat didegradasi bila diperlukan untuk menyediakan bahan bakar. Dalam beberapa

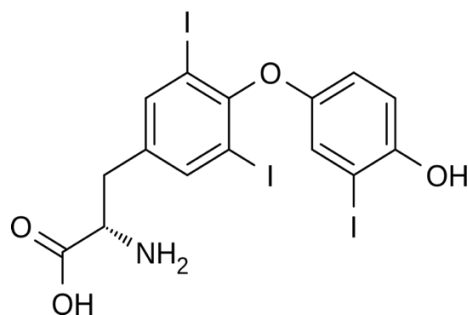
jam pertama setelah makan, kadar glukosa darah sedikit berkurang, dan jaringan menerima glukosa yang dilepaskan dari glikogen hati. Ada sedikit atau tidak ada sintesis lipid. Pada 24 jam setelah makan, glukosa darah turun lebih jauh, sekresi insulin melambat, dan sekresi glukagon meningkat.

c. Hormon Tiroid

Hormon tiroid (T4 dan T3) adalah hormon berbasis tirosin yang diproduksi oleh sel-sel folikel kelenjar tiroid dan diatur oleh TSH yang dibuat oleh tirotrop kelenjar hipofisis anterior, terutama bertanggung jawab untuk pengaturan metabolisme. Yodium diperlukan untuk produksi T3 (triiodothyronine) dan T4 (tiroksin). Kekurangan yodium menyebabkan penurunan produksi T3 dan T4, memperbesar jaringan tiroid dan akan menyebabkan penyakit yang dikenal sebagai gondok. Tiroid bekerja pada hampir setiap sel dalam tubuh. Mereka bertindak untuk meningkatkan tingkat metabolisme basal, mempengaruhi sintesis protein, membantu mengatur pertumbuhan tulang panjang (sinergi dengan hormon pertumbuhan) dan pematangan saraf, dan meningkatkan sensitivitas tubuh terhadap katekolamin (seperti adrenalin). Hormon tiroid sangat penting untuk perkembangan dan diferensiasi yang tepat dari semua sel tubuh manusia. Hormon-hormon ini juga mengatur metabolisme protein, lemak, dan karbohidrat, yang memengaruhi cara sel manusia menggunakan senyawa energik. Mereka juga merangsang metabolisme vitamin. Banyak rangsangan fisiologis dan patologis mempengaruhi sintesis hormon tiroid. Hormon tiroid menyebabkan pembentukan panas pada manusia. Namun, fungsi thyronamines melalui beberapa mekanisme yang tidak diketahui untuk menghambat aktivitas saraf; ini memainkan peran penting dalam siklus hibernasi mamalia dan perilaku molting burung.



Gambar 149 Struktur (S)-thyroxine (T4).



Gambar 150 Struktur *S*-triiodothyronine (T_3 , juga disebut liothyronin

Yodium sangat penting untuk sintesis hormon tiroid, Iodida secara aktif diserap dari aliran darah melalui proses yang disebut perangkap iodida. Dalam proses ini, natrium diangkut bersama dengan iodida dari sisi basolateral membran ke dalam sel dan kemudian terkonsentrasi di folikel tiroid hingga sekitar tiga puluh kali konsentrasinya di dalam darah. Melalui reaksi dengan enzim thyroperoxidase, yodium terikat pada residu tirosin dalam molekul tiroglobulin, membentuk monoiodotirosin (MIT) dan diiodotirosin (DIT). Menghubungkan dua bagian DIT menghasilkan tiroksin. Menggabungkan satu partikel MIT dan satu partikel DIT menghasilkan triiodothyronine. Jika ada kekurangan diet yodium, tiroid tidak akan mampu membuat hormon tiroid. Kurangnya hormon tiroid akan menyebabkan penurunan umpan balik negatif pada hipofisis, yang menyebabkan peningkatan produksi hormon perangsang tiroid, yang menyebabkan tiroid membesar (kondisi medis yang dihasilkan disebut gondok koloid endemik).

Hormon tiroid diangkut oleh Thyroid-Binding Globulin, Thyroxine binding globulin (TBG), suatu glikoprotein mengikat T4 dan T3 dan memiliki kapasitas untuk mengikat 20 g/dL plasma. Dalam keadaan normal, TBG mengikat secara nonkovalen hampir semua T4 dan T3 dalam plasma, dan mengikat T4 dengan afinitas lebih besar daripada T3. Fraksi kecil, tidak terikat (bebas) bertanggung jawab atas aktivitas biologis. Jadi, terlepas dari perbedaan besar dalam jumlah total, fraksi bebas T3 mendekati T4, dan mengingat bahwa T3 secara intrinsik lebih aktif daripada T4, sebagian besar aktivitas biologis dikaitkan dengan T3. TBG tidak mengikat hormon lain.

Sirkulasi dan transportasi, Sebagian besar hormon tiroid yang beredar dalam darah terikat untuk mengangkut protein. Hanya sebagian kecil dari hormon yang bersirkulasi yang bebas (tidak terikat) dan aktif secara biologis, oleh karena itu

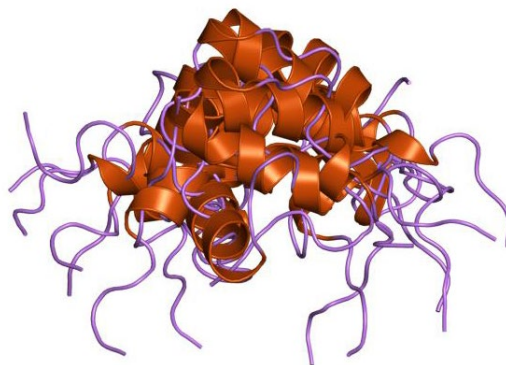
mengukur konsentrasi hormon tiroid bebas adalah nilai diagnostik yang besar. Ketika hormon tiroid terikat, itu tidak aktif, jadi jumlah T3/T4 bebas adalah yang penting. Untuk alasan ini, mengukur tiroksin total dalam darah bisa menyesatkan.

Penyakit terkait, Kelebihan dan kekurangan tiroksin dapat menyebabkan gangguan.

- Hipertiroidisme (contohnya Penyakit Graves) adalah sindrom klinis yang disebabkan oleh kelebihan tiroksin bebas yang bersirkulasi, triiodotironin bebas, atau keduanya. Ini adalah gangguan umum yang mempengaruhi sekitar 2% wanita dan 0,2% pria.
- Hipotiroidisme (contohnya tiroiditis Hashimoto) adalah kasus defisiensi tiroksin, triiodotironin, atau keduanya.

d. Hormon Paratiroid

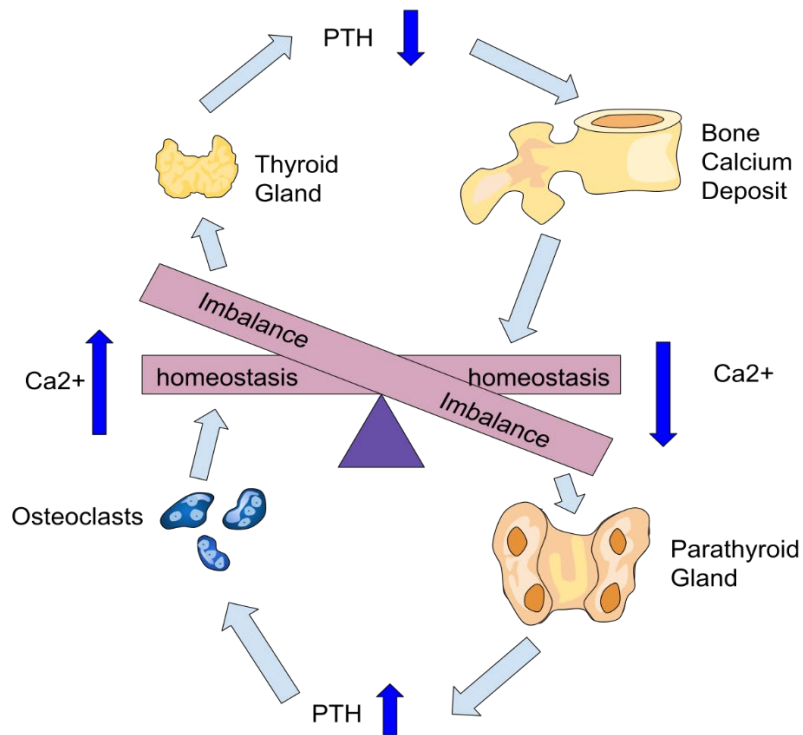
Hormon paratiroid (PTH), parathormon atau parathyrin, disekresikan oleh sel-sel utama kelenjar paratiroid. Ini bertindak untuk meningkatkan konsentrasi kalsium (Ca^{2+}) dalam darah, sedangkan kalsitonin (hormon yang diproduksi oleh sel-sel parafollicular kelenjar tiroid) bertindak untuk menurunkan konsentrasi kalsium. PTH bekerja untuk meningkatkan konsentrasi kalsium dalam darah dengan bekerja pada reseptor hormon paratiroid 1 (kadar tinggi di tulang dan ginjal) dan reseptor hormon paratiroid 2 (kadar tinggi di sistem saraf pusat, pankreas, testis, dan plasenta). PTH adalah salah satu hormon pertama yang terbukti menggunakan G-protein, sistem pembawa pesan kedua adenilil siklase. Hormon paratiroid mengatur kalsium serum melalui efeknya (Tabel 22).



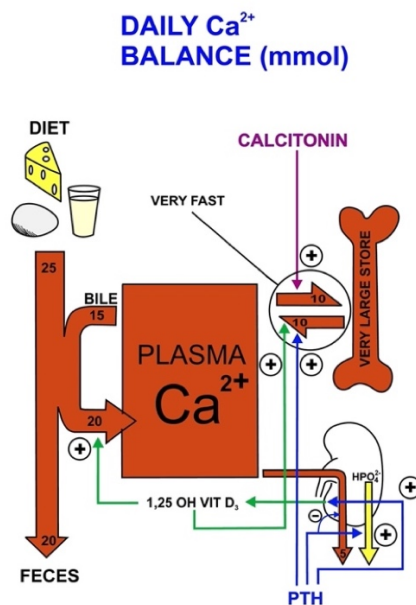
Gambar 151 Struktur Hormon Paratiroid Manusia 1-37 dalam larutan

Tabel 22 Pengaturan hormon paratiroid

Wilayah/Daerah	Efek/Memengaruhi
Tulang	PTH meningkatkan pelepasan kalsium dari reservoir besar yang terkandung dalam tulang. Resorpsi tulang adalah penghancuran normal tulang oleh osteoklas, yang secara tidak langsung dirangsang oleh PTH membentuk osteoklas baru, yang pada akhirnya meningkatkan resorpsi tulang.
Ginjal	PTH meningkatkan reabsorpsi aktif kalsium dan magnesium dari tubulus distal ginjal. Saat tulang terdegradasi, kalsium dan fosfat dilepaskan. Ini juga menurunkan reabsorpsi fosfat, dengan kehilangan konsentrasi fosfat plasma. Ketika rasio kalsium:fosfat meningkat, lebih banyak kalsium bebas dalam sirkulasi.
Usus	PTH meningkatkan penyerapan kalsium di usus dengan meningkatkan produksi vitamin D aktif. Aktivasi vitamin D terjadi di ginjal. PTH mengubah vitamin D menjadi bentuk aktifnya (1,25-dihidroksi vitamin D). Bentuk vitamin D yang diaktifkan ini meningkatkan penyerapan kalsium (sebagai ion Ca^{2+}) oleh usus melalui calbindin.



Gambar 152 Kelenjar paratiroid melepaskan PTH yang menjaga kalsium dalam homeostasis.



Gambar 153 Keseimbangan konsentrasi Ca²

Gambaran diagram pergerakan ion kalsium masuk dan keluar plasma darah (kotak tengah berlabel PLASMA Ca²⁺) pada orang dewasa dalam keseimbangan kalsium: Lebar panah merah yang menunjukkan pergerakan masuk dan keluar plasma kira-kira sebanding dengan jumlah harian kalsium bergerak ke arah yang

ditunjukkan. Ukuran bujur sangkar tidak sebanding dengan ukuran diagram tulang, yang mewakili kalsium yang ada dalam kerangka, dan mengandung sekitar 25.000 mmol (atau 1 kg) kalsium dibandingkan dengan 9 mmol (360 mg) yang terlarut dalam plasma darah. Panah sempit berwarna berbeda menunjukkan di mana hormon tertentu bekerja, dan efeknya ("+" berarti merangsang; "-" berarti menghambat) ketika kadar plasmanya tinggi. PTH adalah hormon paratiroid, 1,25 OH VIT D3 adalah calcitriol atau 1,25 dihydroxyvitamin D3, dan CALCITONIN adalah hormon yang disekresikan oleh kelenjar tiroid ketika kadar kalsium terionisasi plasma tinggi atau meningkat. Diagram tidak menunjukkan jumlah kalsium yang sangat kecil yang masuk dan keluar dari sel-sel tubuh, juga tidak menunjukkan kalsium yang terikat pada protein ekstraseluler (khususnya protein plasma) atau fosfat plasma.

Regulasi sekresi PTH, Sekresi hormon paratiroid dikendalikan terutama oleh $[Ca^{2+}]$ serum melalui umpan balik negatif. Reseptor penginderaan kalsium yang terletak di sel paratiroid diaktifkan ketika $[Ca^{2+}]$ rendah. Hipomagnesemia menghambat sekresi PTH dan juga menyebabkan resistensi terhadap PTH, yang mengarah ke bentuk hipoparatiroidisme yang reversibel. Hipermagnesemia juga mengakibatkan penghambatan sekresi PTH. Stimulator PTH termasuk penurunan serum $[Ca^{2+}]$, penurunan ringan serum $[Mg^{2+}]$, dan peningkatan serum fosfat. Inhibitor termasuk peningkatan serum $[Ca^{2+}]$, penurunan berat serum $[Mg^{2+}]$, yang juga menghasilkan gejala hipoparatiroidisme (seperti hipokalsemia), dan kalsitriol.

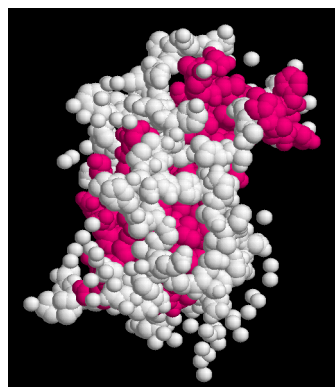
Signifikansi klinis:

- Hiperparatiroidisme, adanya hormon paratiroid dalam jumlah berlebihan dalam darah, terjadi dalam dua keadaan yang sangat berbeda. Hiperparatiroidisme primer disebabkan oleh hipersekresi PTH yang abnormal dan otonom di kelenjar paratiroid, sedangkan hiperparatiroidisme sekunder adalah tingkat PTH yang cukup tinggi yang terlihat sebagai respons fisiologis terhadap hipokalsemia.
- Tingkat PTH yang rendah dalam darah dikenal sebagai hipoparatiroidisme dan paling sering disebabkan oleh kerusakan atau pengangkatan kelenjar paratiroid selama operasi tiroid.

- Ada sejumlah kondisi genetik yang jarang tetapi dijelaskan dengan baik yang mempengaruhi metabolisme hormon paratiroid, termasuk pseudohipoparatiroidisme, hiperkalsemia hipokalsiurik familial, dan hipokalsemia hiperkalsiurik dominan autosomal.

e. Hormon pertumbuhan

Hormon pertumbuhan (GH atau HGH), juga dikenal sebagai somatotropin atau somatotropin, adalah hormon peptida yang merangsang pertumbuhan, reproduksi sel dan regenerasi pada manusia. Ini adalah jenis mitogen yang khusus hanya untuk jenis sel tertentu. Hormon pertumbuhan adalah polipeptida rantai tunggal yang disintesis, disimpan, dan disekresikan oleh sel somatotropik dalam sayap lateral kelenjar hipofisis anterior. Kelenjar hipofisis anterior mensekresi hormon yang cenderung meningkatkan glukosa darah dan oleh karena itu bertentangan dengan kerja insulin. Sekresi hormon pertumbuhan dirangsang oleh hipoglikemia; menurunkan ambilan glukosa di otot. Beberapa dari efek ini mungkin tidak langsung, karena merangsang mobilisasi asam lemak bebas dari jaringan adiposa, yang dengan sendirinya menghambat penggunaan glukosa. Hormon pertumbuhan meningkatkan transportasi asam amino di semua sel, dan estrogen melakukan ini di dalam rahim. Kekurangan hormon ini menghasilkan dwarfisme, dan kelebihan menyebabkan gigantisme.



Gambar 154 somatotropin

Regulasi sekresi hormon pertumbuhan, sekresi hormon pertumbuhan (GH) di hipofisis diatur oleh inti neurosekretori hipotalamus. Sel-sel ini melepaskan peptida *Growth hormone-releasing hormone* (GHRH atau somatocrinin) dan *Growth hormone-inhibiting hormone* (GHIH atau somatostatin) ke dalam darah vena portal hipofisis yang mengelilingi hipofisis. Pelepasan GH di hipofisis terutama ditentukan oleh keseimbangan kedua peptida ini, yang pada gilirannya dipengaruhi oleh banyak stimulator fisiologis (misalnya, olahraga, nutrisi, tidur) dan penghambat (misalnya, asam lemak bebas) dari sekresi GH. Sejumlah faktor diketahui mempengaruhi sekresi GH, seperti usia, jenis kelamin, diet, olahraga, stres, dan hormon lainnya.

Pengaturan, stimulator sekresi hormon pertumbuhan (GH) termasuk hormon peptida, ghrelin, hormon seks, hipoglikemia, tidur nyenyak, niasin, puasa, dan olahraga berat. Inhibitor sekresi GH termasuk somatostatin, konsentrasi sirkulasi GH dan IGF-1 (umpan balik negatif pada hipofisis dan hipotalamus), hiperglikemia, glukokortikoid, dan dihidrotestosteron.

Efek hormon pertumbuhan

Peningkatan tinggi badan selama masa kanak-kanak adalah efek GH yang paling dikenal luas. Selain menambah tinggi badan pada anak-anak dan remaja, hormon pertumbuhan memiliki banyak efek lain pada tubuh seperti:

- Meningkatkan retensi kalsium, dan memperkuat dan meningkatkan mineralisasi tulang
- Meningkatkan massa otot melalui hipertrofi sarkomer
- Mempromosikan lipolysis
- Meningkatkan sintesis protein
- Merangsang pertumbuhan semua organ dalam kecuali otak
- Berperan dalam homeostasis
- Mengurangi pengambilan glukosa oleh hati
- Meningkatkan glukoneogenesis di hati
- Berkontribusi pada pemeliharaan dan fungsi pulau pancreas
- Merangsang sistem kekebalan tubuh

Signifikansi klinis:

Kelebihan, Penyakit kelebihan GH yang paling umum adalah tumor hipofisis yang terdiri dari sel-sel somatotrof hipofisis anterior. Adenoma somatotrof ini jinak dan tumbuh perlahan, secara bertahap menghasilkan lebih banyak GH. Selama bertahun-tahun, masalah klinis utama adalah kelebihan GH. Akhirnya, adenoma dapat menjadi cukup besar untuk menyebabkan sakit kepala, mengganggu penglihatan karena tekanan pada saraf optik, atau menyebabkan defisiensi hormon hipofisis lainnya karena perpindahan.

Kelebihan GH yang berkepanjangan mengentalkan tulang rahang, jari tangan dan kaki. Berat rahang yang dihasilkan dan peningkatan ukuran jari disebut sebagai akromegali. Masalah yang menyertainya bisa termasuk berkeringat, tekanan pada saraf (misalnya, carpal tunnel syndrome), kelemahan otot, kelebihan sex hormone-binding globulin (SHBG), resistensi insulin atau bahkan bentuk diabetes tipe 2 yang langka, dan penurunan fungsi seksual.

Tumor yang mensekresi GH biasanya dikenali pada dekade kelima kehidupan. Sangat jarang tumor seperti itu terjadi pada masa kanak-kanak, tetapi, ketika terjadi, GH yang berlebihan dapat menyebabkan pertumbuhan yang berlebihan, yang secara tradisional disebut sebagai gigantisme hipofisis.

Kekurangan, Efek dari defisiensi hormon pertumbuhan bervariasi tergantung pada usia di mana mereka terjadi. Pada anak-anak, kegagalan pertumbuhan dan perawakan pendek adalah manifestasi utama dari defisiensi GH, dengan penyebab umum termasuk kondisi genetik dan malformasi kongenital. Hal ini juga dapat menyebabkan kematangan seksual tertunda. Pada orang dewasa, defisiensi jarang terjadi, dengan penyebab paling umum adalah adenoma hipofisis, dan lainnya termasuk kelanjutan dari masalah masa kanak-kanak, trauma struktural lainnya, dan GHD idiopatik yang sangat jarang. Orang dewasa dengan GHD "cenderung mengalami peningkatan relatif dalam massa lemak dan penurunan relatif pada massa otot dan, dalam banyak kasus, penurunan energi dan kualitas hidup".

B. Antibodi dan Antigen

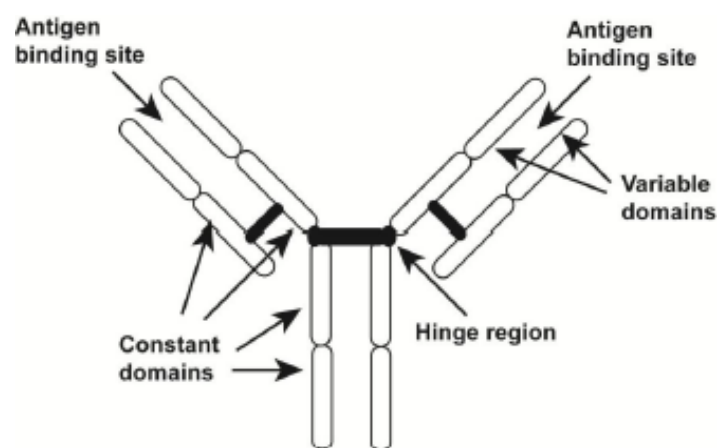
Antibodi dapat didefinisikan sebagai protein yang mengenali dan menetralkan toksin mikroba atau zat asing seperti bakteri dan virus. Satu-satunya sel yang membuat antibodi adalah limfosit B. Terutama ada dua bentuk antibody, salah satunya yang terikat membran dan bertindak sebagai reseptor antigen pada permukaan limfosit B dan yang lainnya terlibat dalam penghambatan masuk dan penyebaran patogen dan ditemukan dalam sirkulasi darah dan jaringan ikat. Substansi atau molekul yang diidentifikasi oleh antibodi atau yang dapat membangkitkan respons antibodi disebut antigen.

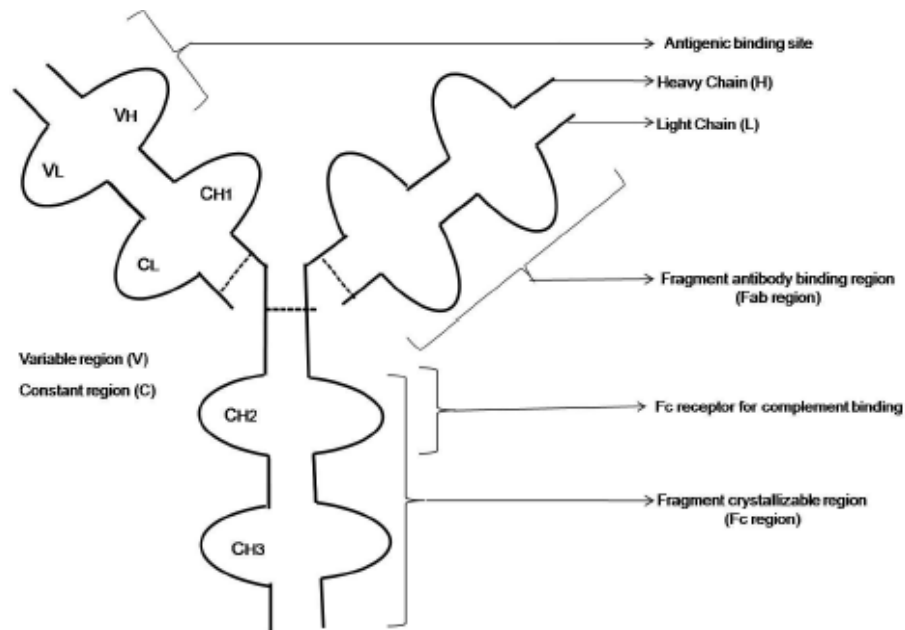
Beberapa istilah yang umum digunakan: a) Serum, pembentukan pembekuan dalam darah meninggalkan cairan sisa yang mengandung antibodi. Antibodi ini dalam residu membentuk serum. b) Antiserum, serum mengandung sekumpulan antibodi dan ketika antibodi ini menunjukkan spesifisitas terhadap antigen tertentu dengan mengikatnya, antibodi tersebut dikenal sebagai antiserum. c) Serologi, serologi dapat didefinisikan sebagai studi tentang serum darah atau antibodi dan reaksinya dengan antigen tertentu.

1. Struktur Antibodi

Antibodi juga disebut sebagai imunoglobulin dan merupakan struktur protein berbentuk Y. Antibodi terdiri dari dua rantai ringan dan berat yang identik. Daerah variabel terminal amino (V) ditemukan di kedua rantai berat dan ringan dan mereka mengambil bagian dalam pengenalan antigen. Fungsi efektor diarahkan oleh daerah terminal karboksil (C) dari rantai berat tetapi daerah C juga ditemukan di kedua rantai tersebut. Baik rantai berat dan ringan terdiri dari domain Immunoglobulin (Ig). Domain Ig adalah domain protein yang terdiri dari unit berulang yang terlipat dari 110 asam amino yang panjangnya diapit di antara dua lapisan lembaran β lipat. Dua lapisan lembaran β lipat disatukan oleh jembatan disulfida dan ada loop pendek yang menghubungkan untaian yang berdampingan dari setiap lembar. Asam amino di beberapa loop ini paling penting untuk pengenalan antigen. Struktur rantai ringan dan berat hampir mirip. Dalam rantai ringan ada satu domain Ig wilayah V dan satu

domain Ig wilayah C sedangkan pada rantai berat wilayah V terdiri dari satu domain Ig dan wilayah C terdiri dari tiga atau empat domain Ig. Situs pengikatan antigen dibentuk oleh wilayah V dari satu rantai berat dan wilayah V yang berdekatan dari satu rantai ringan. Ikatan disulfida yang terbentuk antara residu sistein menghubungkan rantai ringan dan berat di ujung karboksil rantai ringan dan domain CH-1 rantai berat. Asosiasi rantai berat dan ringan terjadi sebagian karena interaksi non-kovalen antara domain VL dan VH dan antara domain CL dan CH1. Dua rantai berat dari masing-masing entitas antibodi dihubungkan secara kovalen oleh ikatan disulfida. Pada antibodi IgG, ikatan disulfida terbentuk antara residu sistein di daerah CH2 yang dekat dengan daerah yang disebut engsel. Daerah engsel ini lebih mungkin untuk mengalami pembelahan proteolitik. Pengikatan antigen fragmen (Fab fragmen) adalah bagian pada antibodi yang memiliki kemampuan untuk mengikat antigen dan terdiri dari satu variabel dan satu domain konstan dari masing-masing rantai berat dan rantai ringan. Wilayah yang dapat dikristalisasi fragmen (wilayah Fc) adalah wilayah distal antibodi yang terdiri dari dua peptida terkait disulfida yang identik yang mengandung domain rantai berat CH₂ dan CH₃. Wilayah Fc berkomunikasi dengan beberapa reseptor permukaan sel yang disebut reseptor Fc dan fitur wilayah Fc ini membantu antibodi untuk merangsang sistem kekebalan.





Gambar 155 Antigen

2. Antibodi monoklonal

Konsep antibodi monoklonal pertama kali diberikan oleh Georges Kohler dan Cesar Milstein pada tahun 1975. Antibodi monoklonal adalah antibodi yang spesifik untuk satu antigen tertentu karena dibuat oleh sel imun identik yang merupakan beberapa salinan dari induk yang sama. sel misalnya setiap sel tumor dari wilayah tertentu dalam sel plasma, adalah monoklonal dan dengan demikian memiliki kemampuan untuk menghasilkan antibodi dengan spesifisitas yang sama. Teknik dasar yang terlibat dalam pembuatan antibodi monoklonal bergantung pada fusi sel B dari tikus yang diimunisasi dengan garis sel myeloma (garis sel tumor) dan membiarkan sel tumbuh dalam kondisi di mana sel normal dan sel tumor tidak dapat bertahan hidup. Sel-sel yang menyatu dan mampu tumbuh melalui prosedur ini disebut hibridoma.

Penggunaan antibodi monoclonal:

- Antibodi monoklonal membantu dalam imunodiagnosis dengan mendeteksi antigen atau antibodi tertentu.
- Banyak antibodi spesifik tumor membantu dalam deteksi tumor.
- Beberapa antibodi monoklonal memiliki kegunaan terapeutik. Misalnya, faktor nekrosis tumor sitokin (TNF) digunakan untuk mengobati banyak kondisi inflamasi.

- d) Antibodi monoklonal membantu dalam identifikasi populasi sel individu mis. diferensiasi limfosit dan leukosit telah menjadi mungkin sekarang.
- e) Mereka membantu dalam pemurnian sel untuk menghasilkan info tentang fitur dan fungsinya.

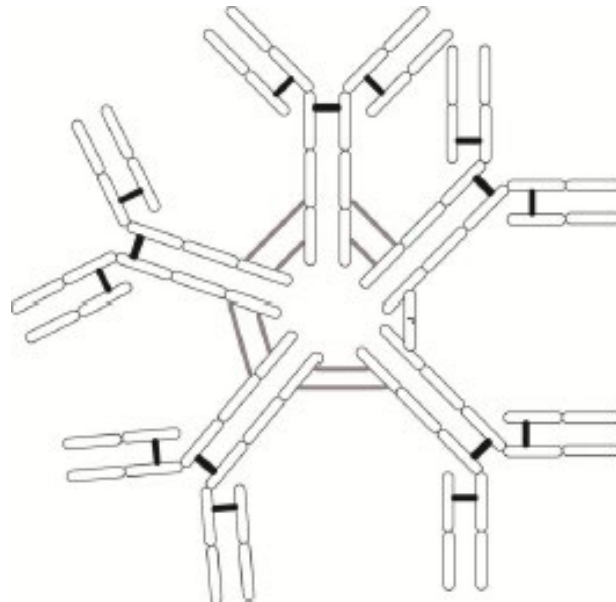
Imunoglobulin (Ig), seperti kebanyakan protein, rantai berat dan ringan imunoglobulin dibentuk di retikulum endoplasma kasar. Chaperones adalah protein yang diperlukan untuk pelipatan atau pembukaan rantai berat Ig yang tepat dan juga diperlukan selama perakitan rantai berat dengan rantai ringan. Proses perakitan meliputi penstabilan rantai berat dan ringan dengan ikatan disulfida dan asosiasi timbal balik antara rantai berat dan ringan dan seluruh proses terjadi di retikulum endoplasma. Ini diikuti dengan modifikasi karbohidrat yang diperlukan pada akhir proses perakitan. Pada akhir proses ini molekul Ig dipisahkan dari senyawa lainnya dan dipindahkan ke kompleks golgi untuk modifikasi karbohidrat, dan akhirnya ke membran plasma dalam vesikel. Molekul Ig terikat di dalam membran plasma dan bentuk yang disekresikan menemukan jalan keluar dari sel.

Bentuk membran rantai berat disintesis oleh prototipe yang disebut sel pra-B, yang mensintesis polipeptida Ig. Ekspresi reseptor sel pra-B pada permukaan sel membutuhkan asosiasi rantai berat dengan rantai ringan pengganti. Pematangan sel B lebih lanjut dikaitkan dengan modifikasi ekspresi gen Ig yang mengarah pada pembentukan molekul Ig dalam bentuk yang berbeda. Limfosit B dewasa berdiferensiasi menjadi sel yang mensekresi antibodi hanya jika dirangsang oleh benda asing atau antigen apa pun.

Waktu paruh antibody, waktu paruh antibodi bervariasi dalam sirkulasi. Molekul IgG memiliki waktu paruh 21 hingga 28 hari sedangkan IgE memiliki waktu paruh terpendek sekitar 2 hari. Waktu paruh IgG yang panjang ditentukan oleh kemampuannya untuk berikatan dengan reseptor Fc yang disebut reseptor Fc neonatus. Ini adalah reseptor Fc neonatal yang bertanggung jawab untuk transfer IgG ibu melintasi penghalang plasenta.

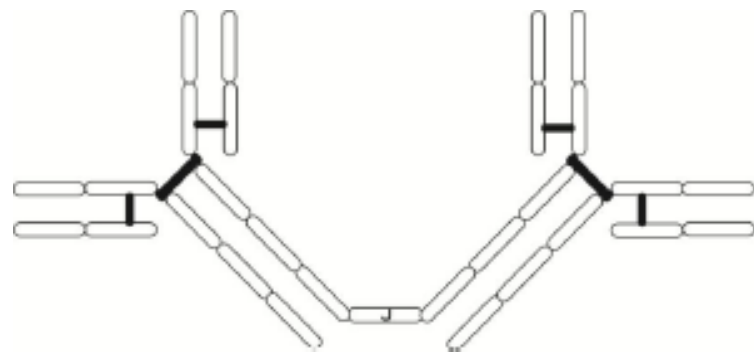
Tabel 23 Sifat biologis molekul Ig yang berbeda:

Kelas/Properti imunoglobulin	Berat molekul (Daltons)	Subunits	Constant heavy region (CH)	Rantai berat	Daerah sintesis
IgM	900,000	5	4	μ	Limpa dan kelenjar getah bening
IgG	180,000	1	3	γ	Limpa dan kelenjar getah bening
IgA	360,000	2	4	α	Saluran usus dan pernapasan
IgE	200,000	1	4	ϵ	Saluran usus dan pernapasan
IgD	180,000	1	3	δ	Limpa dan kelenjar getah bening

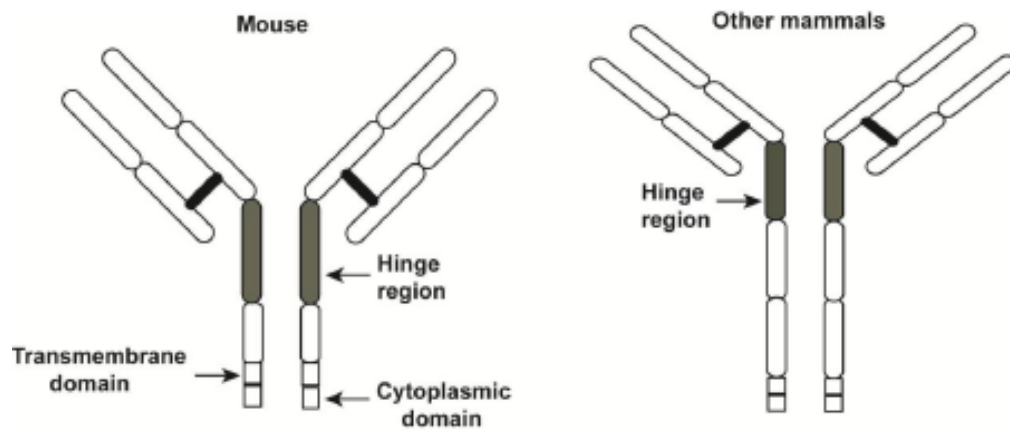


Gambar 156 Kelas imunoglobulin yang berbeda: IgM

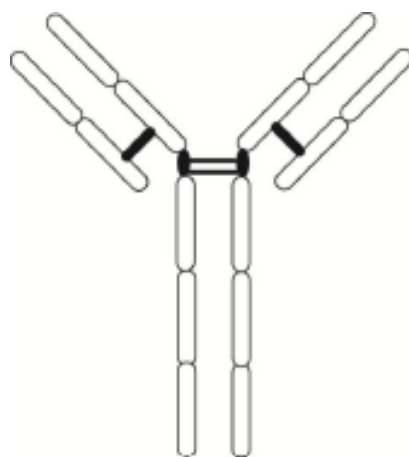
IgA



IgD



IgE



Gambar 158 Struktur IgA IgD, IgE

3. Karakteristik antigen

- 1) Salah satu karakter antigen yang paling penting adalah berikatan secara spesifik dengan antibodi.
- 2) Hampir semua antigen diidentifikasi oleh antibodi spesifik tetapi sangat sedikit yang memiliki kemampuan untuk merangsang antibodi. Kadang-kadang untuk memprovokasi respon imun, ahli imunologi menyatukan beberapa salinan molekul kecil yang disebut haptan ke protein sebelum imunisasi dan protein yang melekat padanya dikenal sebagai pembawa.
- 3) Antigen asing biasanya jauh lebih besar daripada daerah di mana pengikatan sebenarnya terjadi antara antigen dan antibodi dan daerah ini dikenal sebagai daerah pengikatan antigen. Antibodi lebih suka mengikat wilayah kecil antigen yang dikenal sebagai epitop. Epitop karenanya juga disebut sebagai penentu antigenik.
- 4) Struktur acak pada molekul antigenik yang diidentifikasi oleh antibodi sebagai situs pengikatan antigenik membentuk epitop antigen tersebut.
- 5) Epitop yang berbeda diatur sedemikian rupa pada satu molekul protein sehingga jaraknya dapat mempengaruhi pengikatan molekul antibodi dengan berbagai cara.

Ikatan Kimia antigen, Interaksi antibodi antigen adalah proses pengikatan reversibel yang memerlukan beberapa interaksi non kovalen seperti ikatan hidrogen, gaya elektrostatik, dan interaksi hidrofobik. Afinitas dan Aviditas antara antibodi antigen juga memainkan peran utama dalam interaksi mereka. Potensi reaksi antara determinan antigenik spesifik dan situs penggabungan tunggal pada antibodi menentukan afinitasnya. Potensi keseluruhan pengikatan antigen dengan banyak determinan antigenik ke antibodi multivalennya menentukan aviditasnya. Biasanya situs pengikatan antigen-antibodi pada antibodi kurang lebih datar dan luas sehingga mereka dapat menempelkan kompleks atau struktur besar.

Pengenalan antigen, spesifisitas: antibodi sangat spesifik untuk suatu antigen dan bahkan dapat memahami perbedaan kecil antara antigen yang hampir serupa.

Namun mungkin terjadi bahwa antibodi dapat mengikat antigen yang berbeda tetapi secara struktural serupa dan fenomena ini disebut sebagai reaksi silang.

Keanekaragaman: Keanekaragaman menentukan kemampuan antibodi untuk mengikat secara khusus sejumlah besar antigen yang berbeda. Kumpulan antibodi dengan kekhususan yang berbeda menggambarkan repertoar antibodi.

Pematangan afinitas: Efisiensi ikatan antibodi dengan antigen diukur dalam hal afinitas dan aviditas. Beberapa modifikasi diperlukan dalam struktur wilayah V antibodi selama respon imun humoral tergantung sel T terhadap antigen sehingga antibodi yang memiliki afinitas tinggi dapat dihasilkan. Sel B yang bertanggung jawab untuk menghasilkan antibodi afinitas tinggi secara istimewa mengikat antigen karena seleksi dan menjadi sel yang menonjol dengan setiap reaksi antibodi antigen. Mekanisme ini disebut sebagai maturasi afinitas, dan ini mengarah pada peningkatan afinitas pengikatan antigen dan antibodi saat respons yang dimediasi antibodi berkembang lebih lanjut.

Fungsi efektor dari reaksi antibodi antigen

- 1) Karena dua atau lebih porsi Fc diperlukan untuk merangsang fungsi efektor, maka fungsi efektor hanya dilakukan oleh molekul dengan antigen terikat dan tidak dengan Ig bebas.
- 2) Wilayah Fc dari molekul antibodi memainkan peran penting dalam stimulasi efektor, sehingga berbagai isotype antibodi di wilayah Fc dapat dengan mudah dibedakan berdasarkan interaksi yang dibawanya.
- 3) Distribusi molekul antibodi melalui jaringan yang berbeda ditentukan semata-mata oleh daerah konstan dalam rantai berat molekul antibodi. Distribusi terarah ini melalui wilayah rantai berat yang konstan adalah alasan di balik kehadiran IgA dalam sekresi mukosa atau perekrutan antibodi lain ke jaringan tertentu.
- 4) Dalam respon imun yang dimediasi antibodi, variasi isotype antibodi menentukan cara untuk menghilangkan antigen dari tubuh. Selain itu, isotype switching atau class switching juga berperan di dalamnya. misalnya

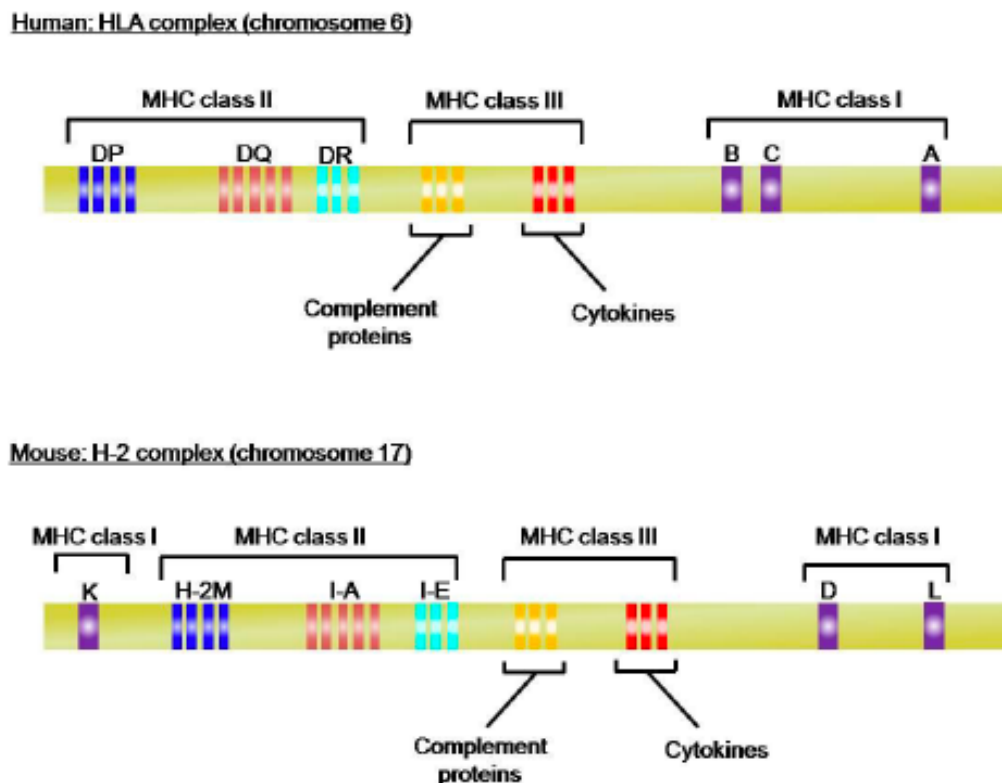
respons antibodi terhadap bakteri dan virus dilakukan oleh antibodi IgG tetapi beralih ke isotipe IgG juga dapat memperpanjang respons humoral karena memiliki waktu paruh paling lama di antara semua antibodi.

*Isotipe: Adanya variasi di daerah konstan rantai berat dan ringan imunoglobulin disebut isotipe. Lima isotipe rantai berat dan dua isotipe rantai ringan terdapat pada manusia.

2. Gen kompleks histokompatibilitas utama (MHC)

Major histocompatibility complex (MHC) gene. Lokus MHC berisi dua jenis gen MHC, kelas I dan kelas II. Gen MHC diekspresikan secara kodominan pada individu yang berarti alel gen diwarisi dari kedua orang tuanya. Molekul MHC kelas I menampilkan peptida ke limfosit CD8⁺ untuk mengaktifkan respons imun yang dimediasi sel, dan molekul MHC kelas II menampilkan peptida ke limfosit CD4⁺ untuk mengaktifkan respons imun yang dimediasi humoral. Keragaman sistem imun membuat gen MHC kelas I dan II menjadi gen paling polimorfik yang ada dalam genom manusia. Pada manusia, gen yang bertanggung jawab untuk pengkodean molekul MHC terletak di kromosom 6 (kromosom 17 pada tikus). Kelas I MHC manusia dikodekan oleh tiga kelas gen yaitu, HLA-A, HLA-B, dan HLA-C. Demikian pula MHC kelas II dikodekan oleh gen HLA-DP, HLA-DQ, dan HLA-DR. Pada mencit nomenklatur untuk MHC diubah menjadi H-2K, H-2D, dan H-2L untuk kelas I dan I-A dan I-E untuk kelas II (hanya 2 gen pada mencit). Himpunan alel MHC yang ada pada setiap kromosom disebut haplotipe MHC.

Tabel 24 Peta lokus gen MHC manusia dan tikus



Ekspresi MHC, Molekul MHC kelas I diekspresikan pada semua sel berinti, sedangkan kelas II hanya diekspresikan dalam sel dendritik, sel B, makrofag dan beberapa sel lainnya. Sel CD8⁺ terbatas kelas I membunuh sel yang terinfeksi virus, sel yang mengandung antigen intraseluler dan antigen tumor. Sel CD4⁺ terbatas kelas II membunuh antigen ekstraseluler yang disajikan oleh sebagian besar sel dendritik. Ekspresi molekul MHC dirangsang oleh sitokin seperti interferon (tipe-I dan II). Interferon- γ yang disekresikan oleh sel pembunuh alami selama respon imun bawaan awal adalah sitokin utama yang bertanggung jawab untuk mengaktifkan ekspresi molekul MHC kelas II dalam sel dendritik dan makrofag. Laju transkripsi gen MHC merupakan penentu utama ekspresi molekul MHC. Setiap mutasi pada faktor transkripsi menyebabkan banyak penyakit defisiensi imun seperti sindrom limfosit.

1. Molekul MHC terdiri dari alur pengikatan peptida, domain seperti imunoglobulin, domain transmembran, dan domain sitoplasma. Molekul MHC kelas I terdiri dari

satu rantai yang dikodekan MHC dan satu rantai yang tidak dikodekan MHC. Molekul MHC kelas II terdiri dari dua rantai yang dikodekan MHC.

2. Alur pengikat peptida terletak di sebelah residu asam amino polimorfik. Karena variabilitas di wilayah tersebut, molekul MHC yang berbeda mengikat dan menampilkan peptida yang berbeda dan dikenali oleh sel T yang berbeda.
3. Domain seperti imunoglobulin mengandung tempat pengikatan untuk sel CD4 dan CD8.

Tabel 25 Fitur molekul MHC kelas I dan II:

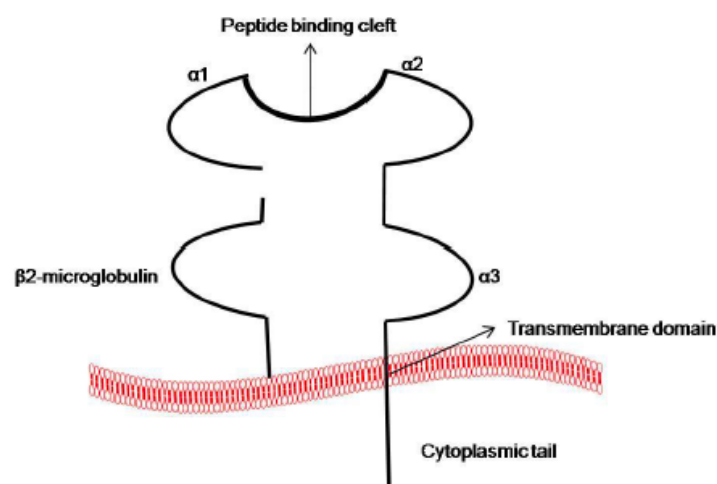
Characters	MHC class I	MHC class II
Rantai polipeptida	$\alpha 1, \alpha 2, \alpha 3$ and $\beta 2$ mikroglobulin	$\alpha 1, \alpha 2, \beta 1$ and $\beta 2$
Ukuran peptida	8-11 panjang asam amino	10-30 atau lebih panjang asam amino
Situs pengikatan peptida	Antara $\alpha 1$ and $\alpha 2$	Antara $\alpha 1$ and $\beta 1$
Situs pengikatan untuk koreseptor sel T	Daerah $\alpha 3$ (CD8+ pengikatan)	Daerah $\beta 2$ (CD4+pengikatan)

Kompleks histokompatibilitas utama, Ada beberapa ciri khas interaksi peptida-MHC yaitu:

4. Molekul MHC kelas I dan II memiliki celah pengikatan peptida tunggal yang mengakomodasi satu peptida pada satu waktu tetapi dapat mengikat peptida yang berbeda.
5. Peptida yang diproses yang mengikat MHC memiliki kompatibilitas struktural yang mendorong interaksi mereka.
6. MHC memperoleh peptida melalui celahnya selama pemrosesan antigen di dalam sel.
7. Hanya populasi kecil peptida yang dimuat di atas molekul MHC yang mampu memunculkan respons imun.
8. Molekul V. MHC menyajikan peptida self dan non-self ke sel T. Hebatnya adalah limfosit T yang memutuskan ke mana tubuh harus menghasilkan respons imun.

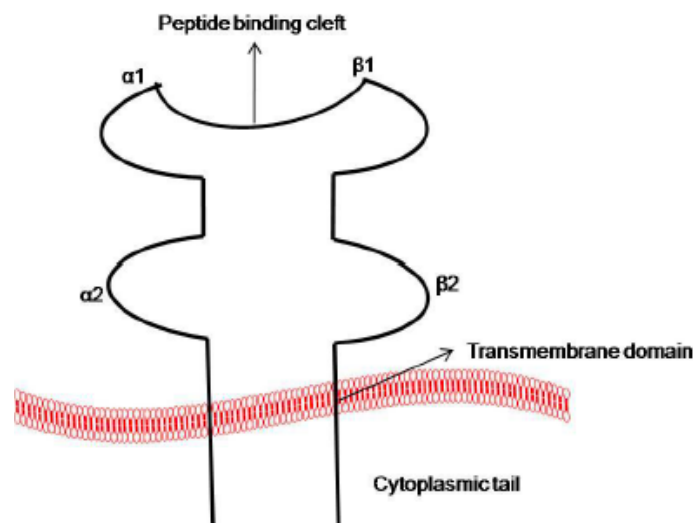
Sebagian besar MHC yang ada di dalam tubuh dibentuk dengan peptida self, dan sel T yang diaktifkan untuk menonaktifkan peptida self oleh sistem pengawasan imun inang. Oleh karena itu, sel T biasanya tidak merespon antigen sendiri.

MHC kelas I, Molekul MHC kelas I terdiri dari dua rantai polipeptida, α dan β 2-mikroglobulin. Rantai " α " berukuran sekitar 44 kD dan rantai " β 2-mikroglobulin" berukuran sekitar 12kD. Setiap rantai dibagi menjadi tiga bagian untuk mengakomodasi domain ekstraseluler α 1, α 2, dan α 3, domain transmembran dan ekor sitoplasma. Panjang α 1 dan α 2 adalah sekitar 90 asam amino dan hanya mengikat 8-11 panjang peptida asam amino (celah pengikat peptida). Ujung celah pengikatan peptida kelas I MHC ditutup dan peptida yang lebih besar tidak dapat ditampung di ruang yang ditentukan. Panjang peptida sangat konformasi dan protein globular perlu diproses menjadi 8-11 panjang asam amino untuk dimuat di atas celah MHC kelas I. α 1 dan α 2 mengandung residu polimorfik yang bertanggung jawab atas variasi di antara alel MHC I dan pengenalannya oleh sel T spesifik. Segmen α 3 dari rantai berisi situs pengikatan untuk sel CD8⁺. Segmen α 3 meluas ke 25 residu asam amino menuju terminal karboksil yang menutupi bilayer lipid dan lebih 30 asam amino sebagai ekor sitoplasma. β 2-mikroglobulin berinteraksi secara non-kovalen dengan rantai α 3. Pengikatan peptida di celah antara α 1 dan α 2 memperkuat interaksi antara α dan β 2 rantai mikroglobulin. Molekul MHC kelas I yang terbentuk sempurna adalah heterotrimer yang terdiri dari rantai α 1, α 2, α 3 dan β 2-mikroglobulin.



Gambar 159 Representasi skema dari molekul kelas I MHC

MHC kelas II, Molekul MHC kelas II juga terdiri dari dua rantai polipeptida, Rantai "α" berukuran sekitar 33 kD dan rantai "β" berukuran sekitar 31kD. Rantai α1 dan β1 berinteraksi dengan peptida yang lebih panjang dari ikatan peptida ke molekul kelas I. Celah pengikatan peptida pada α1 dan β1 terbuka sehingga dapat memuat peptida dengan panjang 30 atau lebih asam amino. Segmen β2 berisi situs pengikatan untuk sel CD4⁺. Molekul MHC kelas II yang terbentuk sepenuhnya adalah heterotrimer yang terdiri dari rantai mikroglobulin α1, α2, β1 dan β2.



Gambar 160 Representasi skema dari molekul MHC kelas II

3. Antigen dan Limfosit T

Pengenalan antigen oleh limfosit T, Untuk menghasilkan respon imun yang didapat, molekul antigen harus dipecah di dalam sel dan disajikan ke sel imun dengan bantuan molekul *major histocompatibility complex* (MHC). Ini dikodekan oleh gen kompleks MHC dan bervariasi antara spesies yang berbeda. Antigen dapat memicu respon imun hanya setelah terikat pada molekul MHC. Semua hewan vertebrata mengandung lokus penyandi MHC dalam kromosom mereka.

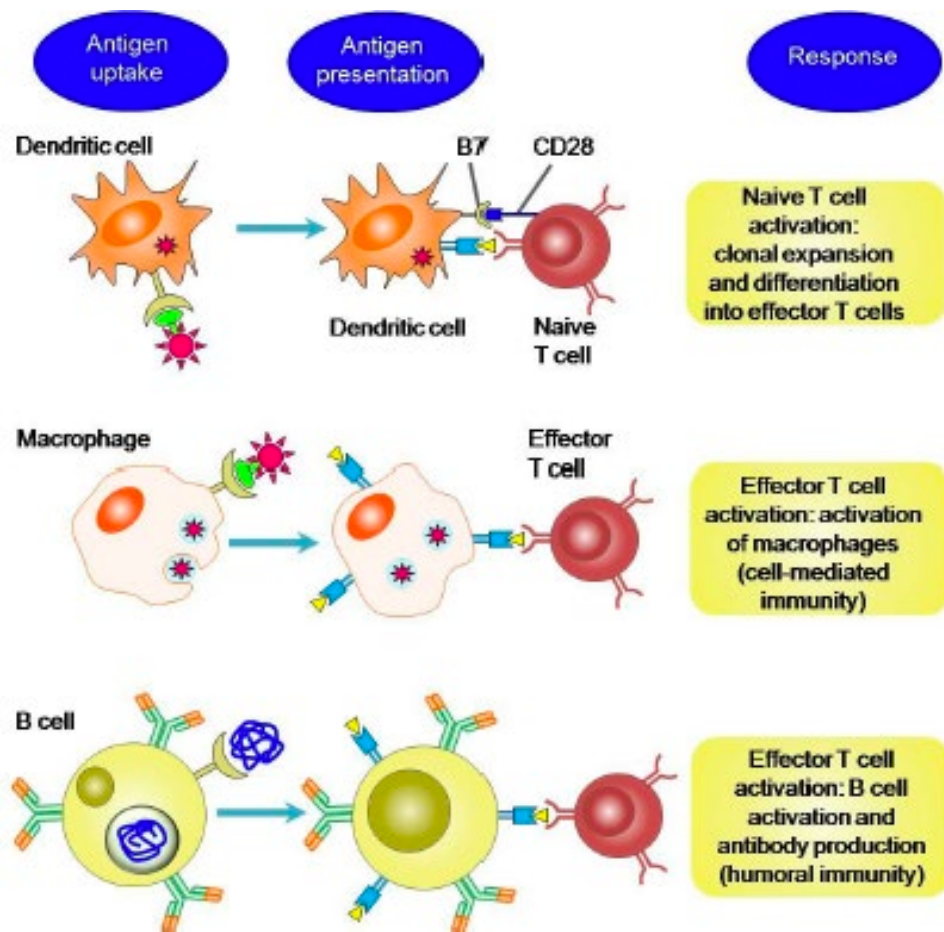
Sebagian besar limfosit T dapat mengenali fragmen peptida kecil sedangkan sel B dapat mengenali peptida, karbohidrat, lipid, asam nukleat, dan bahan kimia lainnya. Karena spesifisitas antigen yang berbeda dari limfosit T dan B, respons imun yang diperantarai sel biasanya diaktifkan oleh antigen protein sedangkan respons imun humoral diaktifkan oleh antigen non-protein.

Sel T hanya mengenali antigen protein yang ditampilkan oleh molekul MHC karena MHC tidak dapat mengikat molekul lain. Sel T individu hanya dapat mengenali satu molekul MHC spesifik yang dimuat dengan peptida, properti ini disebut sebagai MHC terbatas. Sel T hanya dapat mengenali peptida linier dan bukan epitop konformasi antigen karena konformasi protein hilang selama pemrosesan dan pemuatan ke celah pengikatan peptida molekul MHC.

Sel T hanya dapat mengenali antigen yang berhubungan dengan sel penyaji antigen dan tidak dengan protein terlarut.

Banyak jenis sel berfungsi sebagai sel penyaji antigen untuk mengaktifkan sel T naif dan efektor. Sel dendritik adalah sel penyaji antigen yang paling umum dan efektif dalam tubuh. Makrofag dan sel B juga bertindak sebagai sel penyaji antigen, tetapi hanya untuk sel T yang sebelumnya diaktifkan. Semua sel yang disebutkan di atas mengekspresikan molekul MHC tipe II di atas permukaannya dan karenanya juga disebut sel penyaji antigen profesional. Sel penyaji antigen menampilkan kompleks peptida MHC ke sel T dan juga memberikan rangsangan tambahan ke sel T agar berfungsi dengan baik. Rangsangan ini kadang-kadang disebut sebagai molekul kostimulatori karena mereka berfungsi bersama dengan sel penyaji antigen.

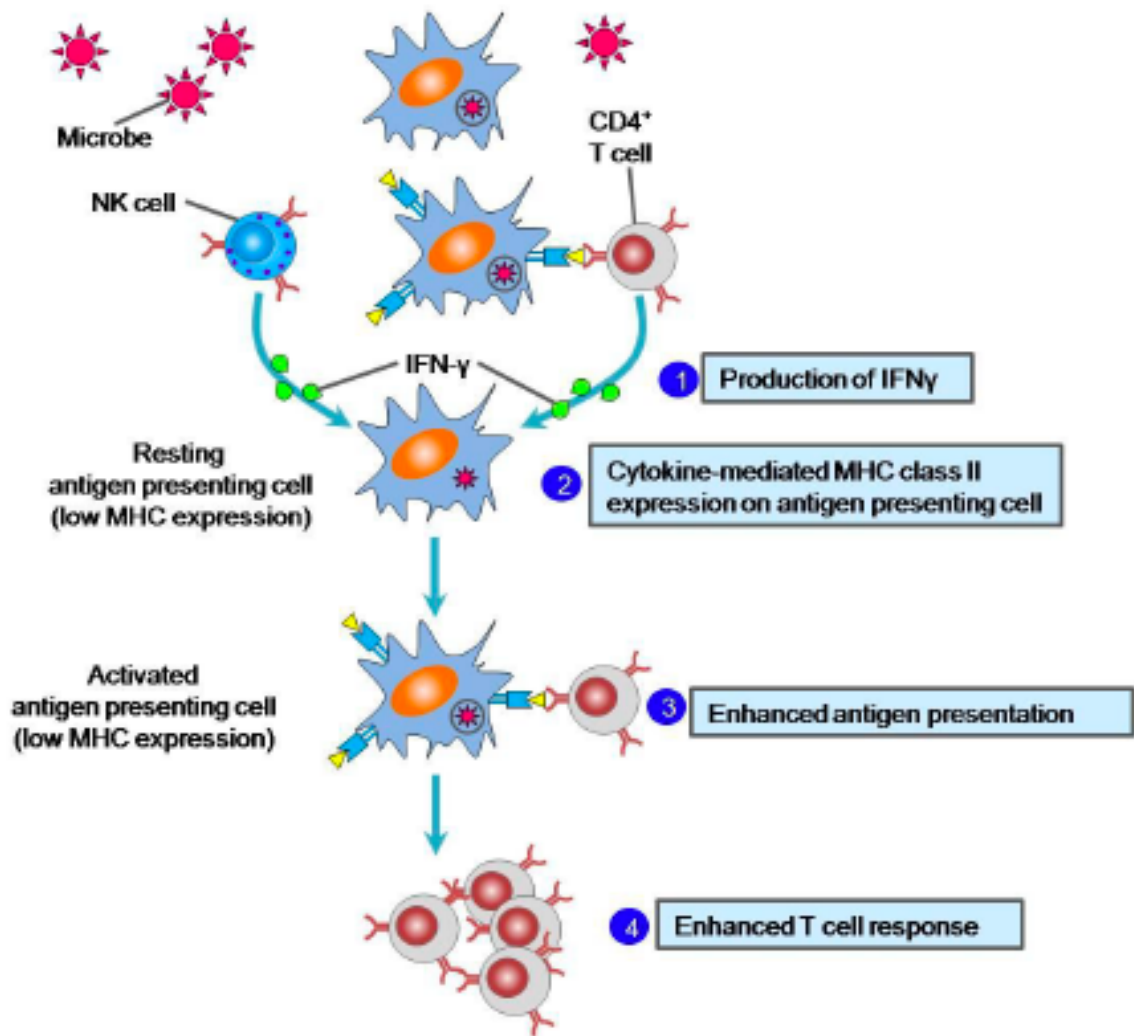
Fungsi penyaji antigen dapat ditingkatkan dengan produk mikroba. Induksi respon sel T terhadap antigen biasanya ditingkatkan dengan pemberian produk protein murni yang disebut sebagai ajuvan. Ajuvan berasal dari mikroba seperti membunuh mikobakterium yang meniru mikroba dan merangsang produksi respon imun.



Gambar 161 Sel penyaji antigen yang berbeda.

Tabel 26 Sifat sel penyaji antigen

Sel	MHC kelas II dan kostimulasi	Fungsi
Sel dendritik	Ekspresi meningkat dengan pematangan dan interferon- γ . Interaksi CD40 dan CD40L bertindak sebagai costimulator.	Memproses antigen protein untuk respon sel T.
Makrofaga	Ekspresi meningkat dengan interferon- γ . Interaksi CD40 dan CD40L, LPS, dan interferon- γ berperan sebagai kostimulator.	Respon imun yang diperantarai sel
limfosit B	Ekspresi meningkat dengan interleukin-4. Interaksi CD40 dan CD40L bertindak sebagai costimulator.	Respon imun humoral



Gambar 162 Peningkatan ekspresi kelas II oleh interferon- γ

4. Sel dendritik

Seperti yang telah dibahas sebelumnya, sel dendritik adalah sel utama sistem kekebalan yang bertindak sebagai sel penyaji antigen. Sel dendritik terdapat pada organ limfoid dan sel epitel saluran cerna dan saluran pernafasan. Semua sel dendritik berasal dari sel fagosit mononuklear prekursor sumsum tulang. Sel dendritik menangkap antigen dari kulit dan lapisan epitel jaringan dan memasuki pembuluh limfatik. Getah bening bertindak sebagai reservoir sel terkait serta antigen bebas. Terutama ada dua bagian dari sel dendritik.

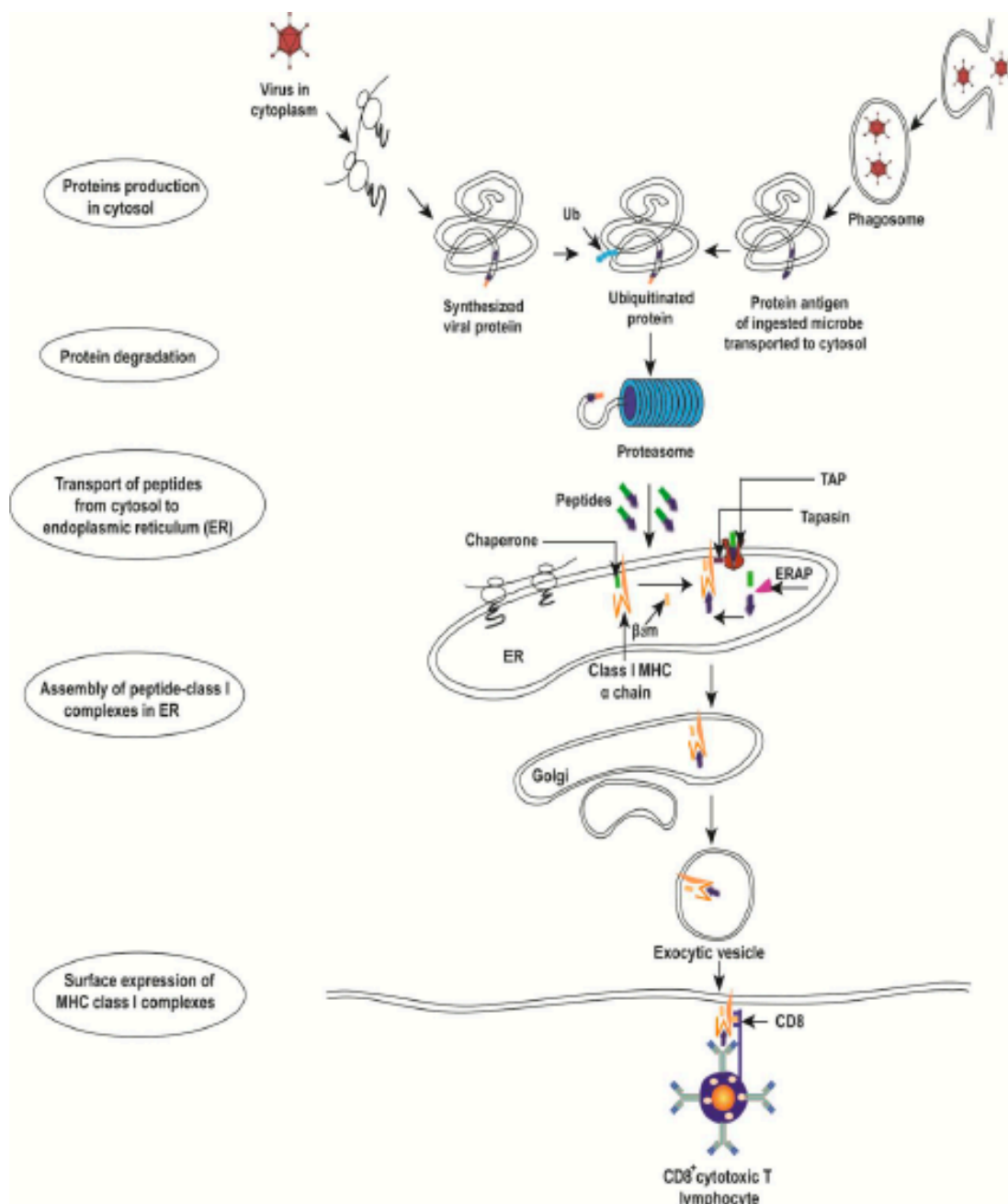
a. Sel dendritik konvensional

Ini juga disebut sel dendritik myeloid. Mereka adalah sel dendritik yang paling melimpah dalam tubuh dan bertanggung jawab untuk menghasilkan respon imun sel T yang kuat. Dalam jaringan, mereka disebut sel Langerhans karena proses sitoplasmiknya yang panjang yang menempati area permukaan yang besar di permukaan epitel yang membuatnya sangat mudah diakses oleh antigen. Molekul penanda permukaan untuk sel dendritik konvensional adalah CD11c dan CD11b. Mereka mengekspresikan tingkat tinggi seperti reseptor Toll 4, 5, dan 8. Selain itu mereka mengeluarkan faktor nekrosis tumor tingkat tinggi dan interleukin-6.

b. Sel dendritik plasmatisoid

Dinamakan demikian karena morfologinya yang mirip dengan sel plasma. Molekul penanda permukaan untuk sel dendritik plasmacytoid adalah B220. Mereka mengekspresikan reseptor seperti Toll 7 dan 9. Mereka bertanggung jawab atas sekresi interferon tipe I (α dan β) dalam jumlah besar setelah infeksi virus.

Pemrosesan antigen melalui jalur MHC kelas I, Antigen yang biasa diproses oleh MHC kelas I termasuk bakteri intraseluler, virus, dan antigen tumor. Peptida MHC kelas I diproses di sitosol oleh degradasi proteolitik protein. Kadang-kadang protein difagosit dan diimpor ke sitoplasma untuk memuat molekul MHC kelas I.

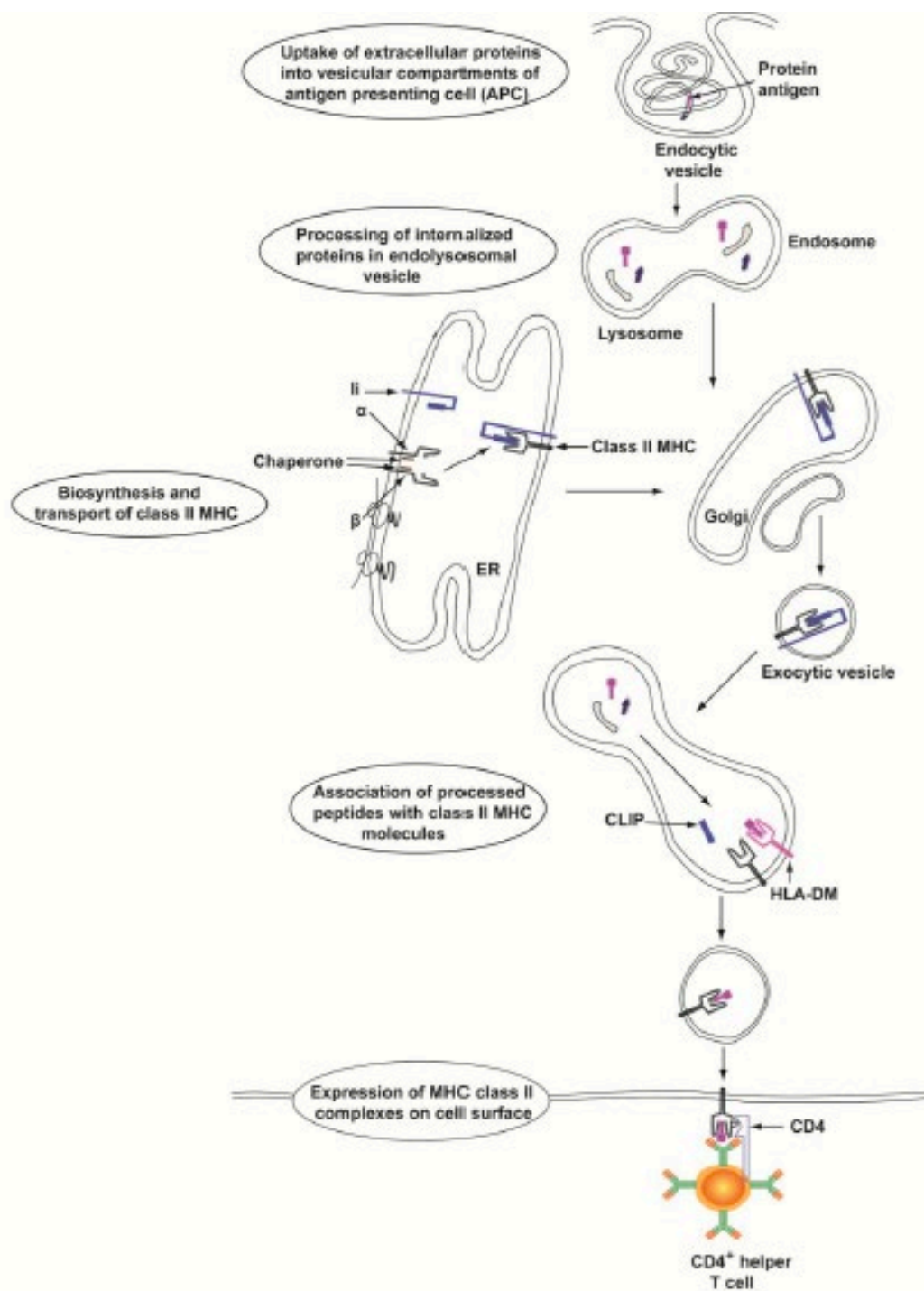


Gambar 163 Jalur pemrosesan antigen MHC kelas I

Protein terdegradasi oleh proteasom dalam sitoplasma yang merupakan struktur kompleks yang bertanggung jawab untuk degradasi protein yang tidak diinginkan atau tidak terlipat dengan benar. Setelah degradasi, peptida dipindahkan ke retikulum endoplasma dengan bantuan protein yang diangkut yang disebut transporter yang terkait dengan pemrosesan antigen (TAP). TAP dikaitkan dengan protein lain yang disebut Tapasin, yang memperoleh afinitas spesifik dengan molekul MHC baru dan kosong. Tapasin membawa kompleks antigen-TAP menuju molekul

MHC baru. Pelipatan dan perakitan molekul MHC kelas I yang tepat di dalam retikulum endoplasma dimodulasi oleh pendamping calnexin dan calreticulin. Peptida dari kompleks TAP-antigen-tapasin diproses dan dimuat di atas molekul MHC dengan bantuan peptidase terkait retikulum endoplasma (ERAP). Peptida yang diangkut ke retikulum endoplasma umumnya disajikan melalui jalur MHC kelas I. Peptida yang terikat pada molekul MHC kelas I kemudian diangkut ke aparatus Golgi dan kemudian ke permukaan sel dengan bantuan vesikel eksositik. Peptida yang dimuat MHC kelas I dikenali oleh limfosit T CD8⁺ untuk menginduksi respon imun yang diperantarai sel.

Pemrosesan antigen melalui jalur MHC kelas II, Mayoritas peptida yang terkait dengan MHC kelas II dihasilkan dari antigen ekstraseluler (protein) yang ditangkap di dalam endosom sel penyaji antigen. Endosom yang mengandung antigen menyatu dengan lisosom untuk membentuk endolisosom, pH asam endolisosom membantu dalam degradasi protein menjadi peptida yang lebih kecil. Molekul MHC kelas II disintesis dalam retikulum endoplasma dan diangkut ke endosom dengan bantuan rantai invarian (Ii), yang mengikat celah pengikatan peptida dari molekul MHC kelas II yang baru disintesis. Molekul kelas II dengan rantai invarian terikat (CLIP) diangkut ke endosom dan didegradasi oleh proteolisis untuk melepaskan rantai invarian. Bagian CLIP yang tersisa dihilangkan oleh HLA-DM yang ada di endosom untuk menciptakan ruang bagi peptida. Setelah CLIP dihilangkan, peptida dimuat di atas molekul MHC kelas II. Molekul MHC kelas II yang terikat pada peptida dikirim ke permukaan untuk dikenali oleh limfosit T CD4⁺ (respon imun humoral).



Gambar 164 Jalur pemrosesan antigen MHC kelas II

Tabel 27 perbandingan pemrosesan antigenik MHC kelas I dan II

Fitur	MHC Klas I	MHC Klas II
Komposisi celah pengikat peptida	$\alpha 1$, $\alpha 2$, dan peptida	$\alpha 1$, $\beta 1$, dan peptida
Sel penyaji antigen	Semua sel berinti	Sel dendritik, fagosit, limfosit B, makrofag dll
Jenis sel T	Sel T CD8+	Sel T CD4+
Sumber antigen protein	Antigen protein sitosolik	Antigen protein endosomal dan lisosomal
Situs pemuatan peptida	Retikulum endoplasma	Vesikel khusus

Peptida silang, Kadang-kadang sel dendritik menangkap dan mencerna virus atau antigen tumor dan mempresentasikan antigen ke limfosit T CD8+. Seperti disebutkan di atas, antigen yang ditangkap ke dalam vesikel memulai jalur MHC kelas II. Penyimpangan beberapa sel dendritik untuk menyajikan peptida terdegradasi endositik ke molekul MHC kelas I dan mengaktifkan respons imun yang dimediasi CD8+ disebut presentasi silang.

Reseptor antigen dan molekul aksesori limfosit T, Reseptor yang memulai jalur pensinyalan umumnya terkait dengan membran plasma. Domain ekstraseluler reseptor mengenali ligan yang ada di permukaan sel dan interaksi ini dapat menyebabkan perubahan konformasi pada reseptor. Perubahan konformasi dikaitkan dengan perekrutan gugus fosfat di terminal karboksinya pada residu tirosin, serin, atau treonin. Enzim yang menambahkan gugus fosfat pada residu asam amino disebut protein kinase. Tirosin merupakan residu asam amino utama yang berperan dalam peristiwa ini (fosforilasi) sehingga enzim tersebut disebut protein tirosin kinase. Atau enzim yang bertanggung jawab untuk menghilangkan gugus fosfat dari asam amino disebut fosfatase. Secara umum protein kinase dapat memulai sementara fosfatase dapat menghambat jalur pensinyalan. Beberapa jenis modifikasi protein juga dapat memodulasi pengikatan antigen ke reseptor seperti fosforilasi (penambahan gugus fosfat), asetilasi (penambahan gugus asetil), metilasi

(penambahan gugus metil), dan ubiquitination (penambahan ubiquitin). Ubiquitinasi adalah peristiwa yang terjadi selama degradasi protein melalui proteasome.

Jenis reseptor seluler

Ada beberapa jenis reseptor sel berdasarkan mekanisme pensinyalan dan jalur biokimianya.

a. Reseptor tirosin kinase

Mereka terkait dengan membran sel dan terlibat dalam fosforilasi residu tirosin yang terletak di ekor sitoplasma mereka. Jalur dimulai setelah mengikat dengan ligan yang sesuai di atas reseptor. misalnya Reseptor insulin, reseptor faktor pertumbuhan epidermal, reseptor faktor pertumbuhan turunan trombosit, dan reseptor yang terlibat dalam proses hematopoiesis.

b. Tirosin kinase non-reseptor

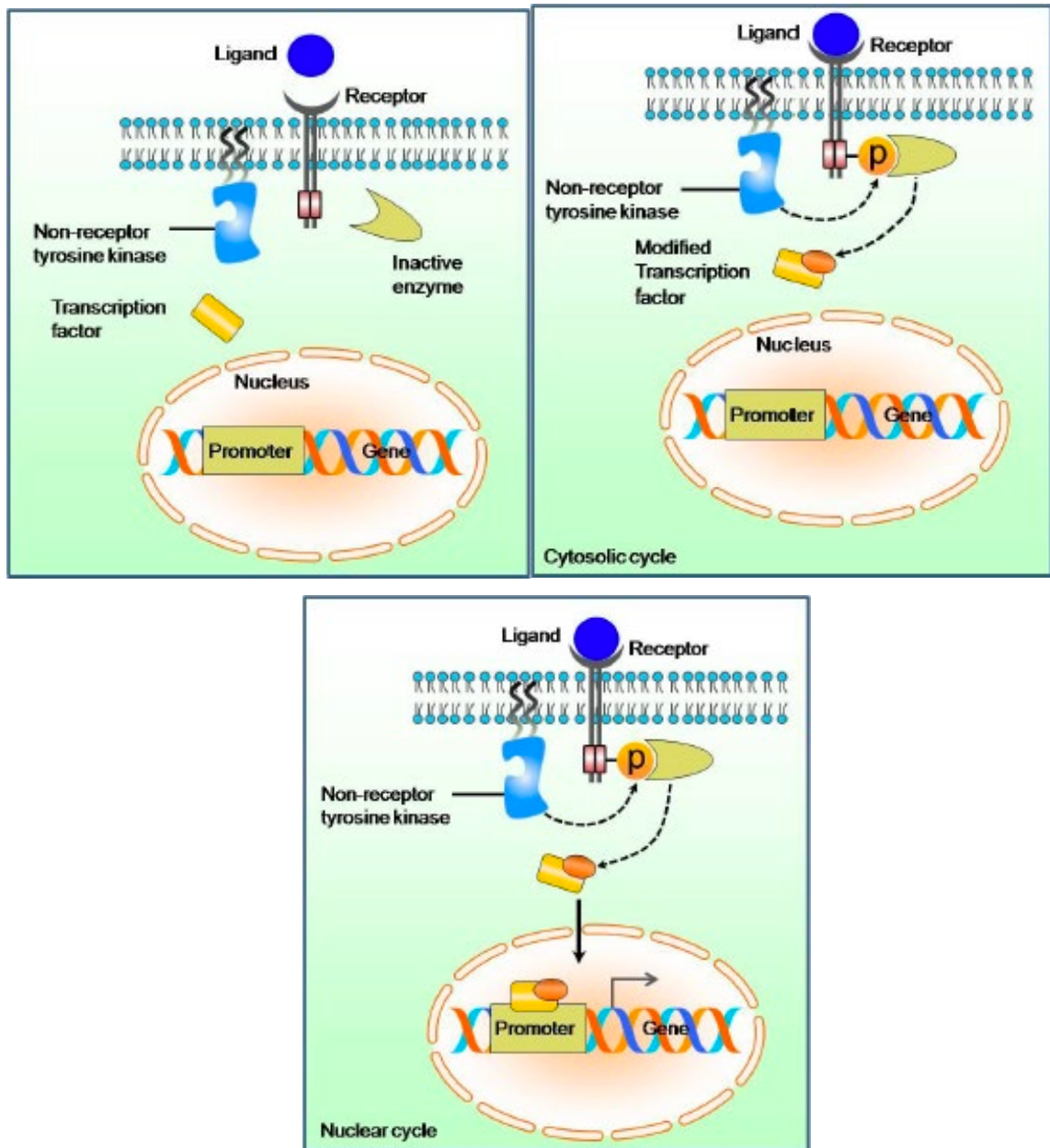
Mereka terkait dengan membran sel dan terlibat dalam fosforilasi protein oleh tirosin kinase non-reseptor setelah mengikat dengan ligan. Reseptor imun, reseptor sitokin, dan integrin diketahui mengikuti jalur pensinyalan tirosin kinase non-reseptor.

c. Tujuh reseptor transmembran

Ini adalah reseptor polipeptida yang melintasi tujuh kali dalam membran plasma dan karenanya juga disebut sebagai reseptor serpentin. Reseptor umumnya berikatan dengan GTP sehingga disebut juga sebagai G protein-coupled receptor (GPCR). Pengikatan ligan ke GPCR mengaktifkan protein G heterotrimerik dan memulai jalur pensinyalan hilir. Sitokin inflamasi dan cAMP diaktifkan setelah berikatan dengan GPCR.

d. Reseptor nuklir

Modulasi transkripsi biasanya dilakukan pada tingkat membran inti. Reseptor yang menggunakan lipid sebagai ligan dapat meningkatkan atau menurunkan transkripsi gen. Reseptor vitamin D dan reseptor glukokortikoid adalah contoh reseptor nuklir.



Gambar 165 Jalur pensinyalan untuk aktivasi sitosol dan nucleus

e. Reseptor lain-lain

Reseptor takik terlibat dalam perkembangan embrio dan pematangan jaringan. Pengikatan ligan spesifik dengan reseptor takik menyebabkan pembelahan proteolitik dari ekor sitoplasma reseptor yang dapat bertindak sebagai faktor transkripsi untuk jalur perkembangan yang berbeda. Sekelompok ligan yang disebut "Wnt" dapat memodulasi tingkat catenin yang berkontribusi pada perkembangan sel B dan T.

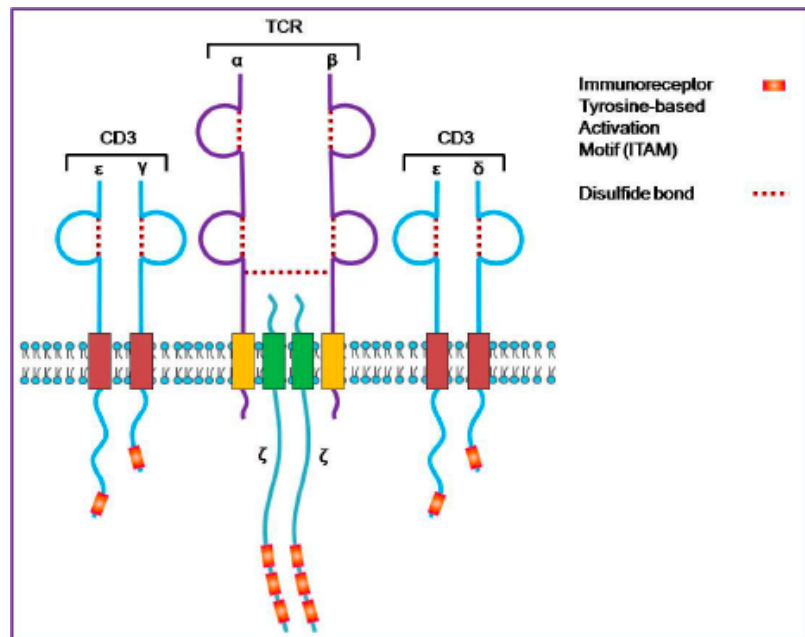
Reseptor imun terdiri dari superfamili imunoglobulin yang terlibat dalam pengenalan ligan dan mengandung motif tirosin di ekor sitoplasmanya. Ekor sitoplasma mengandung imunoreseptor tirosin-based activating motif (ITAM) yang terlibat dalam proses aktivasi. Fosforilasi ITAM merekrut Syk/ZAP-70 tirosin kinase yang mengaktifkan sel-sel kekebalan. Berlawanan dengan ITAM, beberapa reseptor imun mengandung motif penghambatan berbasis tirosin imunoreseptor (ITIM) yang mengarah pada penghambatan pensinyalan imun. Keluarga reseptor imun termasuk reseptor sel B dan T, reseptor IgE pada sel mast, dan reseptor Fc yang mengaktifkan dan menghambat.

Karakteristik pensinyalan reseptor antigen, Peristiwa pensinyalan dalam sel T dan B mengalami jalur hilir yang serupa. Pengikatan ligan ke reseptor mengaktifkan keluarga Src kinase yang memfosforilasi motif ITAM di ekor sitoplasma reseptor. Tirosin terfosforilasi di ITAM merekrut kinase tirosin Syk yang selanjutnya mengaktifkan kaskade pensinyalan hilir.

Kompleks reseptor sel dan pensinyalan sel T, Reseptor sel T (TCR) terdiri dari heterodimer dari dua rantai polipeptida, dan yang secara kovalen dihubungkan satu sama lain oleh ikatan disulfida. TCR yang mengandung dua rantai ini disebut sebagai $\alpha\beta$ sel T. Jenis TCR lain yang disebut $\gamma\delta$ sel T mengandung rantai γ dan δ polipeptida. Setiap rantai polipeptida dalam TCR terdiri dari terminal amino, terminal variabel dan karboksi, daerah konstan (mirip seperti molekul imunoglobulin). Daerah variabel adalah daerah penentu komplementaritas dalam TCR dan bertanggung jawab atas polimorfismenya. Rantai α dan β mengandung 5-12 residu asam amino pada ekor sitoplasmanya untuk mengambil bagian dalam jalur transduksi sinyal. Dua struktur lain yang terkait dengan TCR adalah protein CD3 dan yang secara nonkovalen terkait dengan rantai. TCR bersama dengan protein CD3 dan membentuk kompleks TCR.

Protein CD3 dan ζ konstan di semua sel T terlepas dari spesifitasnya terhadap ligan apa pun. CD3 mengandung rantai ϵ , γ , dan δ polipeptida yang menyerupai anggota superfamili imunoglobulin. CD3 mengandung dua heterodimer yang terdiri dari rantai polipeptida. Rantai polipeptida $\epsilon\gamma$ dan $\epsilon\delta$. ϵ , γ dan δ , dari molekul CD3

terdiri dari 44-81 asam amino dan mengandung satu molekul ITAM untuk memodulasi jalur sinyal hilir. Rantai polipeptida CD3 mengandung residu asam aspartat bermuatan negatif yang berinteraksi dengan residu bermuatan positif yang ada dalam rantai $\alpha\beta$. Rantai polipeptida ζ mengandung ekor sitoplasma panjang yang mengandung tiga molekul ITAM dan biasanya diekspresikan sebagai homodimer dalam kompleks TCR.

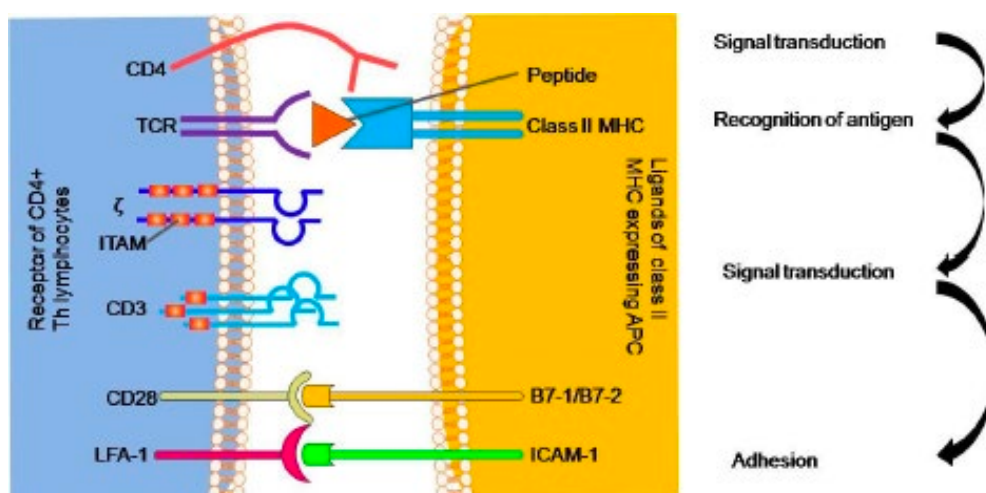


Gambar 166 Kompleks reseptor sel T

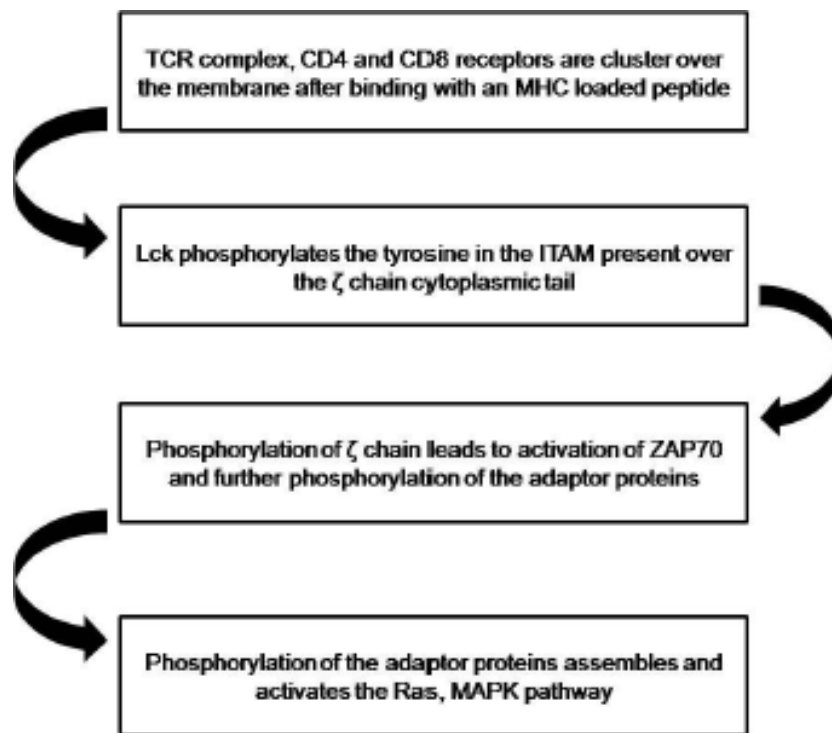
Tabel 28 Perbedaan antara reseptor sel T dan immunoglobulin

Fitur	Reseptor sel T	Imunoglobulin
Rantai polipeptida	Rantai α and β	Rantai berat dan ringan
Molekul terkait	CD3 dan ζ	Ig α dan Ig β
Daerah penentu komplementaritas	Tiga	Tiga
Pergantian isotipe	Tidak	Ya
Mutasi somatik	Tidak	Ya
Bentuk sekretori	Tidak	Ya (IgA)

Sinyal di reseptor sel T, Ligasi TCR dengan molekul MHC yang dimuat peptida menghasilkan pengelompokan CD3, protein dan koreseptor lainnya. CD4 dan CD8 adalah koreseptor sel T yang mengikat molekul MHC dan memfasilitasi jalur pensinyalan TCR. Seperti yang kita pelajari dalam molekul MHC, CD4 mengenali kelas II sementara CD8 mengenali molekul kelas I, untuk mempertahankan keseimbangan ini, sel T dapat mengekspresikan reseptor CD4 atau CD8 tetapi tidak pernah keduanya. Interaksi TCR dengan kompleks MHC-peptida menghasilkan fosforilasi residu ITAM yang ada di atas kompleks TCR. Fosforilasi ITAM mengaktifkan tirosin kinase yang memfosforilasi tirosin yang ada di atas molekul koreseptor lainnya. Ekor sitoplasma CD4 dan CD8 merekrut keluarga Src kinase Lck. Kinase keluarga Src lain yang terkait dengan kompleks TCR adalah Fyn. Lck memfosforilasi tirosin dalam ITAM yang ada pada rantai CD3 dan ζ . ITAM terfosforilasi dalam rantai ζ merekrut tirosin kinase keluarga Syk yang disebut ζ protein terkait 70kD (ZAP70). ZAP70 pada gilirannya memfosforilasi protein adaptor seperti SLP-76 dan LAT. LAT terfosforilasi kemudian merekrut beberapa komponen protein adaptor termasuk PLC γ 1 (enzim kunci yang terlibat dalam aktivasi sel T). Seluruh peristiwa ini mengaktifkan jalur Ras dan mitogen diaktifkan protein kinase (MAPK) yang pada gilirannya mengaktifkan faktor transkripsi dan mengaktifkan respon sel T.



Gambar 167 Reseptor dan ligan terlibat dalam aktivasi sel T



Gambar 168 Representasi skema pensinyalan sel T

A. Vitamin

Vitamin dan mineral mempunyai fungsi utama yang sangat penting dalam reaksi enzim. Enzim melakukan aktivitasnya dengan bantuan molekul lain baik dari molekul organik ataupun molekul anorganik. Gugus yang berasal dari molekul organik seperti vitamin disebut koenzim. Sedangkan gugus yang berasal dari molekul anorganik seperti mineral disebut kofaktor. Koenzim dan kofaktor yang terikat kuat pada enzim disebut gugus prostetik. Vitamin merupakan molekul organik yang di dalam tubuh mempunyai fungsi yang sangat bervariasi

- Fungsi dalam metabolisme yang paling utama adalah sebagai kofaktor
- Di dalam tubuh diperlukan dalam jumlah sedikit (*micronutrient*).
- Biasanya tidak disintesis di dalam tubuh, jika dapat disintesis, jumlah tidak mencukupi kebutuhan tubuh, sehingga harus diperoleh dari makanan.

Tabel 29 Fungsi Metabolik Vitamin

Vitamin	Fungsi Metabolik
Larut dalam air	
B ₁ (tiamin)	Transfer aldehida, dekarboksilasi dalam fermentasi alkohol dan siklus asam sitrat.
B ₂ (riboflavin)	Reaksi reduksi-oksidasi, terutama dalam siklus asam sitrat dan transpor electron.
B ₃ Niasin (asam nikotinik)	Reaksi reduksi-oksidasi, banyak ditemukan diproses metabolik.
B ₅ (Asam pantotenat)	Transfer asil dalam banyak proses metabolisme.
B ₆ (piridoksin)	Reaksi transminasi, terutama asam amino.
B ₇ (Biotin)	Reaksi karboksilasi di karbohidrat dan metabolisme lipid.
B ₉ (Asam folat)	Transfer gugus satu karbon, terutama dalam senyawa yang mengandung nitrogen.
C (asam askorbat)	Hidroksilat kolagen. Transfer asil, oksidasi-reduksi
Larut dalam lemak	
A	Isomerisasi memediasi proses visual.
D	Mengatur metabolisme kalsium dan fosfor, terutama dalam tulang.
E	Antioksidan.
K	Memediasi modifikasi protein yang diperlukan untuk pembekuan darah.

Tabel 30 Beberapa koenzim penting dan vitamin terkait

Vitamin	Koenzim	Reaksi yang Melibatkan Koenzim Ini
Tiamin (vitamin B ₁)	Tiamin pirofosfat	Aktivasi dan transfer aldehida
Riboflavin (vitamin B ₂)	Flavin mononukleotida; flavin adenin dinukleotida	Oksidasi-reduksi
Niasin (Vitamin B ₃)	Nikotinamida adenin dinukleotida; nikotinamida adenin dinukleotida fosfat	Oksidasi-reduksi
Asam pantotenat (Vitamin B ₅)	Koenzim A	Aktivasi dan transfer gugus asil
Piridoksin (Vitamin B ₆)	fosfat piridoksal	Berbagai reaksi yang melibatkan aktivasi asam amino
Biotin (Vitamin B ₇)	Biotin	Aktivasi dan transfer CO ₂
Asam lipoat	Lipoamida	Aktivasi gugus asil; reduksi oksidasi
Asam folat (Vitamin B ₉)	Tetrahidrofolat	Aktivasi dan transfer gugus fungsi karbon tunggal
Vitamin B ₁₂	Adenosilkobalamin; metilkobalamin	Isomerisasi dan transfer gugus metil

Beberapa vitamin berfungsi langsung dalam metabolisme sel. Berdasarkan

hidrofobisitasnya, vitamin dibagi menjadi 2:

Vitamin yang larut dalam lemak: A, D, E, K

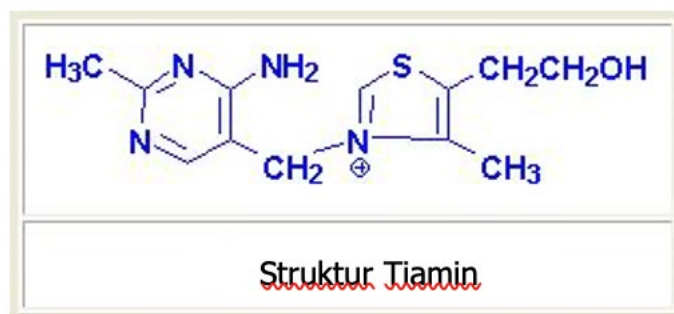
Vitamin yang larut dalam air: B kompleks, C

1. Vitamin B

Vitamin B larut air yang berperan penting dalam metabolisme sel, struktur kimia vitamin-vitamin B berbeda-beda, biasa disebut vitamin B kompleks.

a. Vitamin B1 (Thiamin)

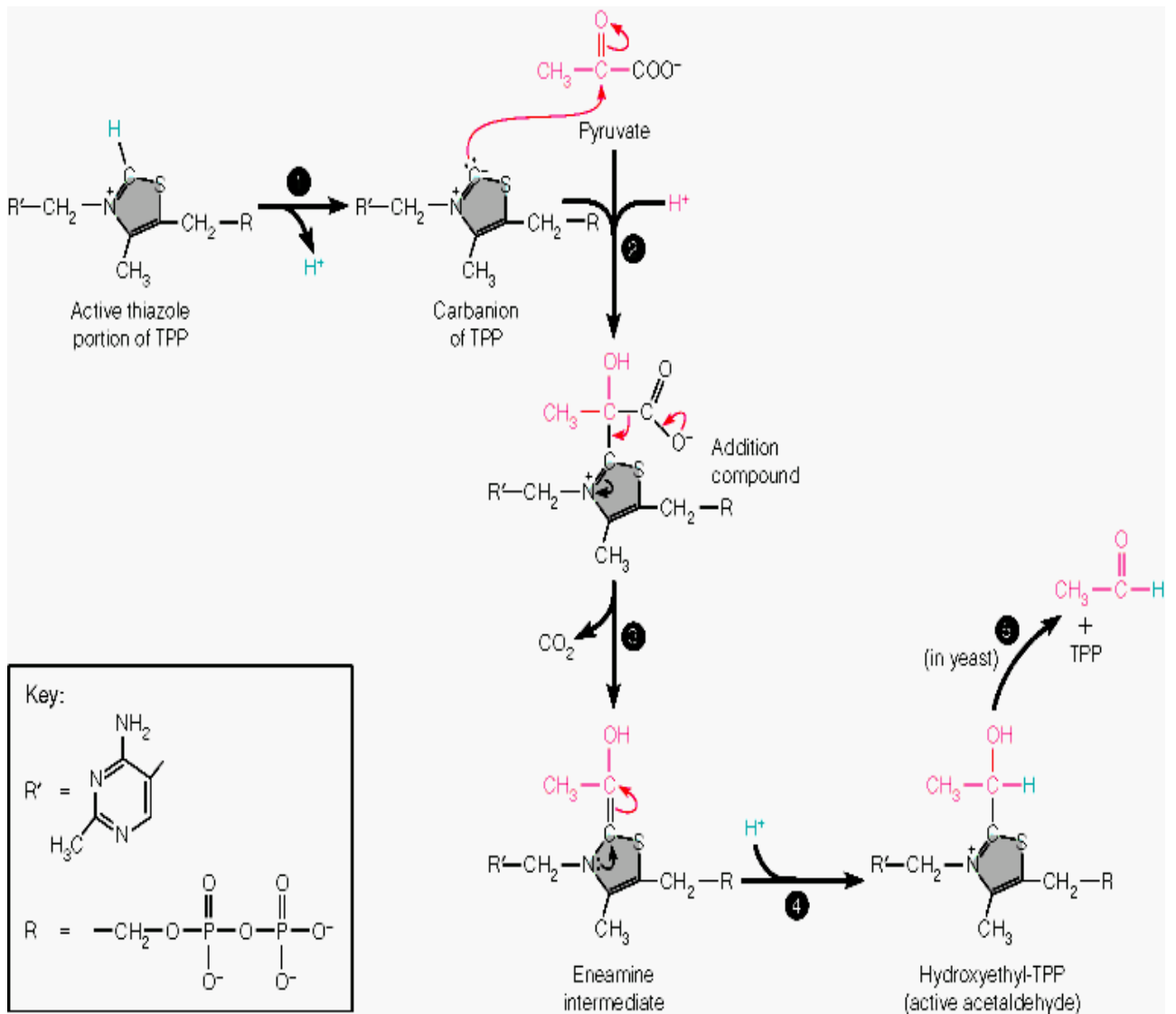
Struktur thiamin merupakan gabungan antara pirimidin dan thiazole yang dihubungkan dengan jembatan metilene.



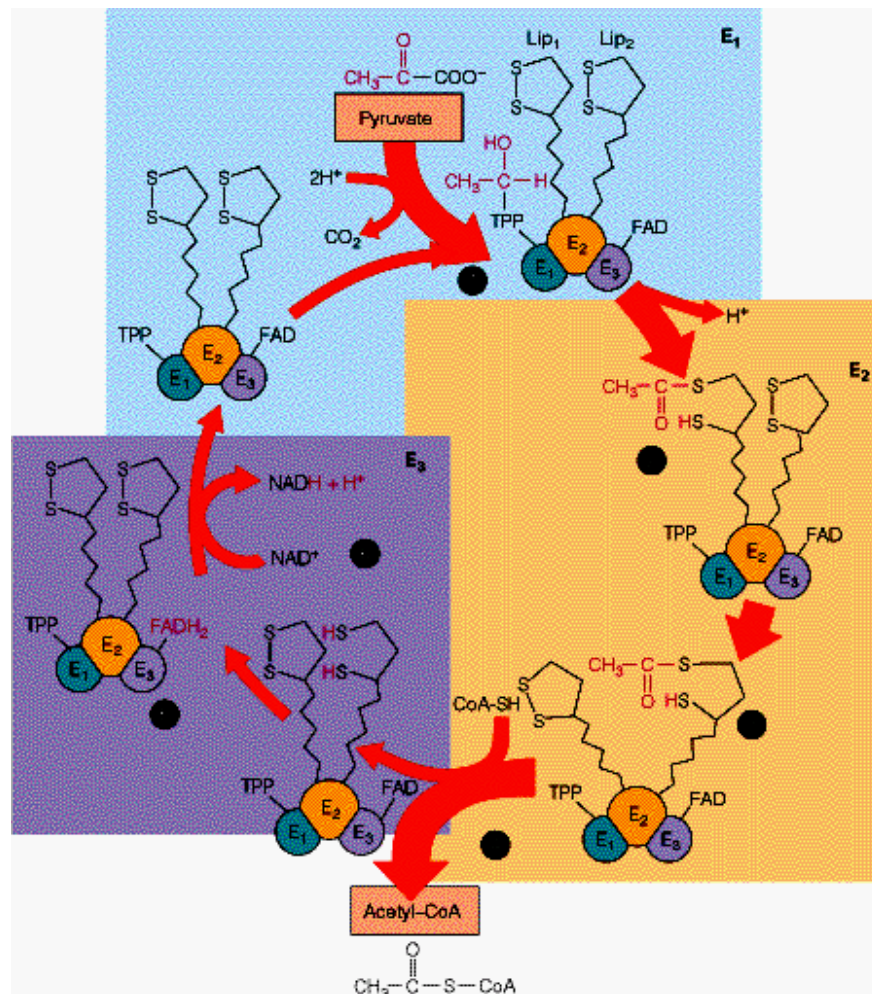
Bentuk fosfat dari tiamin berperan dalam berbagai proses dalam sel, yang paling terkenal adalah tiamin pirofosfat (TPP, thiamine pyrophosphate), koenzim pada katabolisme gula dan asam amino. Struktur thiamin mengandung cincin *pyrimidine* dan cincin *thiazole* yang dihubungkan dengan jembatan metilen. Tidak stabil terhadap panas, tapi stabil selama pembekuan, tidak stabil terhadap UV, iradiasi gamma, berperan pada reaksi Maillard. Di dalam otak dan hati segera diubah menjadi TPP = tiamin pyrofosfat oleh enzim tiamin difosfotransferase, reaksi membutuhkan ATP. Berperan penting sebagai koenzim dekarboksilasi senyawa asam-keto. Beberapa enzim yang menggunakan TPP sbg koenzim: Pyruvate decarboxylase, pyruvate dehydrogenase, transketolase.



Reaksi:



Penting sebagai koenzim pyruvate and α -ketoglutarate dehydrogenase, sehingga jika defisiensi : kapasitas sel dlm menghasilkan energi menjadi sangat berkurang. Juga diperlukan untuk reaksi fermentasi glukosa menjadi etanol, di dalam yeast.



Gambar 169 koenzim vitamin B1

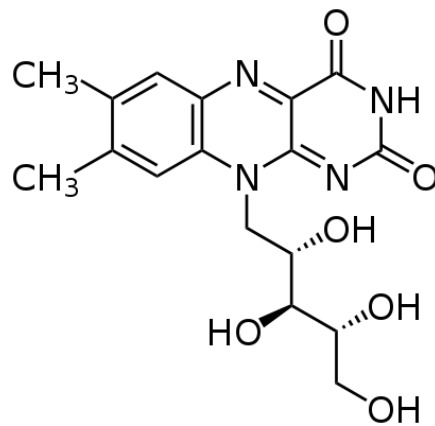
Selain sebagai koenzim vitamin B1 juga memiliki peran:

- Meningkatkan sirkulasi dan pembentukan darah
- Memelihara sistem saraf
- Berperan dalam biosintesis neurotransmitter
- Berperan dalam produksi HCL dalam perut yang penting untuk pencernaan
- Sumber: pada biji-bijian, beras sedikit mengandung thiamin

b. Vitamin B2 (Riboflavin)

Riboflavin mudah diserap tubuh dan berperan terutama sebagai kofaktor pada FAD dan FMN. Berperan pada berbagai proses dalam sel dan metabolisme energi dari karbohidrat, lemak, dan protein. Sumber: susu, keju, sayuran berdaun, hati, kacang-kacangan, tomat, janur, khamir, riboflavin rusak oleh cahaya.

Struktur:



Merupakan prekursor kofaktor:

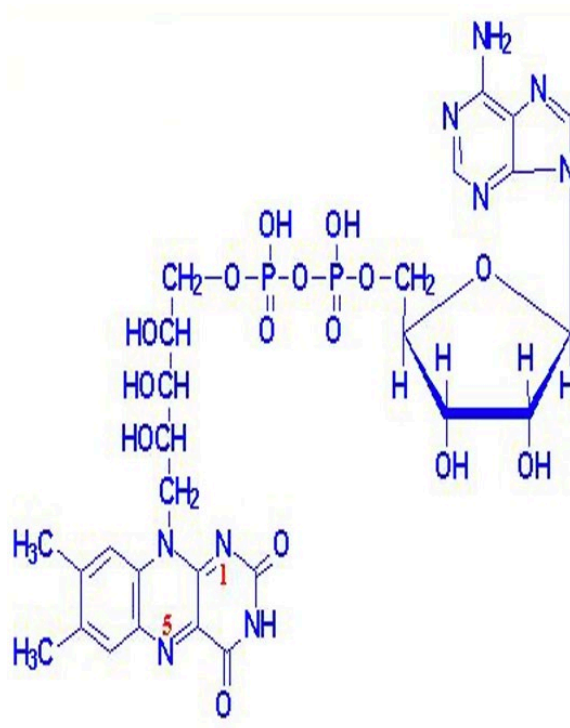
Flavin mononukleotida (FMN)

Flavin adenine dinukleotida (FAD)

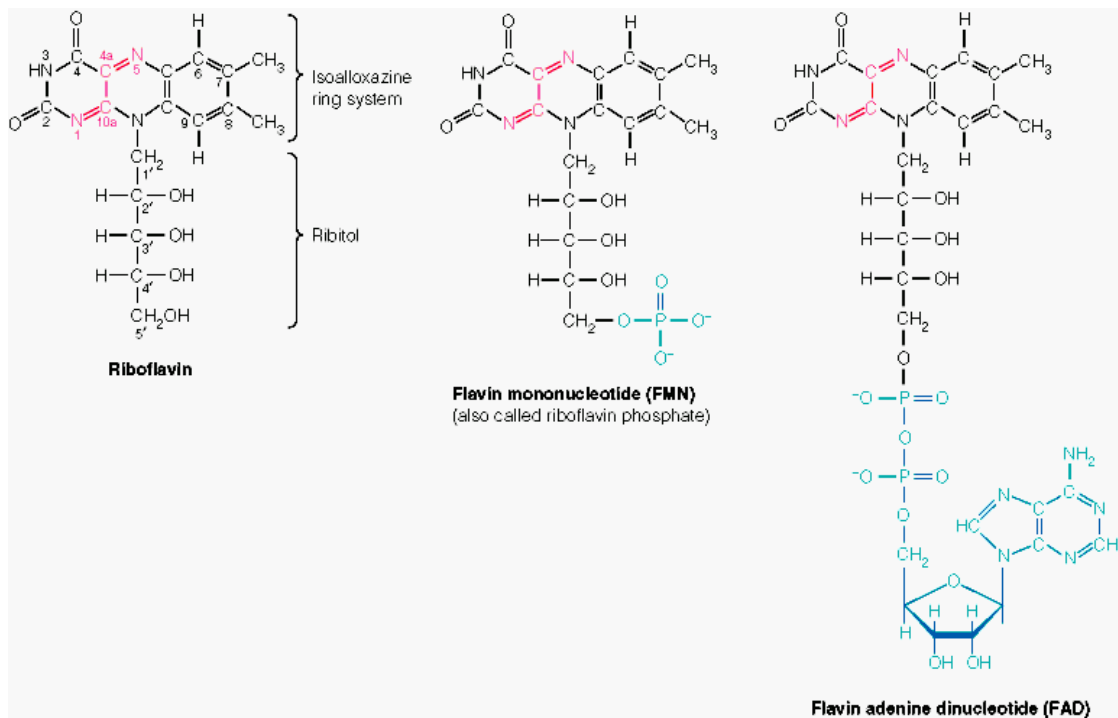
Enzim yang memerlukan kofaktor tersebut seperti flavoprotein

Riboflavin + ATP = FMN

FMN + ATP = FAD



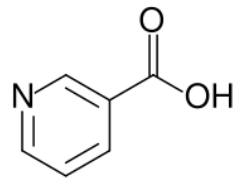
Struktur FAD



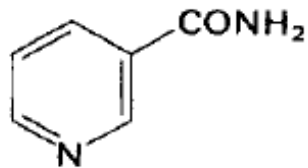
c. Vitamin B3 (Niasin)

Vitamin B3 merupakan turunan dari *pyridine* dengan gugus karboksil. Bentuk lain vitamin B3 adalah amida (nikotinamida) dengan gugus karboksil diganti dengan gugus karboksimida. Istilah niasin dan nikotinamida seringkali dipertukarkan karena mempunyai aktivitas vitamin yang sama tetapi tidak mempunyai efek fisiologis yang sama. Niasin dibutuhkan untuk sintesis vitamin B3, NAD^+ (nicotinamida adenin dinucleotida), dan NADP^+ (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate). NAD^+ dan NADP^+ merupakan kofaktor pada enzim dehidrogenase, yang berfungsi dalam reaksi redoks yaitu reaksi donor dan akseptor elektron. NAD^+ Digunakan pada glikolisis, oksidasi asam lemak, metabolisme badan keton, Cenderung berperan sebagai akseptor elektron pd reaksi katabolisme. NADP^+ banyak digunakan sintesa asam lemak, contoh laktat atau malat dehidrogenase

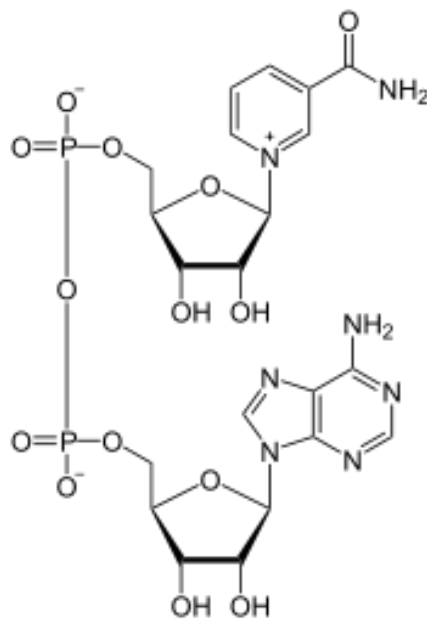
Struktur kimia niasin



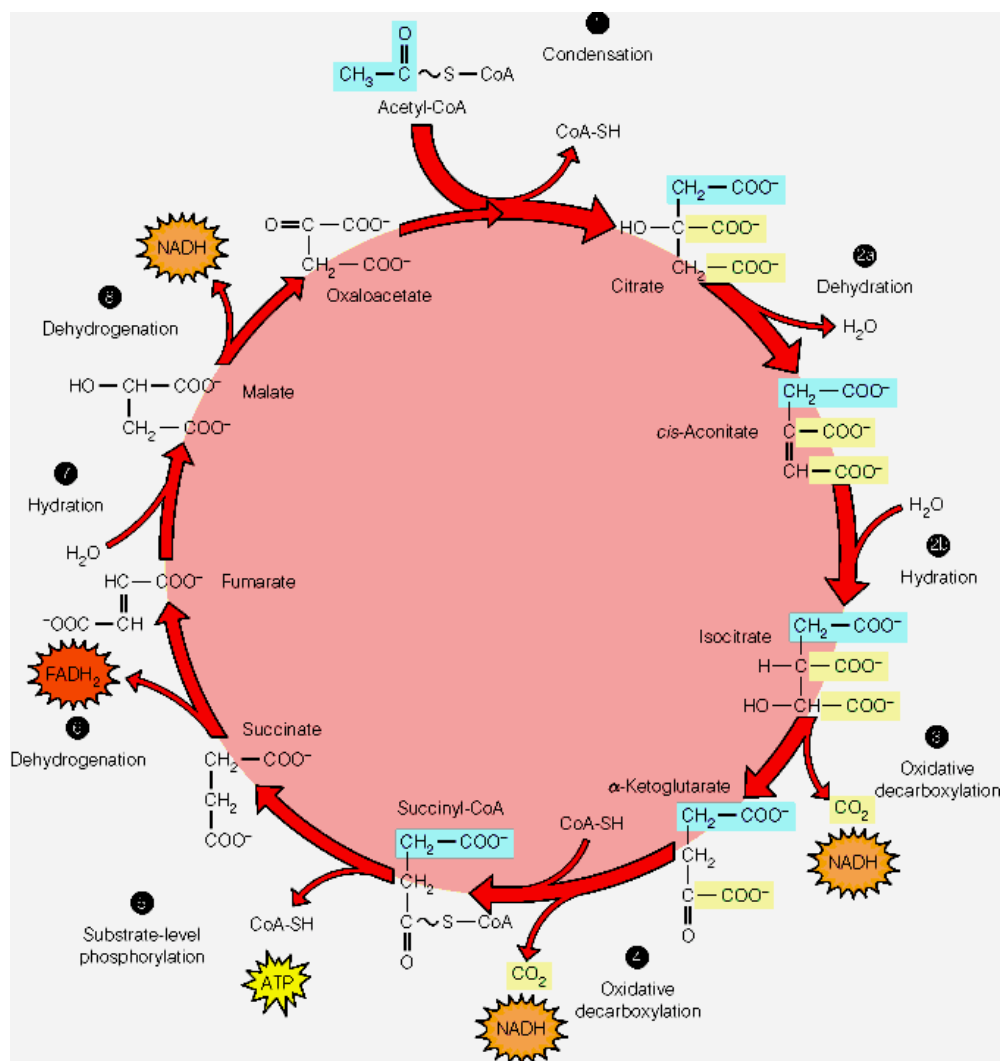
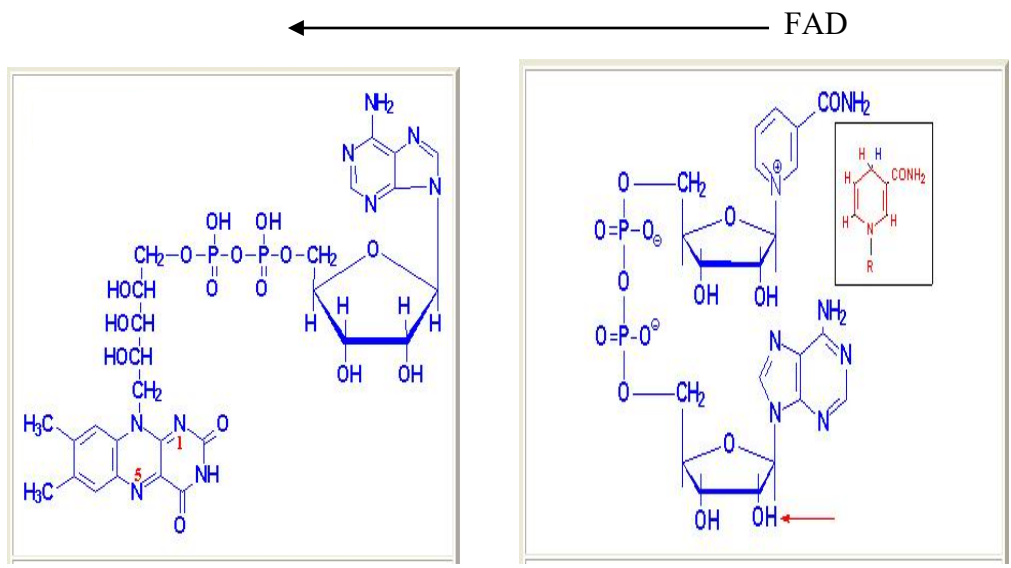
Struktur kimia nikotinamida



NADH, Bentuk aktif vitamin B3



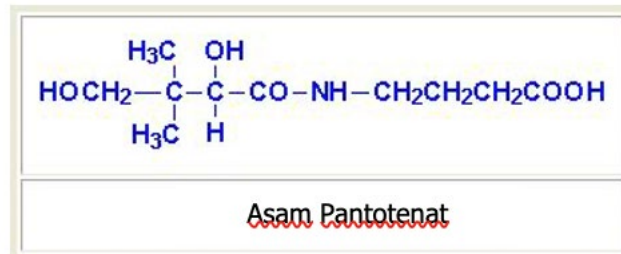
FAD & NAD → electron carriers. Ketika suatu pasangan e⁻ dipindahkan ke molekul ini → 1 atau 2 hidrogen juga akan pindah.



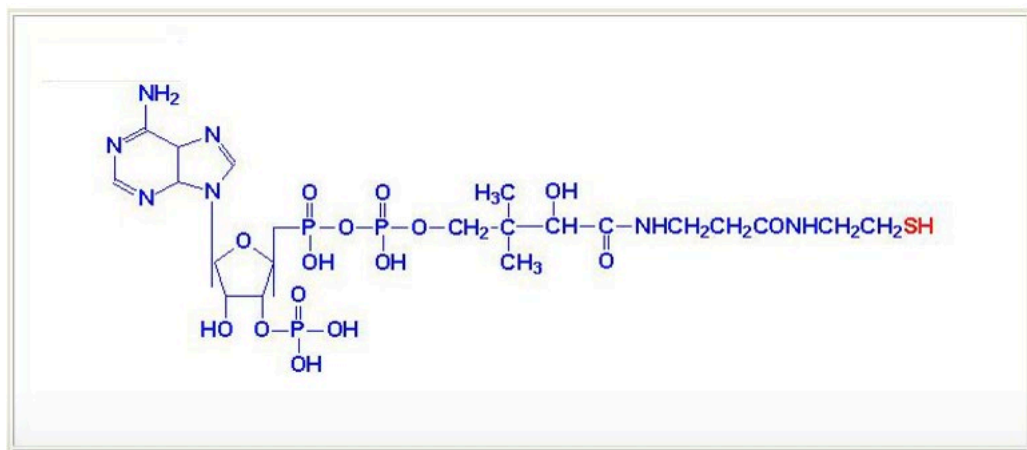
Gambar 170 NADH pada siklus Krebs

d. Vitamin B5 (Asam pantotenat)

Berasal dari β -alanin dan asam pantoat, diperlukan untuk sintesis koenzim A, Komponen asil carrier protein (ACP) \rightarrow pd sintesis asam lemak \rightarrow sintesis kofaktor enzim fatty acid synthase.



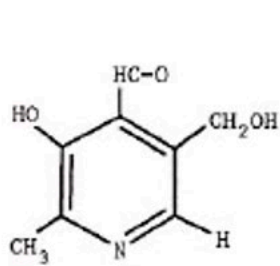
Banyak enzim membutuhkan CoA atau derivat ACP untuk melakukan fungsinya. Banyak ditemukan di kacang-kacangan, daging dan biji-bijian. Koenzim A (CoA) diperlukan pada siklus kreb, sintesis dan oksidasi asam lemak, metabolisme asam amino, sintesis kolesterol.



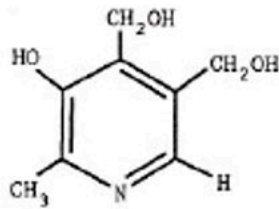
e. Vitamin B6

Berperan sebagai koenzim digunakan untuk metabolisme karbohidrat, lemak, protein, asam amino yang berujung pada pelepasan energi atau menghasilkan energi. Terdapat 6 bentuk umum yang sering dijumpai, yaitu piridoksal (PL), Piridoksin (PN), Piridoksamin (PM), Piridoksal 5-Fosfat (PLP), Piridoksin 5-Fosfat (PNP) dan Piridoksamin 5-Fosfat (PNP). Sumber utama vitamin ini adalah sayur-sayuran.

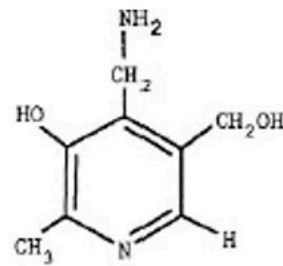
Bentuk-bentuk piridoksin



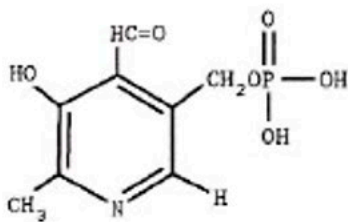
Piridoksal



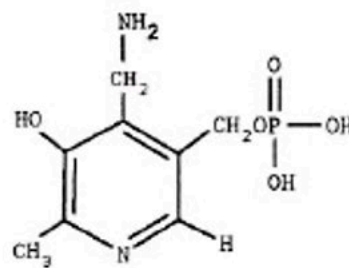
Piridoksin



Piridoksamin



Piridoksal 5-posfat



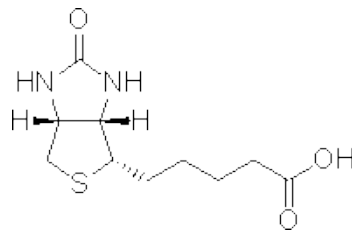
Piridoksamin 5-posfat

Yang paling stabil adalah piridoksal yang digunakan untuk fortifikasi. Hilang 45% pada pemasakan daging, dan 20-30% pada pemasakan sayuran. Selama sterilisasi, mengalami reaksi dengan sistein membentuk vitamin yang inaktif yang terjadi karena adanya panas.

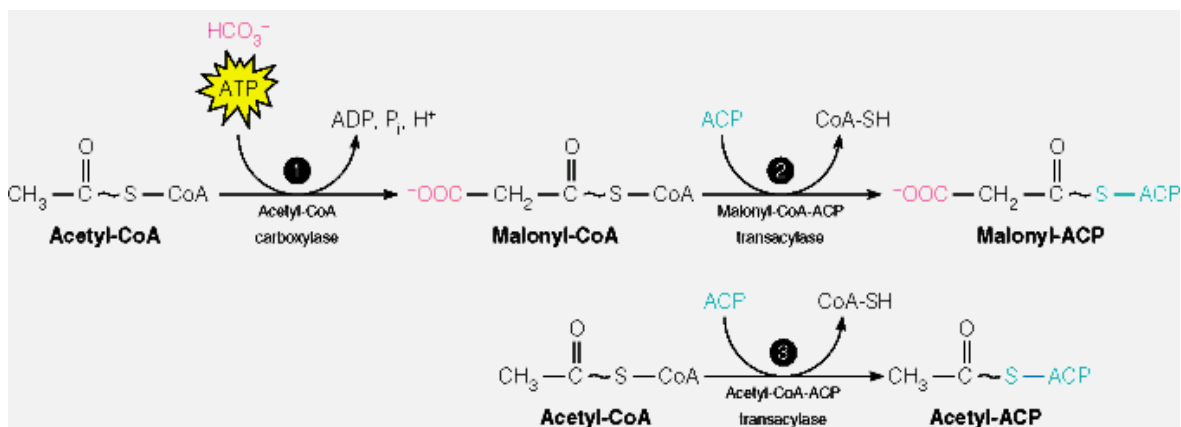
f. Vitamin B7 (Biotin)

Vitamin ini Juga disebut vitamin H, terdiri dari cincin *tetrahydrothiophene* dengan asam valerat terikat pada cincin tersebut. Biotin merupakan koenzim metabolisme asam lemak dan leusin serta berperan pada gluconeogenesis. Defisiensi biotin jarang terjadi karena dapat disintesis oleh bakteri dalam usus. Biotin dapat berikatan dengan avidin dalam putih telur sehingga inaktif.

Struktur Biotin



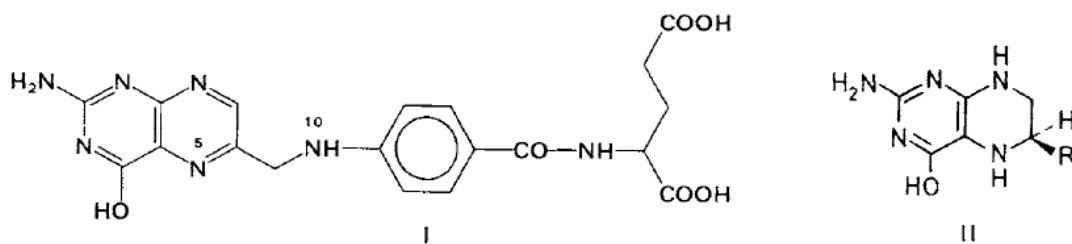
Enzim yang mengandung biotin antara lain: acetyl CoA carboxylase, pyruvate carboxylase, carbamoyl fosfat syntetase II. Acetyl-CoA carboxylase merupakan enzim regulator utama pada biosintesis asam lemak.



g. Vitamin B9 (Asam Folat)

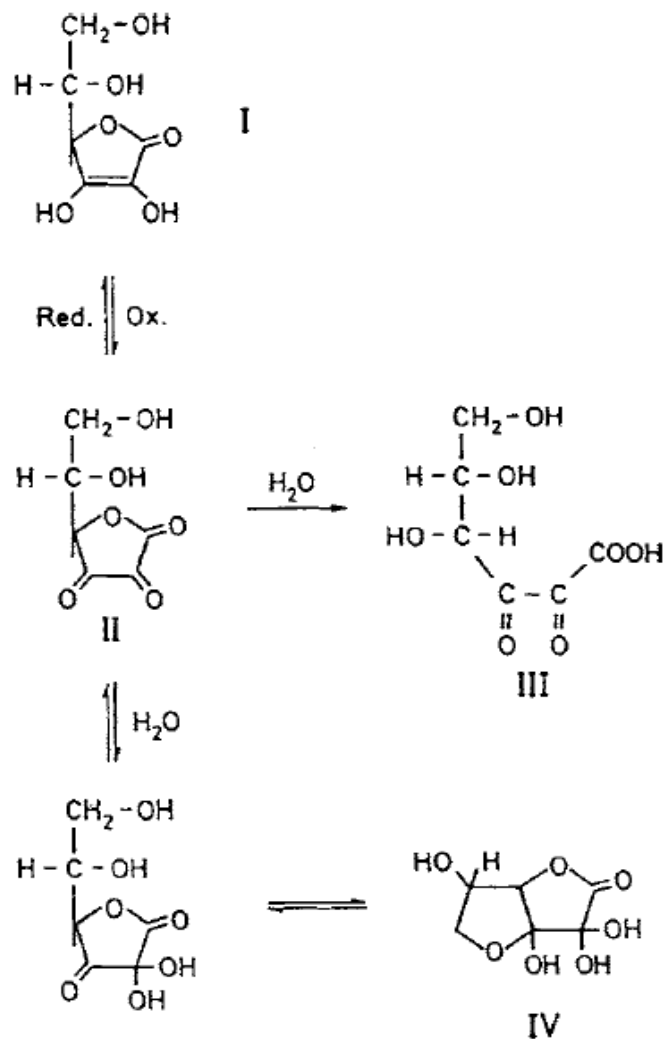
Asam folat (pteroylmonoglutamic acid) secara biologi tidak aktif, tetapi aktivitas biologis dimiliki oleh tetrahidrofolat dan turunannya setelah dikonversi menjadi asam dihidrofolat dalam hati. Berperan pada proses penting seperti sintesis nukleotida, perbaikan DNA, berperan sebagai kofaktor, berperan pada pembelahan sel yang cepat dan pertumbuhan, dan mencegah anemia. Sumber: sayuran dan sereal. Kekurangan folat menyebabkan masalah pada saat perkembangan embrio

Struktur kimia asam folat (I) dan dihydrofolic acid (II)



2. VITAMIN C

Vitamin C adalah salah satu jenis vitamin yang larut dalam air dan memiliki peranan penting dalam menangkal berbagai penyakit. Vitamin ini juga dikenal dengan nama kimia dari bentuk utamanya yaitu asam askorbat. Vitamin C termasuk golongan vitamin antioksidan yang mampu menangkal berbagai radikal bebas. Sifat vitamin C sangat mudah teroksidasi oleh panas, cahaya dan logam. Sumber utama adalah buah-buahan seperti jeruk. Stabilitas asam askorbat (I) mempunyai gugus hidroksil asam ($pK_1 = 4.04$, $pK_2 = 11.4$ at $25^\circ C$). Asam askorbat dengan mudah teroksidasi menjadi asam dehidroaskorbat (II) yang dalam media air ada dalam bentuk hemiketal terhidrasi (IV). Aktivitas biologi (II) lebih rendah dibandingkan (I). Aktivitasnya hilang sama sekali jika rusak cincin lakton dehidroaskorbat terbuka, berubah dari II menjadi asam 2,3 diketogulonat (III).

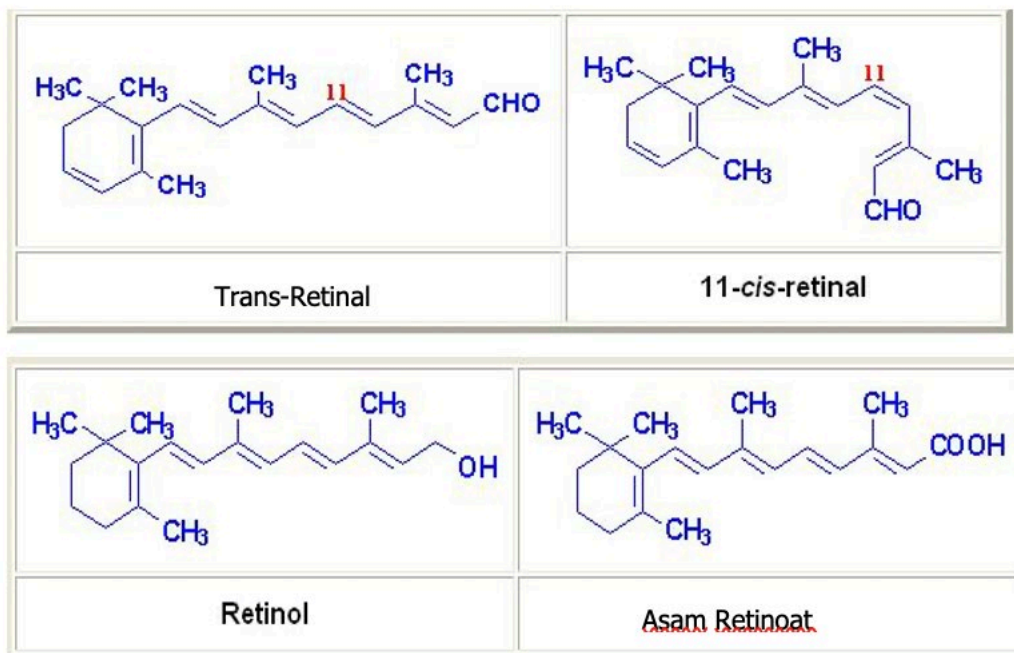


Vitamin C dikeluarkan dari tubuh melalui urine dlm bentuk dydroaskorbat, ketogulonate, askorbat 2 sulfate, asam oksalat. Reaksi utama yg sangat membutuhkan vit c menjadi hidroksilasi proline dalam kolagen. Sebagai kofaktor reaksi katabolisme 313ustaka313 dan sintesis epinefrin dari tirosin, sintesis asam empedu. Oksidasi asam askorbat menjadi asam dehidroaskorbat dan produk degradasi lanjutannya, tergantung dari keberadaan oksigen, pH, suhu, dan adanya logam berat. Logam seperti, Cu^{2+} dan Fe^{3+} , menyebabkan destruksi lebih cepat. Pada kondisi pH rendah tanpa oksigen, terbentuk asam diketogulonat yang terdegradasi lebih lanjut menjadi furfural, redukton, asam furankarboksilat yang menyebabkan warna coklat. Vitamin C dapat mengalami reaksi seperti reaksi Maillard dengan asam amino membentuk warna coklat yang tidak diinginkan

3. Vitamin A

Vitamin A terdiri dari 3 biomolekul aktif :

Retinol, retinal (retinaldehyde), retinoic acid.



Ketiga biomolekul tersebut berasal dari β carotene menjadi provitamin A, terdapat pada tanaman berwarna hijau tua, oranye dan merah. Vitamin A di simpan dalam sel stealate pada hati dalam bentuk retinyl ester (retinol diesterifikasi dengan suatu molekul asam lemak). Pada saat dimobilisasi dlm tubuh diubah menjadi retinol dan

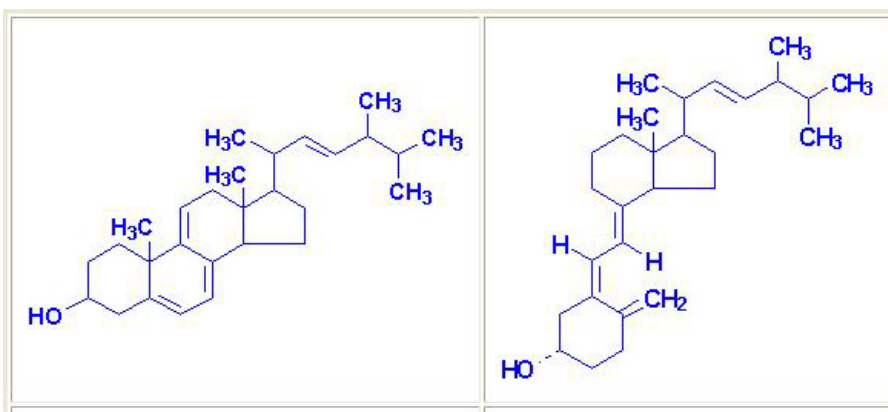
dilepas ke peredaran darah dgn berikatan dg protein RBP. RBP hanya akan dilepas ke dalam darah apabila mengandung retinol. Berbagai macam sel mempunyai reseptor RBP yang terikat pada 314ustaka314.

4. Vitamin D

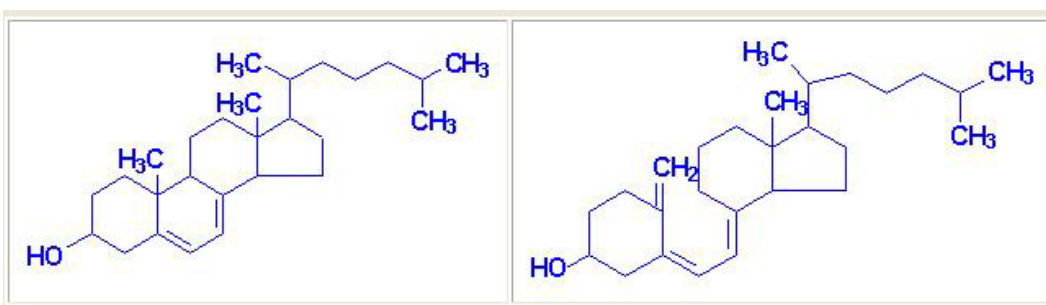
Tumbuhan yang mengandung steroid ergosterol (provit D), disinari UV menjadi ergokalsiferol (vit D2). Hewan mengubah kolesterol menjadi 7 dehidrokolesterol (pro vit D), disinari matahari menjadi kolekalsiferol (vit D3). Pengubahan dari provitamin D menjadi vitamin D melibatkan sinar UV yang berguna membuka cincin steroid strukturnya. Perbedaan vitamin D2 dan D3, vitamin D2 mempunyai ikatan ganda pada rantai sampingnya.

Vitamin D

ergocalciferol

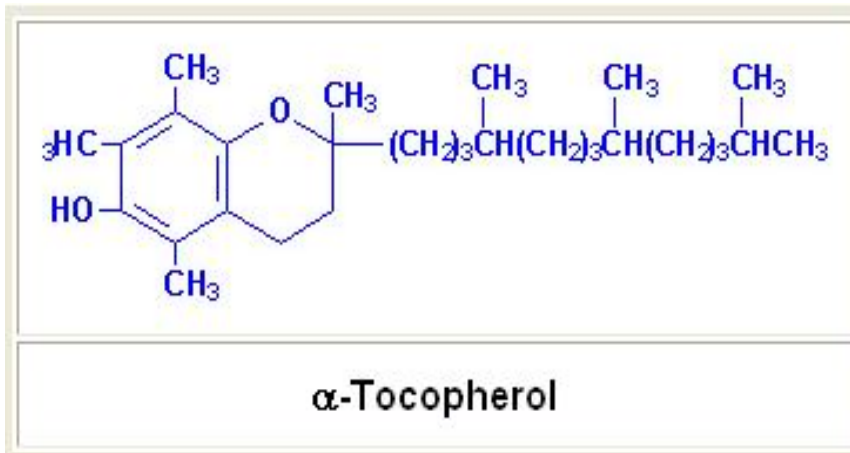


Colecalciferol



5. Vitamin E

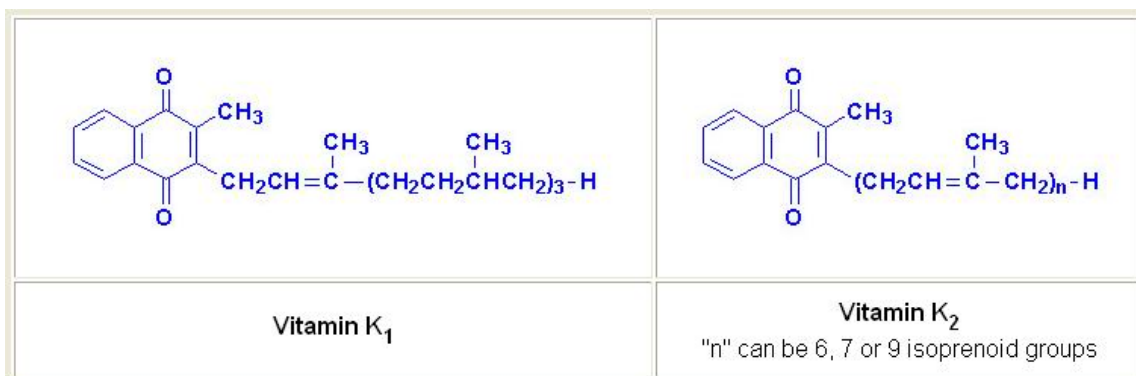
Penting sebagai antioksidan, menangkap radikal bebas



6. Vitamin K

Vit K1 bersumber sayur2 an hijau mengandung senyawa filokuinon

Vit K2 sumber bakteri usus halus mengandung senyawa menakuinon, penting untuk sintesis protein yang terlibat dlm pembekuan darah



B. Mineral

Pandangan Nutrisi adalah bahan yang dibutuhkan untuk proses kehidupan baik dalam bentuk ion atau elemen bebas. Mineral diperoleh dari makanan (tubuh tidak dpt memproduksi. Berdasar jumlah yang dibutuhkan tubuh: dibagi 2 mikroelemen dan makro elemen:

Makro : sodium, klorida, magnesium, fosfor dan kalsium.

Mikro : besi, tembaga, zinc, yod, dan fluoride.

Fungsi:

Sebagai kofaktor (biokatalisator) berbagai reaksi biokimawi dalam makhluk hidup.

- Transmisi sinyal / pesan pada sel saraf
- Pencernaan dan penggunaan makanan.
- Banyak enzim yang mengandung ion metal seperti Metaloenzim
- Ion tersebut berfungsi mirip dengan coenzim
- Fungsi dari metal tersebut dalam enzim sangat bervariasi
- Kadang utk meningkatkan efisiensi enzim (ATP-Mg).

Tabel 31 Logam dan elemen penting sebagai kofaktor enzimatik

No	Contoh Enzim	Peran Logam
1	Sitokrom oksidase	Oksidasi-reduksi
2	Oksidase asam askorbat	Oksidasi-reduksi
3	Alkohol dehidrogenase	Membantu mengikat NAD ⁺
4	Histidin amonia-liase	Membantu katalisis dengan penarikan electron
5	Glutamat mutase	Co adalah bagian dari koenzim kobalamin
6	Urease	Situs katalitik
7	Xantin oksidase	Oksidasi-reduksi
8	Nitrat reductase	Oksidasi-reduksi
9	Glutation peroksidase	Menggantikan S dalam satu sistein di situs aktif

Tabel 32 Kofaktor Logam

Zn ²⁺	Karbonik anhidrase, karboksipeptidase
Mg ²⁺	<i>EcoRV</i> , heksokinase
Ini ²⁺	Urease
Mo	Nitrat reduktase
Se	Glutation peroksidase
Mn ²⁺	Superoksid dismutase
K ⁺	Propionil KoA karboksilase

Magnesium (Mg)

Merupakan kation bivalent yang cenderung berfungsi sebagai "chelator" lebih banyak ditemukan di intraseluler sel daripada di serum darah. Mineral penting, lainnya Ca dan fosfor. Di intraseluler sel sering ditemukan berikatan dengan ATP berperan sebagai kofaktor. ATP yang berikatan dengan Mg yang merupakan substrat yang lebih efektif bagi enzim-enzim yang membutuhkan ATP. Mg penting bagi manusia krn berperan dlm reaksi penghasilan energi. Pompa Na/K yg mengatur konsentrasi elektrolit dlm sel di dikontrol oleh ATP, keseimbangan elektrolit di dalam sel tergantung pada Mg, food processing menghilangkan Mg dalam makanan.

Kalsium (Ca)

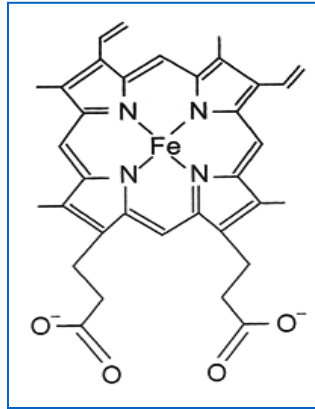
Merupakan mineral yang sulit diperoleh dari makanan kita sehari-hari, berfungsi : Kontraksi otot, secondary messenger, pembentukan tulang dan otot, koagulasi darah, pemecahan glikogen, untuk melakukan kontraksi otot membutuhkan ATP (dalam myofibril).

Potasium (K)

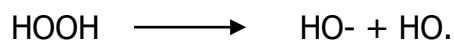
Merupakan mineral esensial dan banyak dikenal sebagai elektrolit, fungsi tubuh normal, tergantung konsentrasi K di dalam dan luar sel. Berfungsi sebagai menjaga potensial sel, kofaktor enzim, Menjaga potensial membran. K⁻ merupakan kation utama di dalam sel, sedangkan N⁻ merupakan kation utama di luar sel. K⁻ di dlm sel 30 kali lebih tinggi daripada diluar sel. Na di luar sel besarnya 10 kali lebih tinggi daripada didlm sel. Perbedaan konsentrasi gradien elektrokimiawi disebut potensial membran. Potensial penting dalam penyampaian sinyal untuk komunikasi antar sel sel saraf

Besi (Fe)

Fungsi utama besi adalah bergabung dgn protein membentuk hemoglobin (transport O₂ dr paru2 ke jaringan yg membutuhkan). Penting pula untuk pembentukan myoglobulin (pengangkut O₂ di dlm otot). Keseimbangan antara Fe, Zn & Cu → penting untuk menjaga dan mencegah thyroidism



Terdapat dalam bentuk Fe (II) atau (Fe(III)) di dalam tubuh ditemukan berasosiasi dgn protein di dalam tubuh tersimpan dlm jumlah besar dalam protein ferritin. Dalam bentuk bebas di dalam tubuh konsentrasi sangat rendah. Karena ion Ferri tidak larut dalam air. Mungkin ion ferro toksik bagi sel, dapat bereaksi dengan peroksida membentuk radikal hidroksil.

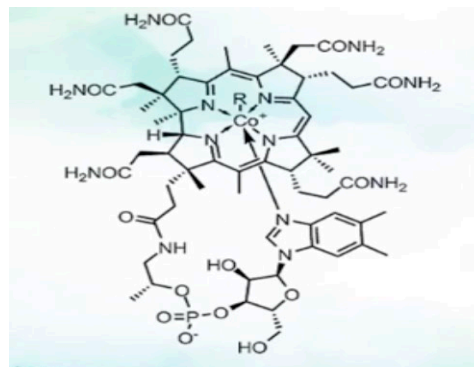


Makanan biasa mengandung Fe (III) → tapi untuk mudah diserap harus dlm bentuk Fe (II). Reduksi Fe (III) menjadi Fe (II) → dgn askorbat (vit C) atau dgn suksinat

Zinc (Zn)

Elemen esensial dalam makanan baik (tumbuhan, hewan dan manusia). Dibutuhkan untuk pembentukan substansi dalam sel dan untuk reproduksi biologis. Diperlukan dalam sintesis DNA dan RNA. Kekurangan Zn tidak spesifik karena banyaknya enzim yg membutuhkan Zn. Defisiensi Zn menyebabkan Imunodefisiensi, Peningkatan jumlah infeksi, Pertumbuhan terhambat.

Materi vitamin dan mineral dapat di lihat pada video berikut ini.



Gambar 172 Vitamin dan Mineral
Sumber: Sukaryawan & Sari 2021

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke sembilan biokimia 1 pada pokok bahasan hormon, antigen, antibody, vitamin dan mineral yang telah disajikan, kemudian bahaslah mengapa manusia membutuhkan vitamin dan mineral? Apakah perlu dengan mengkonsumsi vitamin dan mineral suplemen?

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, setelah saudara diskusikan mengenai perlunya manusia mengkonsumsi vitamin dan mineral, selanjutnya bahaslah bersama kelompok saudara: Bagaimana peranan utama vitamin, mineral dan hormon yang dibutuhkan oleh manusia? Bahaslah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan.

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang peranan utama vitamin, mineral dan hormon. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang peranan utama vitamin, mineral dan hormon. Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

4. APLIKASI

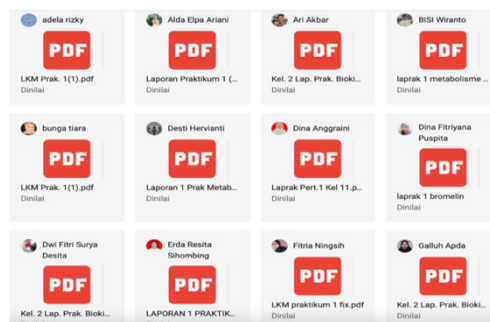
Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang peranan utama vitamin, mineral dan hormon. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di upload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal berikut ini.

- a. Bahaslah dalam kontek biokimia fungsi dan peranan vitamin, mineral dan hormon pada manusia?
- b. Apa yang terjadi jika defisiensi vitamin dan mineral pada manusia?
- c. Apa yang terjadi jika ada kelainan salah satu hormon pada manusia?

- d. Bahaslah sumber/prekursor dari vitamin dan mineral yang diperlukan oleh manusia.
- e. Tuliskan struktur vitamin A, B, C dan D, E dan K.

5. REFLEKSI

Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 9 hormon, antigen, antibody, vitamin dan mineral". Selanjutnya laporan tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id>. Laporan 9 hormon, antigen, antibody, vitamin dan mineral memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka. Contoh submit laporan 9 Vitamin dan Mineral



Gambar 173 Submit Laporan Vitamin dan Mineral

Materi perkuliahan pokok bahasan Hormon, Vitamin dan Mineral dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.

Hormon dan Vitamin	vitamin dan Mineral (Koenzim dan Kofaktor)
<ul style="list-style-type: none"> • Kemampuan akhir tiap tahapan belajar (Sub-CPMK): • Mampu mengkaji implikasi Hormon dan Vitamin dalam kehidupan sehari-hari;(Sub-CPMK4). 	<ul style="list-style-type: none"> • Kemampuan akhir tiap tahapan belajar (Sub-CPMK): • Mampu mengkaji implikasi Vitamin dan mineral dalam kehidupan sehari-hari. (Sub-CPMK4).

Gambar 174 Paparan Materi Hormon dan Vitamin

Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di disubmit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

1. Hormon yang dilepaskan ke dalam aliran darah memiliki sel reseptor yang jauh dari sumbernya, Jelaskan tentang jenis hormone ini.
2. Jelaskan hormone yang bertanggungjawab terhadap transporter glukosa ke membran plasma otot dan adiposa.
3. Hormon dapat diklasifikasikan pada tiga cara utama sebagai berikut: Autokrin, Parakrin dan Endokrin. Jelaskan fungsi ketiga hormone tersebut.
4. Kebutuhan nutrisi Asam Nikotinat, Kekurangan vitamin asam nikotinat pada diet mengakibatkan penyakit pelagra :
 - (a) Kebutuhan per hari asam nikotinat pada manusia dewasa sebesar 7,5 mg, menurun jika asam aminotriptifan terdapat dalam jumlah besar di dalam diet. Bagaimanakah hubungan metabolisme antara asam nikotinat dan triptofan sehubungan dengan pengamatan di atas?
 - (b) Pelagra pernah menjadi penyakit umum dijumpai selama berabad-abad, terutama di Amerika Selatan, yang dietnya miskin akan daging dan menggunakan jagung sebagai makanan pokoknya. Dapatkah kamu menerangkan mengapa keadaan tersebut berakibat pada kekurangan asam nikotinat?
5. Polineuritis pada Burung Merpati. Pada percobaan klasik, merpati yang diberikan diet percobaan tidak dapat mempertahankan keseimbangan dan koordinasi tubuhnya. Tingkat piruvat di dalam darah dan otaknya ditemukan jauh lebih tinggi dibandingkan burung-burung yang normal. Keadaan ini dapat dicegah atau disembuhkan dengan memberikan makanan sisa daging kepada burung-burung tersebut. Berikan keterangan untuk pengamatan tersebut.

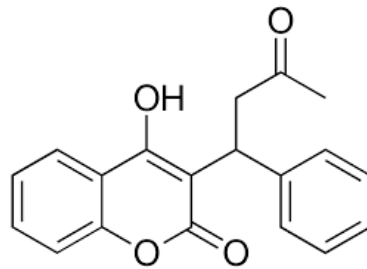
6. Analisa Riboflavin dengan Menggunakan Bakteri *Lactobacillus casei*, anggota kelompok bakteri di dalam pembuatan makanan terfermentasi seperti yogurt, sayur-asin, dan pickel tidak dapat mensintesis riboflavin. Ciri khas bakteri ini adalah bahwa mereka memperoleh energi dari pemecahan glukosa menjadi asam laktat ($pK' 3,5$). Bagaimana anda akan melakukan analisa kuantitatif riboflavin berdasarkan keterangan-keterangan di atas?
7. Kebutuhan Piridoksin dan Asam Amino pada Bakteri *Lactobacillus casei* tumbuh pada kultur sederhana yang mengandung vitamin riboflavin dan piridoksin serta empat jenis asam amino. Apabila campuran lengkap asam-asam amino ditambahkan ke dalam kultur pertumbuhan bersama-sama dengan riboflavin, maka kebutuhan piridoksin untuk pertumbuhan yang optimal akan berkurang 90 persen. Terangkan hasil pengamatan tersebut?
8. *Putih Telur Mencegah Kerusakan Kuning Telur* Telur yang disimpan di dalam lemari es untuk 4 sampai 6 minggu tidak mengalami kerusakan. Sebaliknya, kuning telur yang dipisahkan dari putih telurnya cepat sekali rusak bahkan pada suhu lemari es.
 - (a) Apakah yang menyebabkan terjadinya kerusakan?
 - (b) Bagaimana anda dapat menerangkan bahwa adanya putih telur membantu mencegah rusaknya kuning telur.
 - (c) Apakah keuntungan hayati, dari hal di atas yang dapat digunakan untuk melindungi burung?
9. Kebutuhan Nutrisi Asam Folat pada *Streptococcus Faecalis* Bakteri yang terdapat pada usus besar, *Streptococcus faecalis* mempunyai kebutuhan nutrisi akan vitamin asam folat. Apabila medium pertumbuhannya mengandung adenin dan timidin, bakteri tersebut dapat ditumbuhkan segera tanpa adanya asam folat. Pemeriksaan terhadap kultur tersebut menunjukkan bahwa bakteri yang tumbuh dengan cara demikian sama sekali tidak memerlukan asam folat. Mengapa bakteri membutuhkan asam folat? Mengapa penambahan adenin dan timidin ke dalam kultur medium menghilangkan kebutuhan tersebut?

11. Kebutuhan Kobalt pada Ruminansia. Sebagian besar bobot tumbuhan di bumi kita terdiri dari polisakarida tak larut, dengan selulosa sebagai komponen utamanya. Meskipun kebanyakan hewan kekurangan enzim yang penting untuk mencerna selulosa, ruminansia (contohnya: sapi, kuda, domba dan kambing) memanfaatkan kerja mikroba untuk melakukan pra-pencernaan rumput dan daun-daunan. Tidak seperti kebanyakan hewan lainnya, ruminansia mempunyai kebutuhan nutrisi yang tinggi akan kobalt. Di daerah yang kandungan kobalt di dalam tanahnya rendah, seperti Australia, kekurangan kobalt pada sapi/lembu dan domba merupakan masalah yang serius. Sarankan alasan tingginya kebutuhan nutrisi kobalt pada ruminansia.
12. Frekuensi Pemasukan Vitamin. Meskipun memungkinkan bagi kita memasukkan cadangan vitamin A dan vitamin D untuk beberapa minggu sekaligus, tetapi vitamin B kompleks harus diberikan lebih sering. Mengapa?
13. Kekurangan Vitamin A Xeroftalmia, penyakit buta mata yang ditandai dengan keringnya dan tidak bercahayanya bola mata, disebabkan oleh kekurangan vitamin A. Penyakit ini menyerang sejumlah besar anak-anak dan sedikit orang dewasa. Di negara-negara tropik setiap tahun penyakit ini menyebabkan kebutaan puluhan ribu anak-anak yang berusia antara 18 sampai 36 bulan. Sebagai perbandingan, seorang sukarelawan dewasa yang diberi makanan kekurangan vitamin A pada dietnya selama lebih dari dua tahun hanya menunjukkan buta malam. Kerusakan minimal ini dapat segera disembuhkan dengan pemberian vitamin A. Sarankan suatu keterangan bagi perbedaan pengamatan pengaruh kekurangan vitamin A pada anak-anak dan orang dewasa.
14. Osteodistrofi Ginjal Osteodistrofi ginjal atau "ricket" ginjal, suatu penyakit yang berhubungan dengan penurunan jumlah mineral dalam jumlah besar pada tulang, seringkali timbul pada pasien yang rusak ginjalnya meskipun keseimbangan dietnya baik. Vitamin apakah yang terlibat dalam mineralisasi tulang? Mengapa kerusakan ginjal menurunkan jumlah mineral?

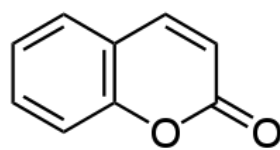
15. Aktivitas Warfarin dan Dikoumarol Warfarin, yang dibuat secara komersial untuk membunuh tikus adalah lawan tangguh vitamin K, karena mempunyai aktivitas yang berlawanan dengan vitamin K.

(a) Berikan keterangan molekular bagaimana warfarin dapat berlaku sebagai lawan vitamin K.

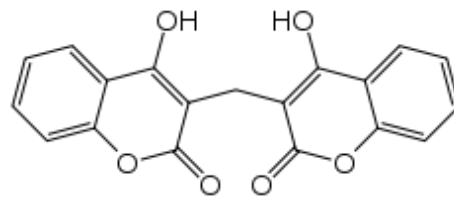
(b) Mengapa termakannya warfarin oleh tikus menyebabkan kematian hewan ini?



(c) Jika lembu atau kuda diberikan makanan "cured sweet clover" (daun semanggi manis) secara tidak tepat, mereka menjadi berpenyakit yang ditandai dengan pendarahan internal secara tidak wajar. Senyawa yang bertanggungjawab atas kejadian tersebut diidentifikasi sebagai dikoumarol, yang muncul karena aktivitas mikroorganisme pada kaumarin, kandungan alamiah semanggi manis. Dikoumarol digunakan secara klinis untuk mengobati penderita tromboflebitis gawat (pembentukan gumpalan darah yang mengganggu). Terangkan dasar pengobatan tersebut.



Koumarin



Dikoumarol

DAFTAR PUSTAKA

1. Al-Mossawi, A.H., Al-Garawi, Z.S. 2018. *Qualitative tests of amino acids and proteins and enzyme kinetics*. Baghdad: Mustansiriyah University.
2. Aleksandrova K.V., Levich S.V., Ivanchenco D.G. (2015). *Biochemistry of Hormones*. Zaporizhzhia: ZSMU.
3. Kumar, S. (2012). *Cellular and Molecular Immunology: Antibodies and Antigens*. Guwahati: Indian Institute of Technology Guwahati
4. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
5. NIOS. *Biochemistry*. <http://nios.ac.in/media/documents/Biochemistry/Lesson12>. Diakses pada tanggal 3 Januari 2022.
6. Ramus, V. 2020. *Qualitative Tests for Proteins*. <https://www.youtube.com/watch?v=6YPWipP-Qe8&feature=youtu.be> (diakses pada tanggal 15 Oktober 2020).
7. Subroto, E., dkk. 2020. The Analysis Techniques Of Amino Acid And Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
8. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
9. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
10. Thenawidjaja. 1990. *Dasar-dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
11. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
12. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
13. Won Chan Kim. *Principles of Biochemistry*. <https://www.kaznaru.edu.kz> . diakses pada tanggal 25 september 2020.

BAB 7 KARBOHIDRAT

1. ORIENTASI

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa mampu mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora sesuai dengan keahliannya berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam rangka menghasilkan solusi, gagasan, desain atau kritik seni (CPMK4), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah mahasiswa mampu mengkaji implikasi karbohidrat dalam kehidupan sehari-hari (Sub-CPMK4). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

Karbohidrat adalah polihidroksi aldehida atau keton atau senyawa yang menghasilkan senyawa-senyawa ini bila dihidrolisa. Nama karbohidrat berasal dari kenyataan bahwa kebanyakan senyawa dari golongan ini mempunyai rumus empiris, yang menunjukkan bahwa senyawa tersebut adalah karbon "Hidrat", dan memiliki nisbah karbon terhadap hidrogen dan terhadap oksigen sebagai 1:2:1. Sebagai contoh, rumus empiris D-Glukosa adalah $C_6H_{12}O_6$, yang juga dapat ditulis sebagai $(CH_2O)_6$ atau $C_6(H_2O)_6$. Walaupun banyak karbohidrat yang umum sesuai dengan rumus empiris $(CH_2O)_n$, yang lain tidak memperhatikan nisbah ini dan beberapa yang lain lagi juga mengandung nitrogen, fosfor, atau sulfur.

Nama karbohidrat bersal dari komposisi dari unit penyusunnya yaitu karbon (Carbo) dan oksigen (-hydrate). Semua karbohidrat disusun oleh unit dasar yang disebut monosakarida. Polimer mengandung 2 – 6 monosakarida disebut olisakarida dan yang lebih banyak lagi disebut polisakarida. Pati (starch), selulosa dan glikogen merupakan contoh polisakarida, Mono dan oligosakarida disebut sebagai gula. Sulfiks "osa" biasa digunakan untuk nama gula.

A. Struktur Karbohidrat

Karbohidrat terdiri dari karbon, hidrogen dan oksigen. Contohnya adalah glukosa, sukrosa dan selulosa. Sebagaimana tampak dalam tiga contoh tersebut, karbohidrat mempunyai rumus umum $C_n(H_2O)_n$. Rumus molekul glukosa misalnya, dapat dinyatakan sebagai $C_6(H_2O)_6$. Oleh karena komposisi demikian, kelompok senyawa ini pernah disangka sebagai hidrat karbon sehingga diberi nama karbohidrat. Akan tetapi, sejak tahun 1880-an disadari bahwa senyawa tersebut bukanlah hidrat dari karbon. Nama lain dari karbohidrat adalah sakarida. Kata sakarida berasal dari arab "sakkar" yang artinya manis. Karbohidrat yang dibangun oleh polihidroksi dan gugus aldehid disebut dengan aldose, sedangkan yang disusun oleh polihidroksi dan gugus keton dikenal dengan ketosa. Molekul karbohidrat yang paling sederhana adalah polihidroksi aldehida dan polihidroksi keton sederhana yang mempunyai tiga hingga enam atom karbon. Atom C memiliki kerangka tetrahedral yang membentuk sudut $109,5^\circ$ menyebabkan molekul karbohidrat cukup sulit berbentuk rantai lurus. Berdasarkan kerangka tetrahedral inilah, molekul polihidroksi ini lebih stabil dalam struktur siklik.

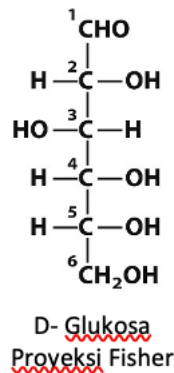
Struktur monosakarida dapat dibagi menjadi dua yaitu struktur Fischer dan Howarth.

1. Struktur Fischer

Struktur Fischer merupakan rumus proyeksi yang dikemukakan oleh seorang kimiawan Jerman bernama Emil Fischer pada tahun 1891. Pada senyawa yang termasuk karbohidrat terdapat gugus fungsi, yaitu gugus $-OH$, gugus aldehida 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 aktivitas optik. Senyawa yang dapat menyebabkan terjadinya pemutaran cahaya terpolarisasi dikatakan mempunyai aktivitas optik.

Isomer optis pada monosakarida disebabkan oleh adanya atom C asimetris dalam molekulnya. Isomer optis monosakarida terjadi pada sakarida dengan rumus molekul sama, tetapi arah putarnya bidang cahaya terpolarisasinya berbeda. Ada yang memutar ke kiri dan ada yang memutar ke kanan. Molekul

monosakarida yang memutar ke kiri diberi nama awalan L (levo = kiri) dan yang memutar ke kanan diberi nama awalan D (dekstro = kanan).

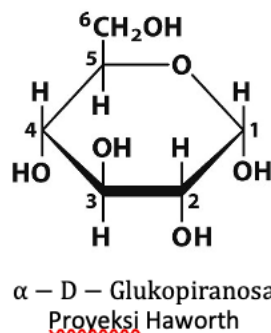


2. Struktur Haworth

Struktur melingkar atau hemiasetal ini dikemukakan oleh Tollens. Struktur ini digambarkan secara perspektif oleh Haworth.

Penulisan kedua struktur tersebut mempunyai hubungan yaitu gugus OH mengarah ke kanan pada proyeksi Fischer menjadi ke bawah pada struktur Haworth, sedangkan gugus OH yang mengarah ke kiri pada proyeksi Fischer menjadi ke atas pada struktur Haworth.

Penamaan struktur melingkar dari monosakarida yang gugus OH-nya mengarah ke bawah diberi awalan alfa (α), sedangkan yang mengarah ke atas diberi awalan beta (β).



Karbohidrat banyak terdapat pada tanaman disimpan sebagai tepung atau selulosa, sedangkan pada hewan karbohidrat disimpan dalam sebagai glikogen.



Gambar 175 Bahan Pangan Karbohidrat

B. Sifat fisika dan kimia karbohidrat.

❖ Sifat umum yang dimiliki oleh karbohidrat

1. Karbohidrat berfungsi sebagai sumber energi utama untuk tubuh. Selain itu karbohidrat juga bisa disimpan sebagai cadangan makanan baik dihati maupun di jaringan otot.
2. Gula ribosa dan deoksiribosa adalah pembentuk struktural dari materi genetik yaitu RNA dan DNA.
3. Polisakarida seperti selulosa adalah unsur utama dalam struktur dinding sel bakteri dan juga tanaman.
4. Karbohidrat terhubung dengan protein dan lipid yang berperan penting dalam interaksi sel.
5. Karbohidrat adalah senyawa organik yang terdiri dari rantai karbon yang memiliki gugus karbonil sebagai aldehid atau keton dan mengandung banyak gugus hidroksil.

❖ Sifat fisik dari karbohidrat

1. Pada suhu kamar berupa zat padat,
2. Kebanyakan senyawanya tidak berwarna dan memiliki struktur bubuk.
3. Berupa zat padat amorf seperti pati,
4. Berupa serat yang bersifat basa seperti selulosa,

5. Sebagian besar karbohidrat memiliki sifat dapat memutar bidang polarisasi cahaya,
6. Memiliki stereoisomer yaitu senyawa-senyawa yang memiliki rumus struktur sama tetapi konfigurasi berbeda. Contoh: glukosa memiliki dua bentuk stereoisomer yaitu D-glukosa dan L-glukosa. Sistem D dan L didasarkan pada gugus OH yang terikat pada atom C kiral terjauh. Jika gugus OH terletak sebelah kanan proyeksi Fischer maka diberi nama D, sedangkan jika disebelah kiri diberi nama L.

❖ Sifat Kimia karbohidrat

1. Jumlah isomer ruang karbohidrat yaitu 2^n , dengan n menyatakan jumlah atom C asimetri.
2. Semua karbohidrat bersifat optis aktif
3. Monosakarida dan disakarida berasa manis dan larut dalam air, sedangkan polisakarida berasa tawar dan tidak larut dalam air.

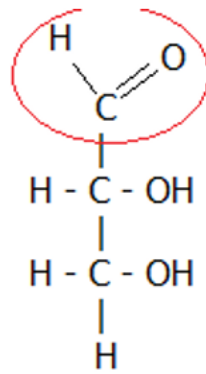
C. Klasifikasi Karbohidrat

Karbohidrat dapat dikelompokkan menurut jumlah unit gula, ukuran dari rantai karbon, lokasi gugus karbonil ($-C=O$), serta stereokimia. Berdasarkan jumlah unit gula dalam rantai, karbohidrat digolongkan menjadi 4 golongan utama yaitu:

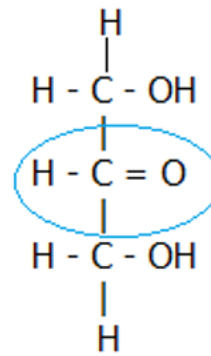
1. Monosakarida terdiri atas 1 unit gula,
2. Disakarida terdiri atas 2 unit gula,
3. Oligosakarida terdiri atas 3-10 unit gula,
4. Polisakarida terdiri atas lebih dari 10 unit gula, pembentukan rantai karbohidrat menggunakan ikatan glikosida.

Berdasarkan lokasi gugus $-C=O$, monosakarida digolongkan menjadi 2 yaitu:

1. Aldosa mengandung gugus aldehyd,
2. Ketosa mengandung gugus keton.



Aldosa



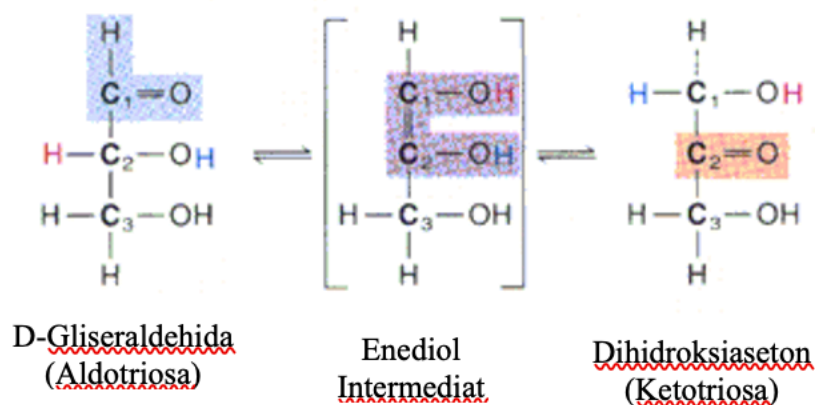
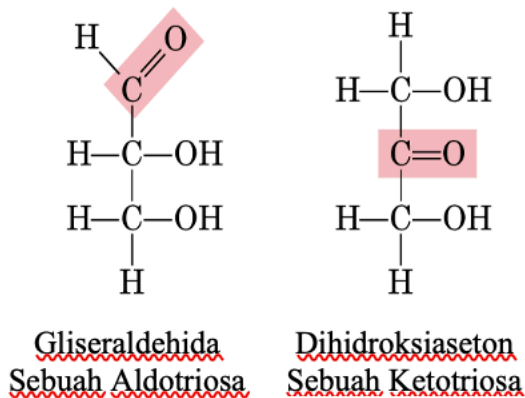
Ketosa

Berdasarkan jumlah atom C pada rantai, monosakarida digolongkan menjadi:

1. Triosa, tersusun atas 3 atom carbon,
2. Tetrosa, tersusun atas 4 atom Carbon,
3. Pentosa, tersusun atas 5 atom Carbon,
4. Heksosa, tersusun atas 6 atom Carbon,
5. Heptosa, tersusun atas 7 atom Carbon
6. Oktosa, tersusun atas 8 atom Carbon.

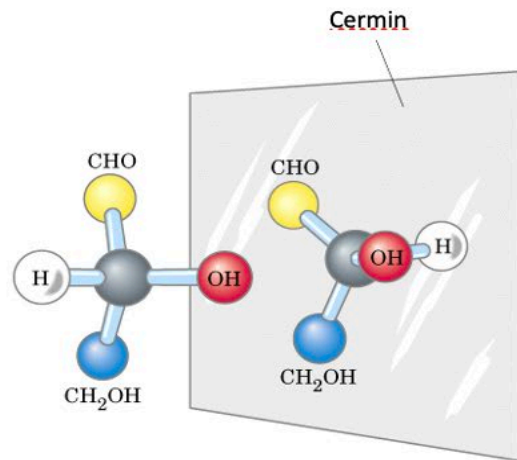
Triosa: Monosakarida berkarbon-3

Molekul monosakarida terkecil adalah $(\text{CH}_2\text{O})_3$, yaitu gliseraldehid dan dihidroksiaseton. Gliseraldehid adalah suatu aldehyd, dan merupakan kelas monosakarida **aldosa**. Dihidroksiaseton adalah suatu keton, dan merupakan kelas monosakarida **ketosa**. Akhiran -osa diberikan untuk senyawa sakarida. Gliseraldehid dan dihidroksiaseton adalah tautomer. Interkonversi dapat berlangsung via intermediet enediol.

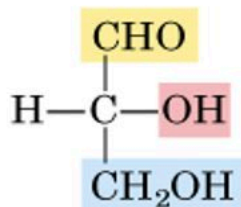


Enansiomer, adalah stereokimia atau stereoisomer adalah bentuk isomer di mana molekul memiliki rumus molekul yang sama dan urutan atom terikat, namun berbeda dalam orientasi tiga dimensi atau berbeda penataan dalam suatu ruang. Enansiomer adalah salah satu dari dua stereoisomer yang merupakan bayangan cermin satu sama lain yang tidak identik, seperti tangan kiri dan kanan adalah sama kecuali untuk yang terbalik sepanjang satu sumbu. Senyawa organik yang mengandung karbon kiral biasanya memiliki dua struktur tidak identik. Kedua struktur adalah gambar cermin satu sama lain biasa disebut enantiomorf (*enantio* = berlawanan; *morph* = bentuk), maka struktural ini sekarang sering disebut sebagai enantiomer. Diastereomer didefinisikan sebagai stereoisomer yang bukan bayangan cermin yang tidak identik.

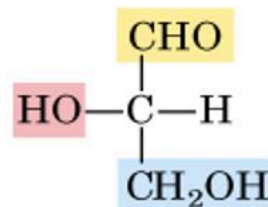
Atom karbon kedua gliseraldehid adalah karbon kiral. Gliseraldehid memiliki dua enansiomer: *L*-Gliseraldehid dan *D*-gliseraldehid.



Model Bola dan Batang

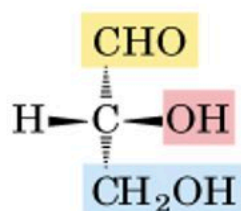


D- Gliseraldehida

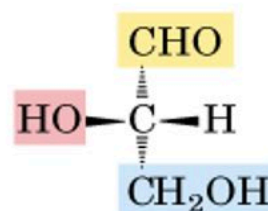


L- Gliseraldehida

Rumus Bagun_Proyeksi Fisher



D- Gliseraldehida



L- Gliseraldehida

Rumus Bagun_Perspektif

L = laevo dan D = dextro

Sistem *D-L* bukan konfigurasi stereokimia absolut. Sistem stereokimia *L* dan *D* didasarkan pada kemiripan orientasi gugus disekitar atom karbon kiral dengan molekul standar, tetapi arah putaran molekulnya belum tentu sesuai dengan simbol

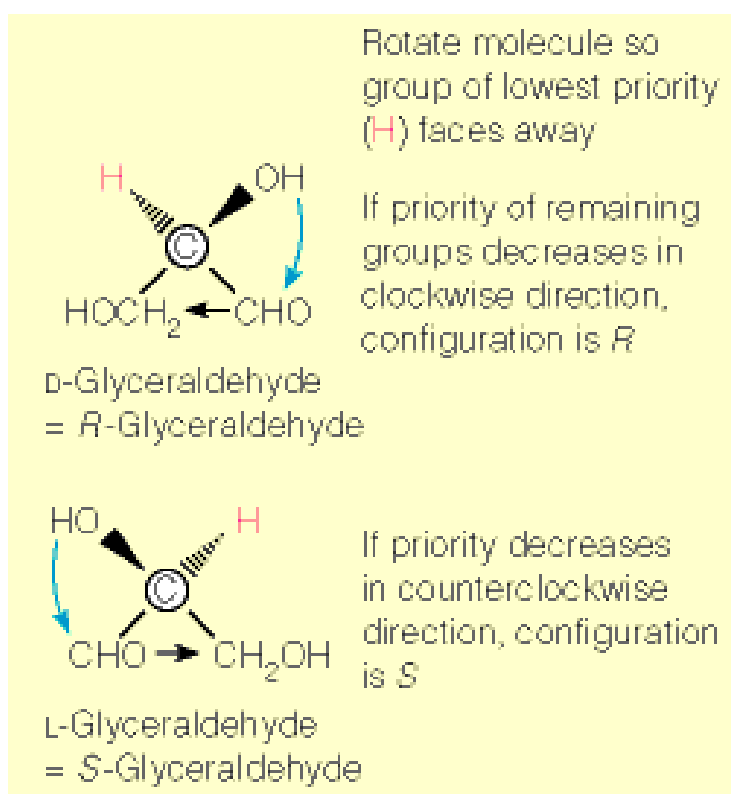
stereokimia tersebut. Contoh: *D*-fruktosa memutar bidang polarisasi ke kiri bukan ke kanan, dan juga *L*-fruktosa memutar bidang polarisasi ke kanan bukan ke kiri.

Sistem *RS*: Konfigurasi stereokimia absolut. Pada sistem *R-S*, setiap gugus yang terikat pada atom karbon kiral diberi prioritas menurut konvensi.

Urutan prioritas gugus yang umum ditemukan dalam karbohidrat:

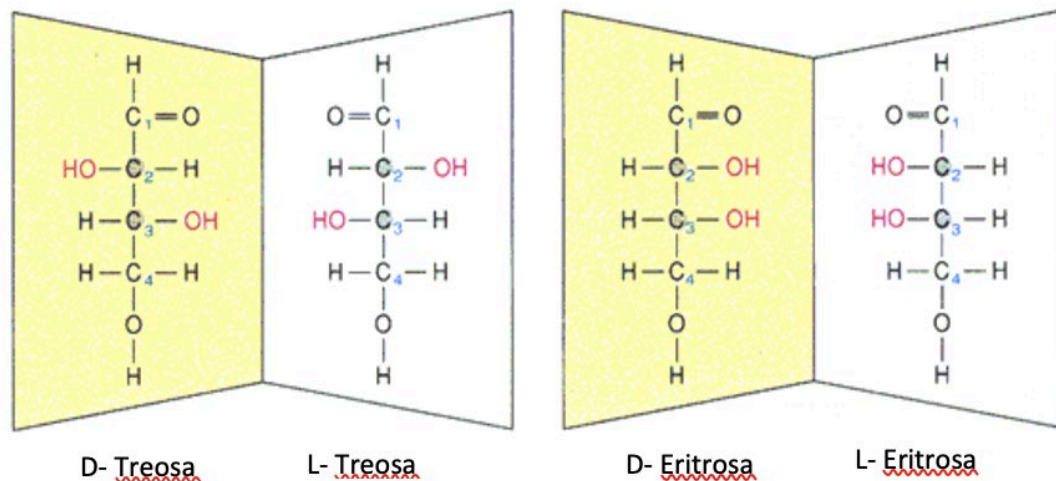
$-OR > -OH > -NH_2 > CO_2H > CHO > CH_2OH > CH_3 > H$.

Tempatkan gugus dengan prioritas terendah menjauh dari kita. Bila prioritas ketiga gugus lainnya menurun searah jarum jam, maka konfigurasi absolutnya adalah *R* (*rectus* = kanan), bila sebaliknya berarti *S* (*sinister* = kiri)



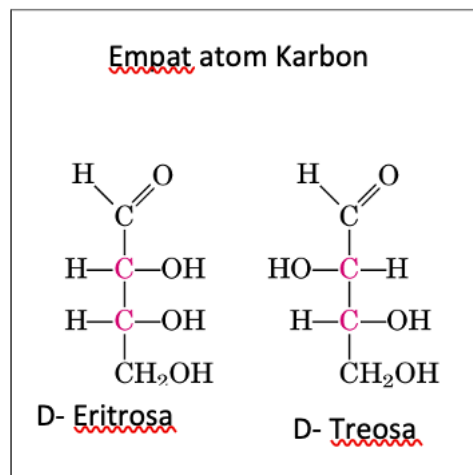
Tetrosa: monosakarida berkarbon-4

Rumus empiris tetrosa: $(CH_2O)_4$, bentuk aldotetrosa memiliki dua karbon kiral, sehingga akan ada 4 stereoisomer. Secara umum jumlah stereoisomer untuk *n* karbon kiral dinyatakan dengan 2^n . Konfigurasi *D* dan *L* merujuk pada orientasi disekitar karbon kiral terjauh dari gugus karbonil, yaitu karbon ketiga.



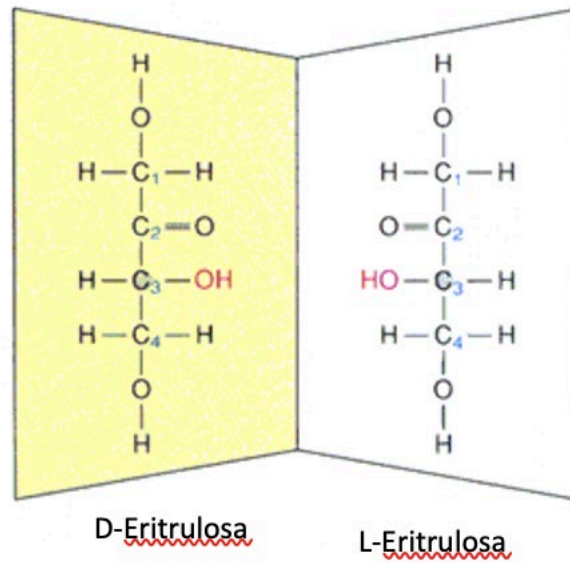
Diastereoisomer aldotetrosa

- Molekul tetrosa dengan orientasi gugus2 berbeda pada karbon-2 diberi nama berbeda, yaitu threosa dan erithrosa.
- Threosa dan eritrosa adalah dua stereoisomer aldotetrosa yang bukan enansiomer atau disebut diastereoisomer.



Keto tetrosa: ketosa empat karbon

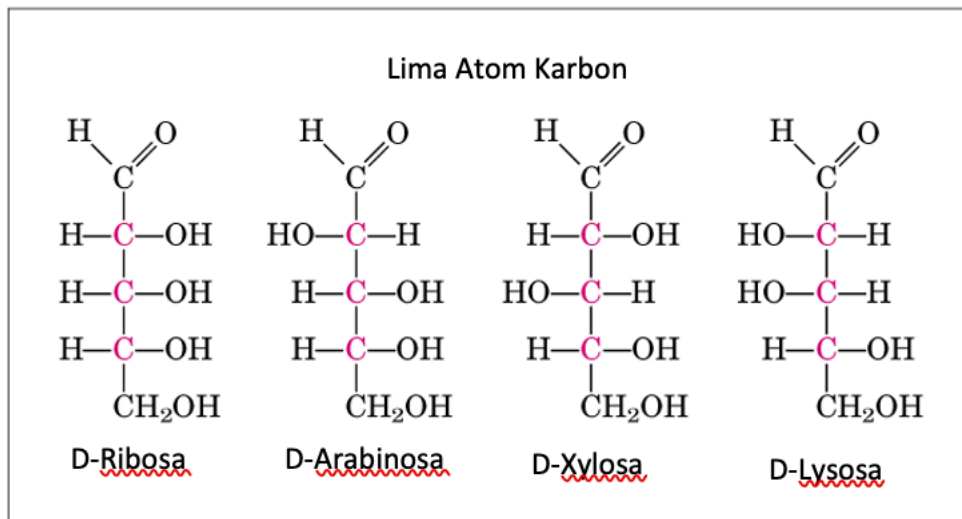
Penamaan ketosa diperoleh dari nama bentuk aldosa dengan menambahkan sisipan *ul*. Contoh eritrosa menjadi eritru losa. Eritru losa hanya memiliki satu karbon kiral, sehingga hanya memiliki sepasang enansiomer.



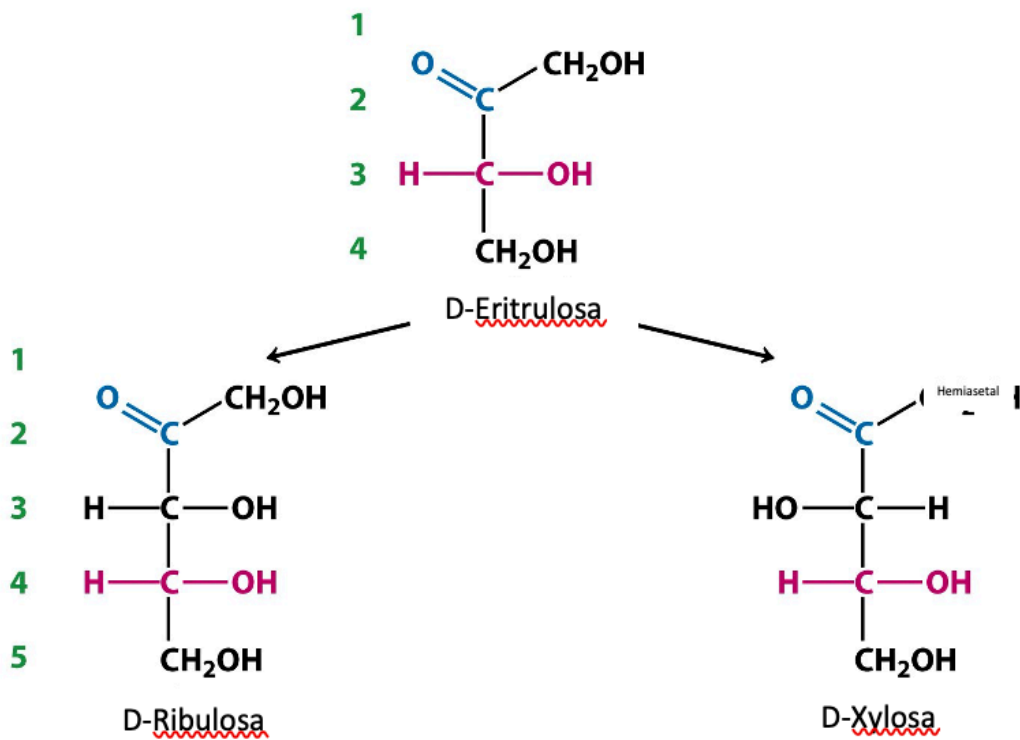
Pentosa

Rumus empiris: $(\text{CH}_2\text{O})_5$.

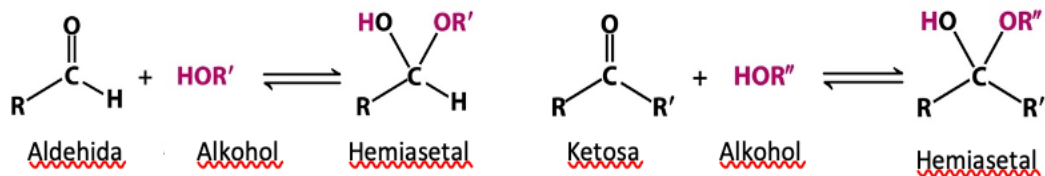
Aldo pentosa memiliki tiga karbon kiral, sehingga memiliki $2^3 = 8$ stereoisomer (empat pasang enansiomer).



Ketopentosa



Hemiasetal dan Hemiketal

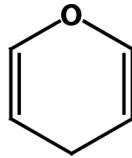


D. Struktur cincin aldopentose

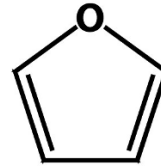
Molekul aldopentosa memiliki tendensi kuat untuk membentuk cincin via reaksi **hemiasetal** internal. Ada dua reaksi yang mungkin:

1. Pembentukan cincin segi lima yang disebut **furanosa**. Nama ini diberikan karena ada kemiripan dengan struktur **furan**.
2. Reaksi pembentukan cincin segi enam atau disebut **piranosa**, bila reaksi berlangsung dengan hidroksil C-5. Nama piranosa diambil karena kemiripan struktur dengan **piran**.

3. Pada kondisi fisiologis, monosakarida dengan karbon 5 atau lebih biasanya 99% berada dalam bentuk cincin.

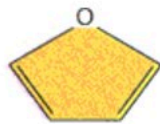


Pyran

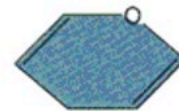


Furan

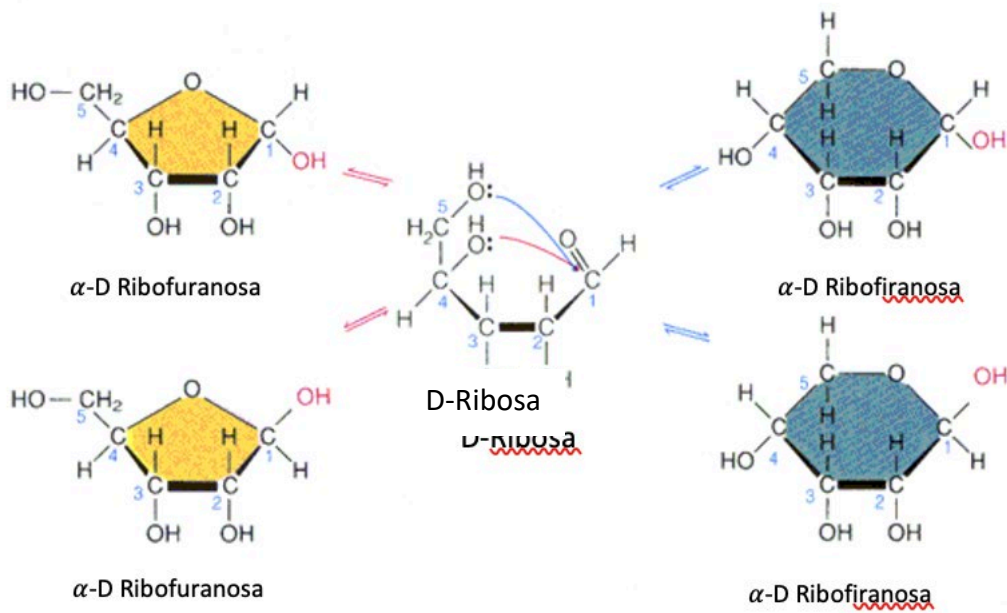
Struktur cincin aldopentosa



Furan



Pyran



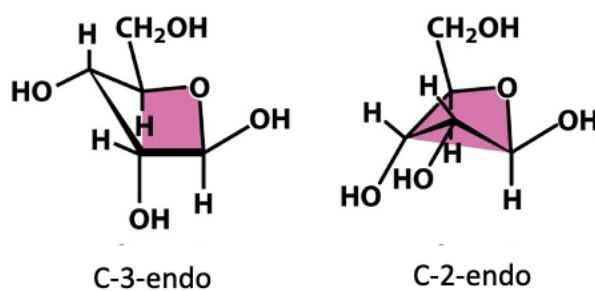
Tabel 33 Distribusi bentuk furan dan piran

Monosakarida	Jumlah Relatif (%)				
	α Piranosa	β Piranosa	α Puranosa	β Puranosa	Puranosa
Ribosa	20	56	6	18	24
Lisosa	71	29 ^a ^a	<1
Altrosa	27	40	20	13	33
Glukosa	36	64 ^a ^a	<1
Manosa	67	33 ^a ^a	<1
Fruktosa	3	57	9	31	40

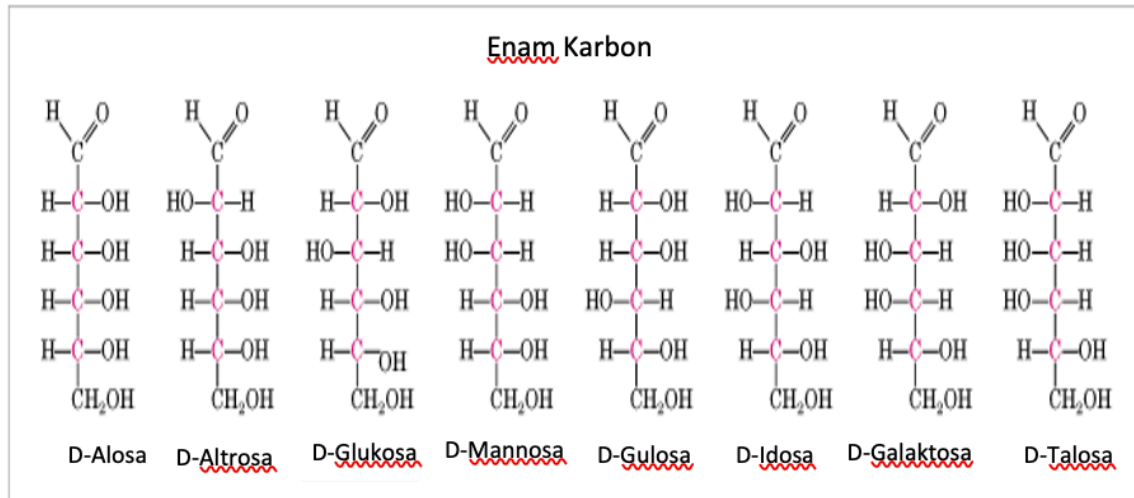
.....^a kurang dari 1%

Distribusi bentuk furan dan piran bergantung pada struktur gula, pH, komposisi pelarut dan temperatur. Ketika monomer bergabung pada polisakarida, struktur polimer akan mempengaruhi struktur cincin yang dipilih. Contoh pada RNA mengandung eksklusif ribofuranosa.

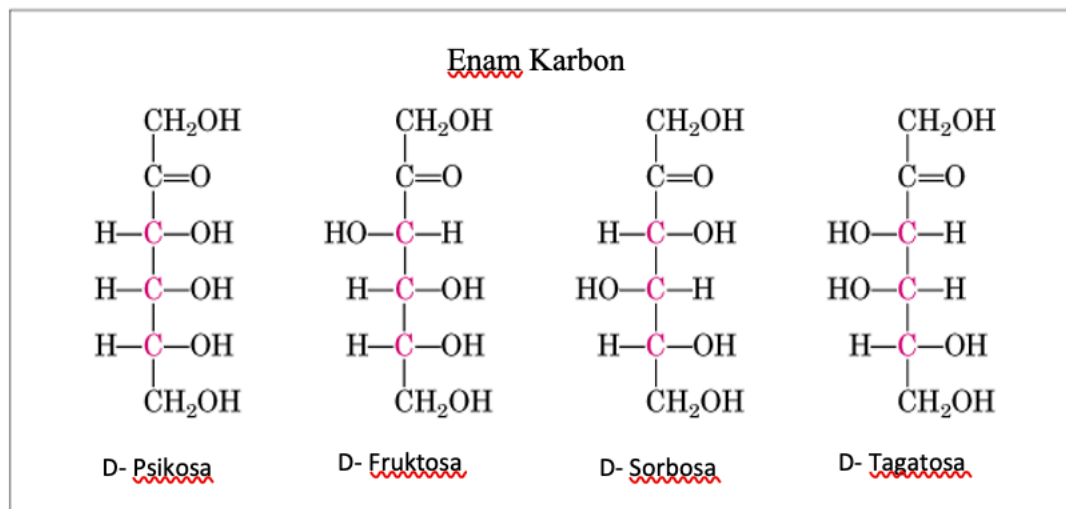
Konformasi cincin furanose



Heksosa: Monosakarida berkarbon-6



D-Aldosa

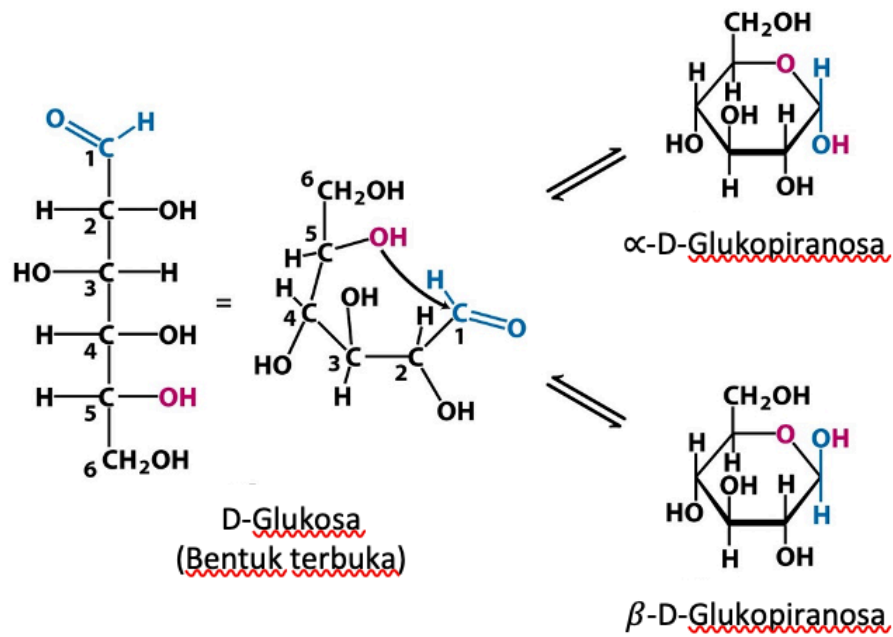


D-Ketosa

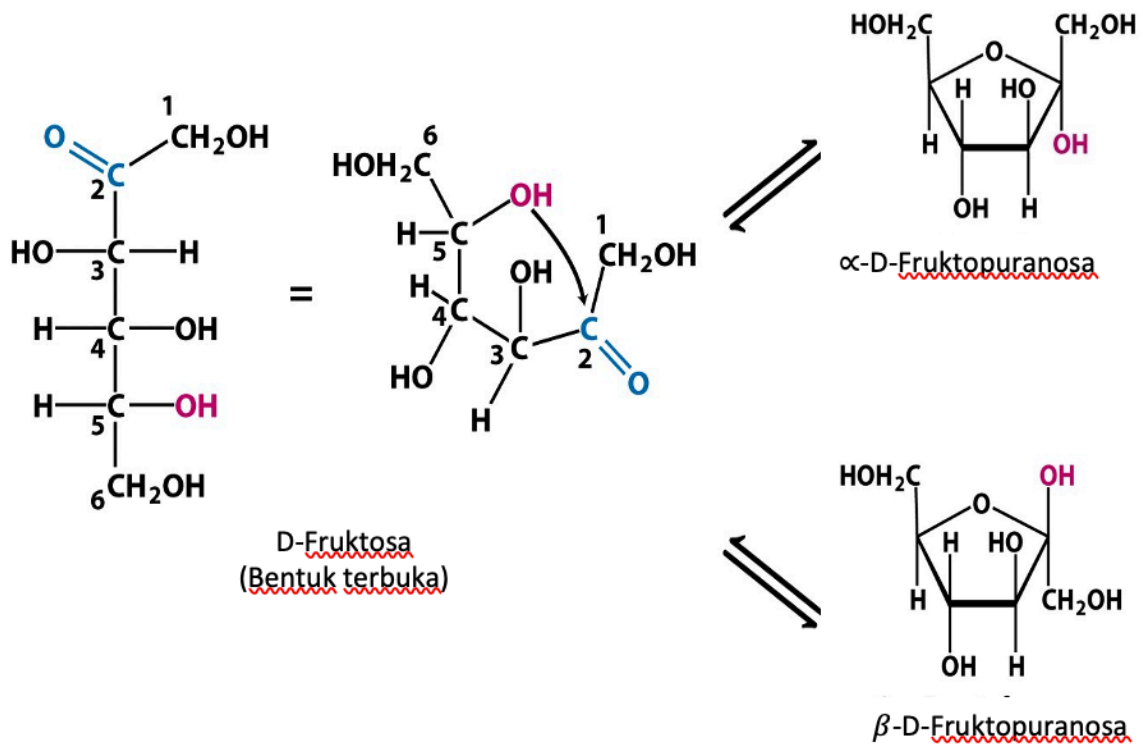
C. Anomer

Siklisasi monosakarida menciptakan pusat asimetrik baru pada karbon 1. Konfigurasi disekitar karbon 1 menciptakan dua stereoisomer baru, yaitu α dan β . Stereoisomer ini disebut anomer. Bentuk α dan β memutar bidang polarisasi dengan arah yang berbeda. Monosakarida dapat mengalami interkonversi antara α dan β , dengan struktur terbuka sebagai intermediet. Proses ini dikenal sebagai mutarotasi. Enzim yang mengkatalisis interkonversi ini adalah mutarotase.

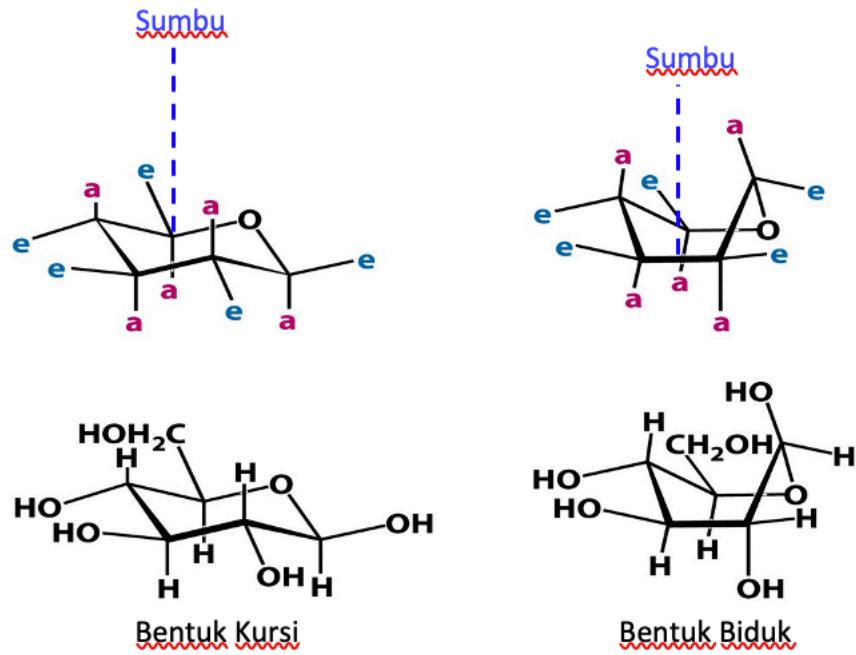
Anomer Glukopiranososa



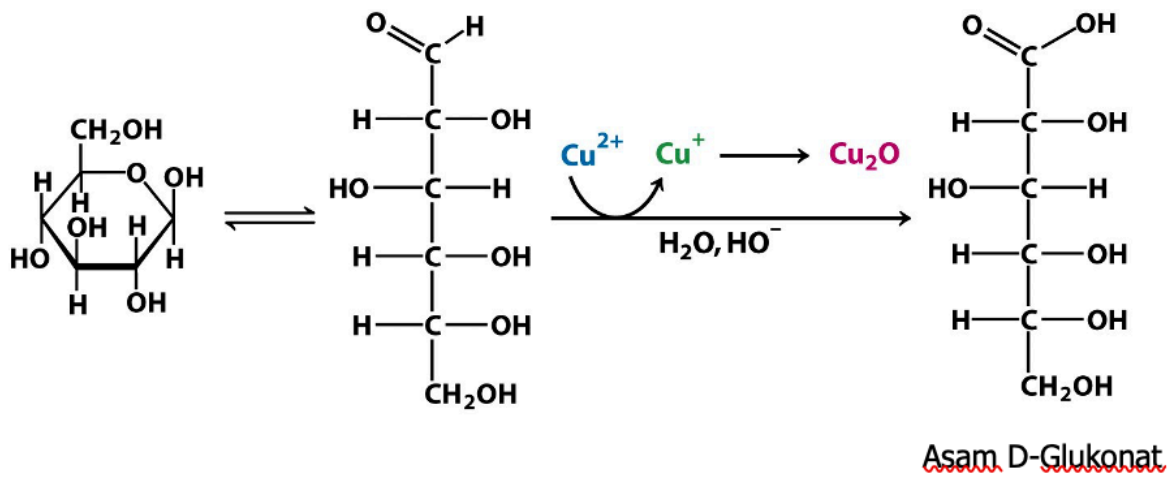
Anomer Fruktofuranosa



Konformasi cincin piranosa



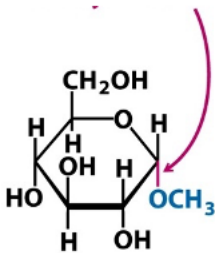
Oksidasi monosakarida



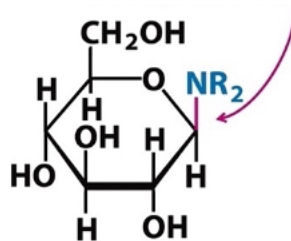
β -D-Glukopiranososa

Ikatan glikosida antara monosakarida dan molekul lain, modifikasi monosakarida dapat berlangsung melalui pembentukan ikatan glikosida. Ada dua tipe ikatan glikosida: O-Glikosida dan N-Glikosida.

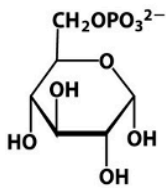
Ikatan O-Glikosidik



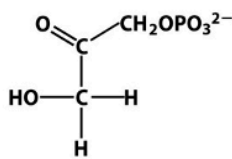
Ikatan N-Glikosidik



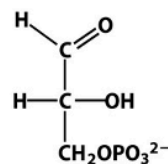
Varian monosakarida



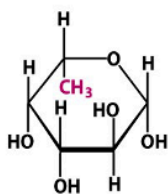
Glukosa 6-Posfat (G-6P)



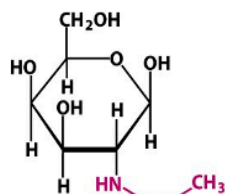
Dihidroksiaseton Posfat (DHAP)



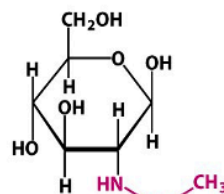
Gliseraldehida 3-Posfat (GAP)



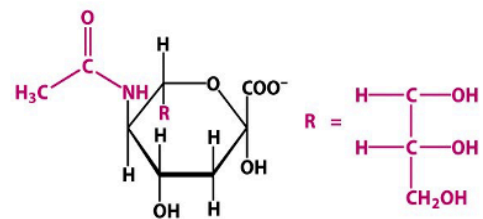
β -L-Fruktosa (Fut)



β -D-Asetilgalaktosamin (GalNAc)



β -D-Asetilgalaktosamin (GalNAc)



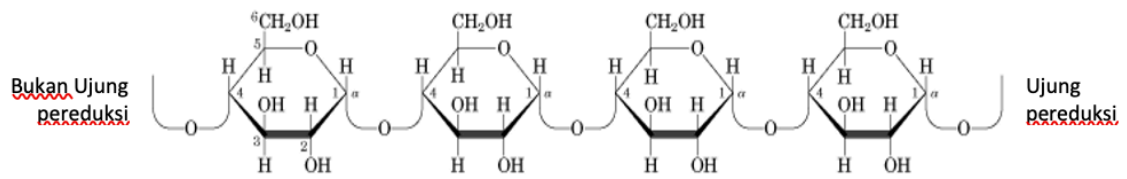
Asam Sialat (Sia) (N-Acetylneuraminat)

Tabel 34 Singkatan untuk Monosakarida Umum dan Beberapa Turunannya

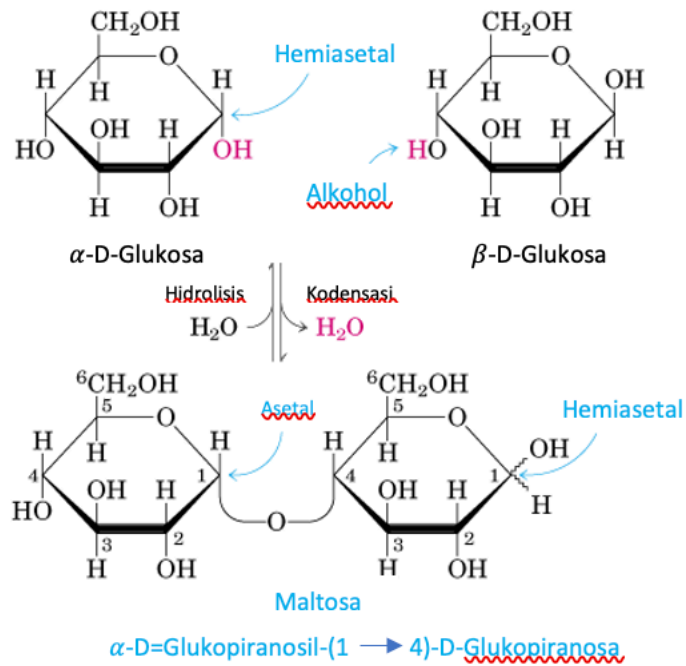
Abequosa	Abe	Asam glukuronat	GlcA
Arabinosa	Ara	Galaktosamin	GalN
Fruktosa	Fru	Glukosamin	GlcN
Fukosa	Fuc	N-asetilgalaktosamin	GalNAc
Galaktosa	Gal	N-Asetilglukosamin	GlcNAc
Glukosa	Glc	Asam Muramat	Mur
Mannosa	Man	Asam N-asetilmuramat	Mur2Ac
Ramnososa	Rha	Asam N-asetilneuraminat (asam silikat)	Neu5Ac
Ribosa	Rib		
Xilosa	Xyl		

D. Oligosakarida dan polisakarida

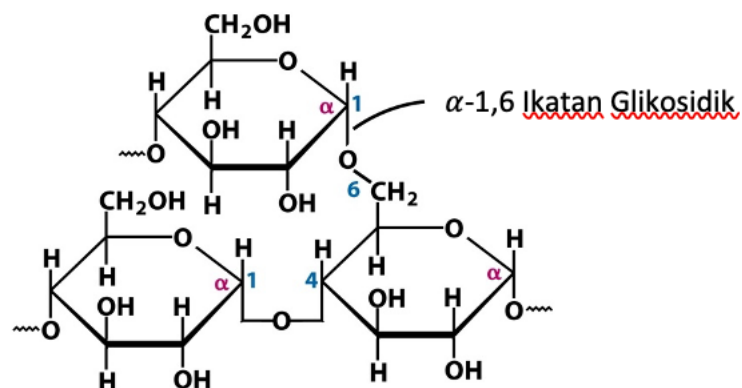
Oligosakarida terdiri dari rantai pendek unit monosakarida yang digabungkan bersama-sama oleh ikatan kovalen, diantaranya, adalah *disakarida* yang mempunyai *dua unit* monosakarida. Teristimewa adalah *sukrosa*, atau *gula tebu* yang terdiri dari gula *D-glukosa-6-karbon* dan *D-fruktosa* yang digabungkan dengan ikatan kovalen. Kebanyakan oligosakarida yang mempunyai tiga atau lebih unit tidak terdapat secara bebas, tetapi digabungkan sebagai rantai samping polipeptida pada *glikoprotein* dan *proteoglikan*. Oligosakarida adalah hasil kondensasi dari dua sampai sepuluh monosakarida. Oligosakarida dapat berupa disakarida, trisakarida. Disakarida merupakan hasil kondensasi dua unit monosakarida, contohnya adalah laktosa, maltose dan sukrosa. Tetrasakarida adalah oligosakarida yang terdiri dari empat unit monosakarida. Oligosakarida terbentuk karena adanya ikatan glikosidik antara molekul monosakarida pada atom C 1 molekul satu dengan gugus hidroksil (OH) pada molekul lainnya.



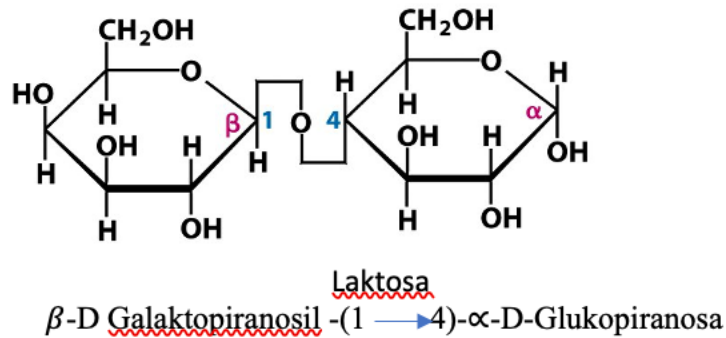
Ikatan glikosida antar monosakarida



Ikatan glikosida $\alpha(1\rightarrow4)$ dan $\alpha(1\rightarrow6)$



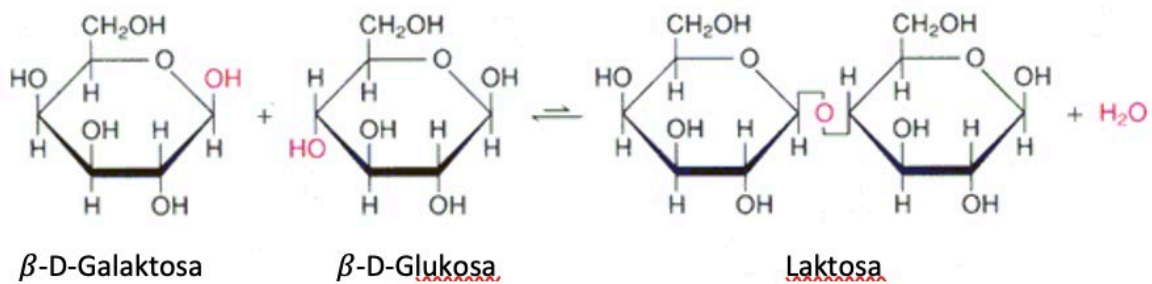
Ikatan glikosida $\beta(1\rightarrow4)$



Stabilitas ikatan glikosida

Ikatan glikosida antara dua monomer terbentuk melalui eliminasi molekul air.

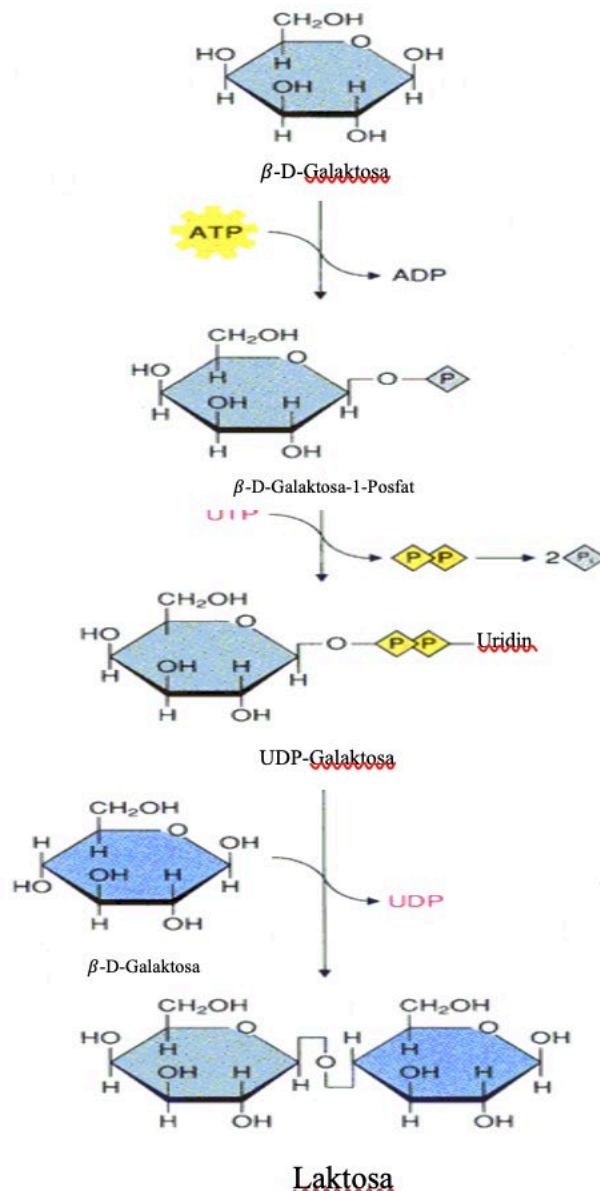
Sehingga sintesis laktosa diharapkan berlangsung sebagai berikut



Akan tetapi secara termodinamika reaksi di atas tidak disukai. Reaksi kebalikannya, yaitu hidrolisis oligosakarida merupakan reaksi yang disukai. ΔG° (hidrolisis oligosakarida) = -15 kJ/mol

Stabilitas ikatan glikosida

- Meskipun reaksi pembentukan ikatan glikosida tidak favorable, tetapi oligo (poli) sakarida bersifat metastabil sehingga dapat bertahan dalam waktu yang lama, kecuali hidrolisis dikatalisis oleh enzim atau asam.
- Sintesis oligo (poli) sakarida *in vivo* berlangsung melalui aktivasi monosakarida. Sebagai contoh pada reaksi sintesis laktosa.

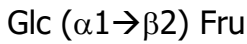


Nomenklatur Oligosakarida

Konvensi untuk mendeskripsikan struktur oligosakarida:

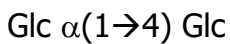
1. Urutan ditulis dimulai dari ujung non-pereduksi (ujung kiri).
2. Anomer dan enansiomer diberi awalan, misalnya α -, D-
3. Konfigurasi cincin dinyatakan dengan akhiran *p* untuk piranosa dan *f* untuk furanosa.
4. Atom-atom yang terlibat dalam pembentukan ikatan glikosida dituliskan posisinya dalam kurung, dan ditulis diantara residu yang disambung. Contoh (1 \rightarrow 4) artinya ikatan dari karbon 1 dari residu kiri pada karbon 4 residu kanan. Contoh: Sukrosa ditulis α -D-Glc_p(1 \rightarrow 2)- β -D-Fru_f

Nomenklatur di atas seringkali disingkat lebih lanjut dengan menghilangkan D/L, kecuali untuk kasus dimana enansiomer L ada. Juga akhiran *p/f* diabaikan bila monomer memiliki struktur bentuk cincin biasa. Dengan demikian sukrosa dapat ditulis menjadi



Bila dua residu gula yang berikatan merupakan dua residu anomer, konvensi di atas dapat lebih disingkat lagi.

Contoh: Maltosa = $\alpha\text{-D-Glc}_p(1 \rightarrow 4)\text{-}\beta\text{-D-Glc}_p$ disingkat menjadi



Tabel 35 Peran Fisiologi Disakarida

Disakarida	Struktur	Sumber Alami	Peran Fisiologi
Sukrosa	$\text{Glc}\alpha(1 \rightarrow 2) \text{ Fru}\beta$	Buah-buahan, biji-bijian, akar, madu	Produk akhir fotosintesis; Digunakan sebagai sumber energi utama dalam banyak organisme.
Laktosa	$\text{Gal}\beta(1 \rightarrow 4) \text{ Glc}$	Susu, beberapa sumber dari tanaman	Sumber energi hewan utama
α,α -Trehalosa	$\text{Glc}\alpha(1 \rightarrow 1) \text{ Glc}\alpha$	Ragi, jamur lainnya	Peredaran gula pada serangga; Digunakan untuk energi
Maltosa	$\text{Glc}\alpha(1 \rightarrow 4) \text{ Glc}$	Tumbuhan (pati) dan hewan (glikogen)	Dimer berasal dari polimer pati dan glikogen
Selobiosa	$\text{Glc}\beta(1 \rightarrow 4) \text{ Glc}$	Tumbuhan (selulosa)	Dimer polimer selulosa
Gentiobiosa	$\text{Glc}\beta(1 \rightarrow 6) \text{ Glc}$	Beberapa tanaman (misalnya, gentiana)	Membentuk glikosida tanaman dan beberapa polisakarida

Peran dan karakteristik struktur Polisakarida

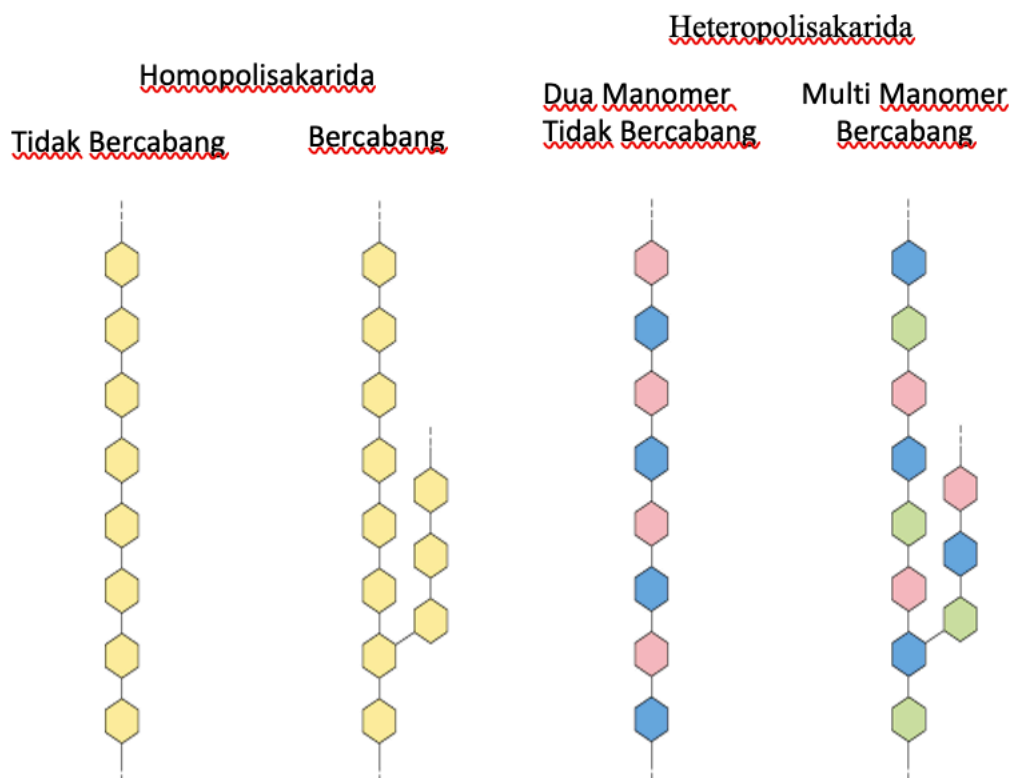
Peran polisakarida:

- Sebagai cadangan gula pada tanaman (tepung) dan hewan (glikogen).
- Sebagai material struktur, contoh: selulosa dan kitin.
- Sebagai signal pengenalan spesifik.

Karakteristik struktur polisakarida:

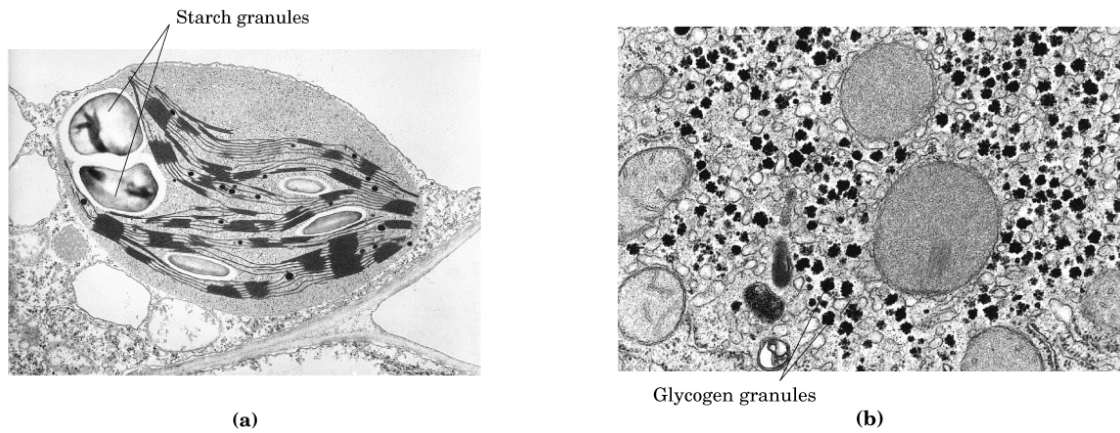
- Berbeda dengan protein, pertumbuhan ukuran polisakarida tidak dapat ditentukan.
- Hanya polisakarida yang berperan sebagai signal pengenalan spesifik yang memiliki urutan dan panjang spesifik.

Struktur polisakarida



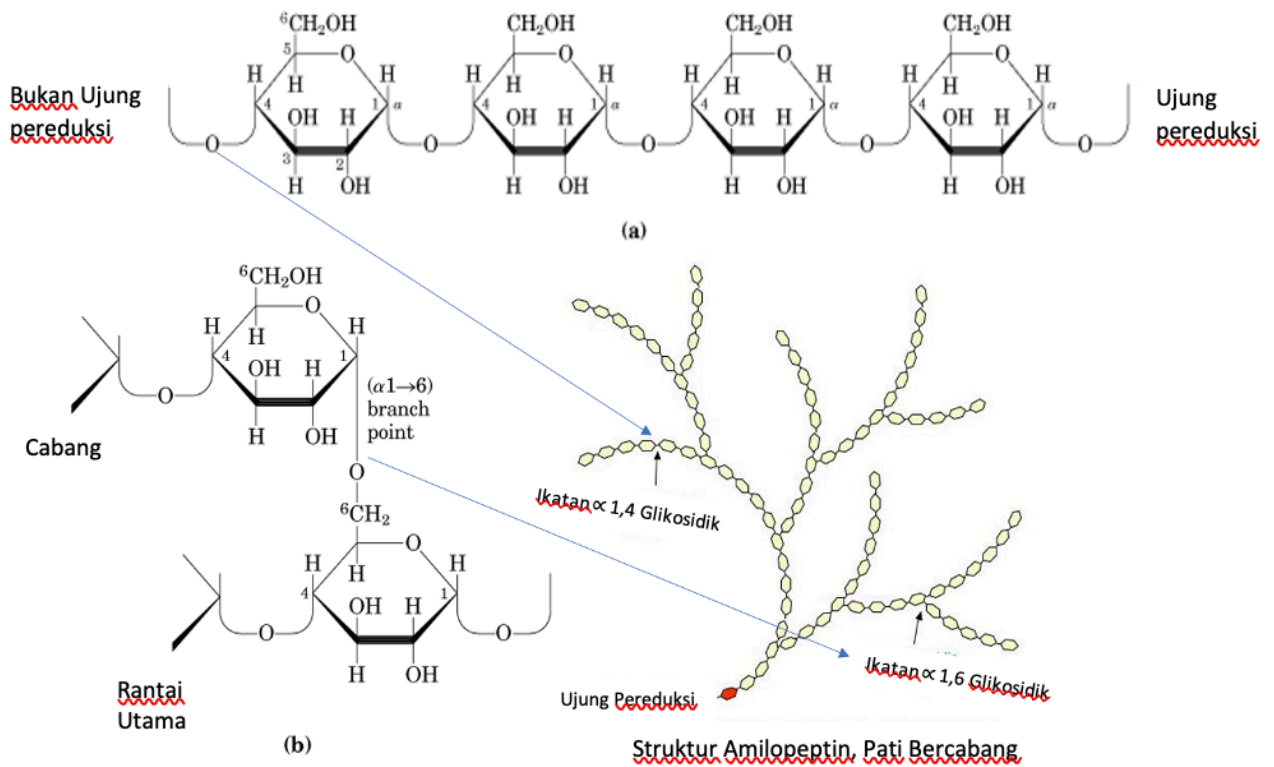
Gambar 176 Homopolisakarida dan Heteropolisakarida

Penyimpanan polisakarida pada tanaman adalah amilosa dan amilopeptin, sedangkan pada hewan berupa glikogen. Baik pada tanaman dan hewan polisakarida disimpan dalam bentuk granula.



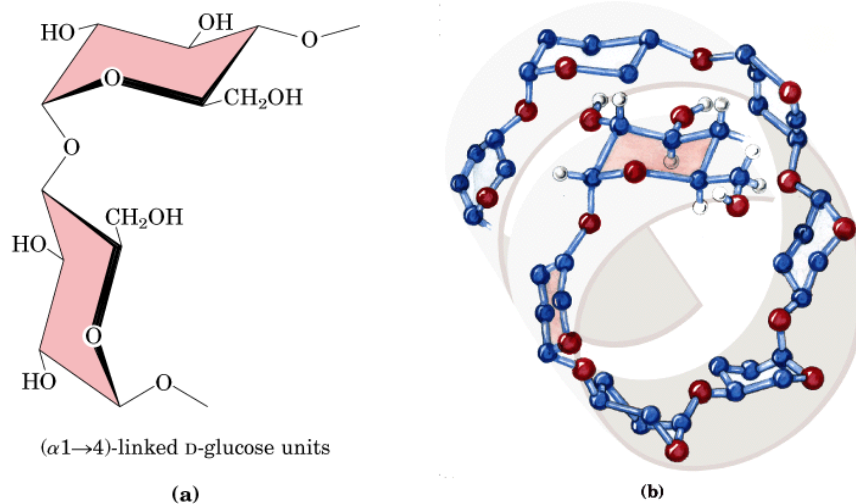
Gambar 177 Granula

Polimer glukosa



Glikogen

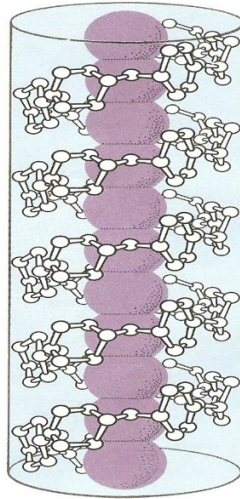
Struktur glikogen mirip dengan amilopektin, tetapi glikogen memiliki cabang lebih banyak (setiap 8-12 residu) dan lebih kompak. Glikogen banyak terdapat di liver (7% berat liver) dan otot. Mengapa glukosa tidak disimpan dalam bentuk monomer? Struktur 3-D amilosa



Gambar 178 Satu putaran heliks memerlukan 6 residu

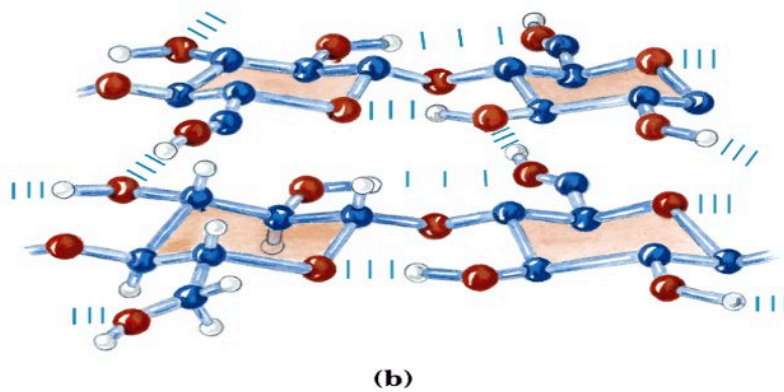
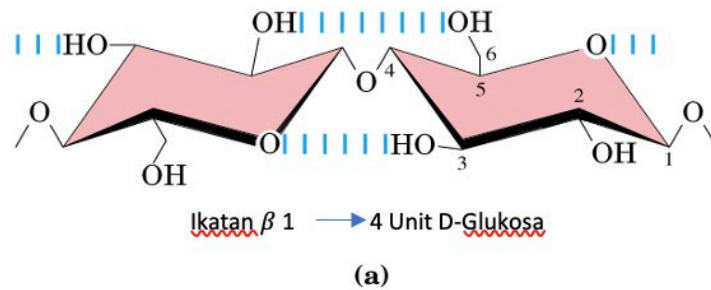
Stabilitas struktur heliks amilosa

Struktur helis amilosa tidak begitu stabil, sehingga amilosa lebih banyak ditemukan dalam keadaan random coil. Iod dapat menstabilkan struktur heliks amilosa. Atom-atom iod dapat menstabilkan rongga nonpolar dari struktur helix. Kompleks iod dan amilosa berwarna biru sehingga sering digunakan dalam tes kualitatif untuk tepung. Struktur cabang dari amilopektin dan glikogen menyulitkan pembentukan heliks.



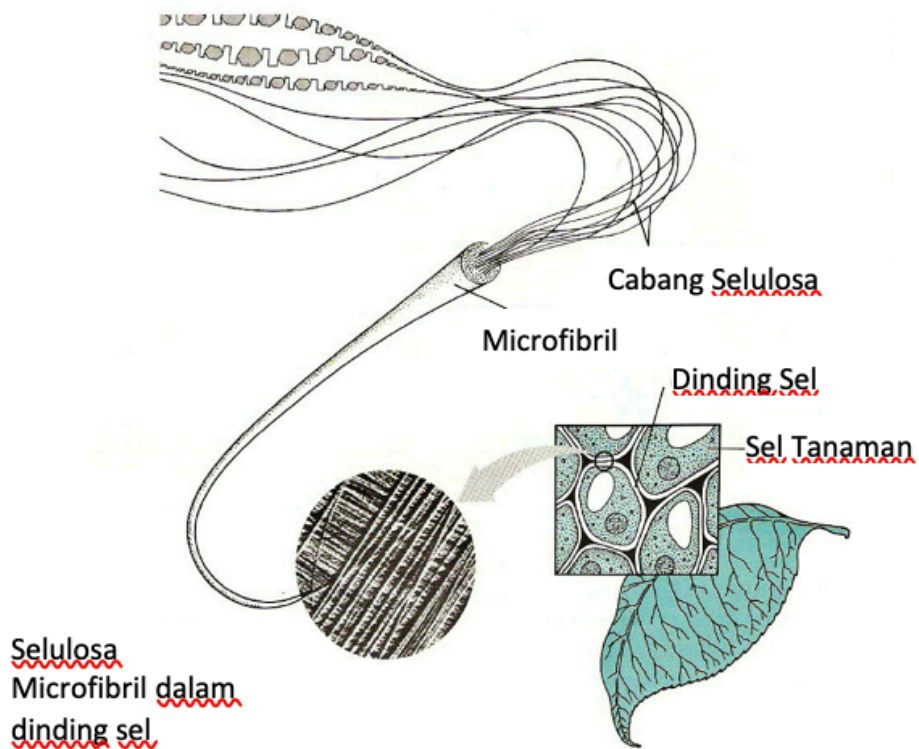
Gambar 179 Efek ikatan $\beta(1\rightarrow4)$ pada selulosa

Antar monomer glukosa dapat membentuk jaringan ikatan hidrogen. Jaringan ikatan hidrogen ini menyebabkan selulosa memiliki kekuatan mekanis yang tinggi. Enzim yang digunakan untuk mencerna amilosa tidak dapat digunakan untuk selulosa.



Gambar 180 Ikatan glikosidik

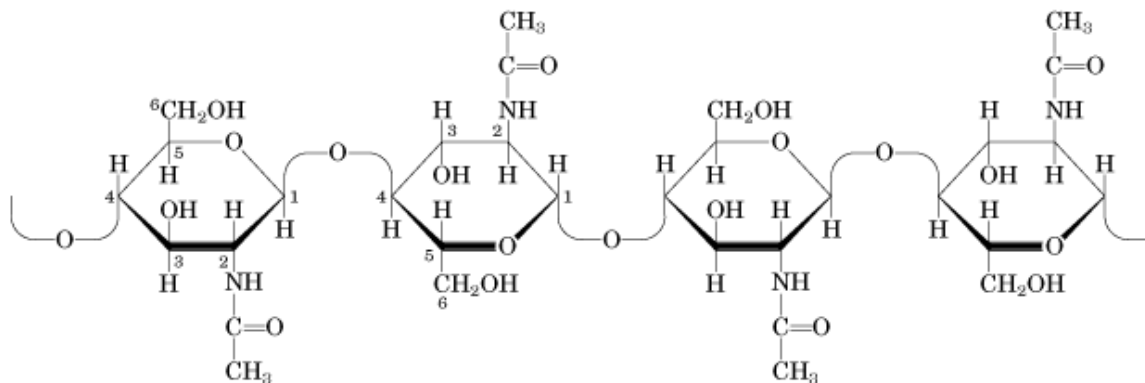
Organisasi dinding sel tanaman



Gambar 181 Sel Tanaman

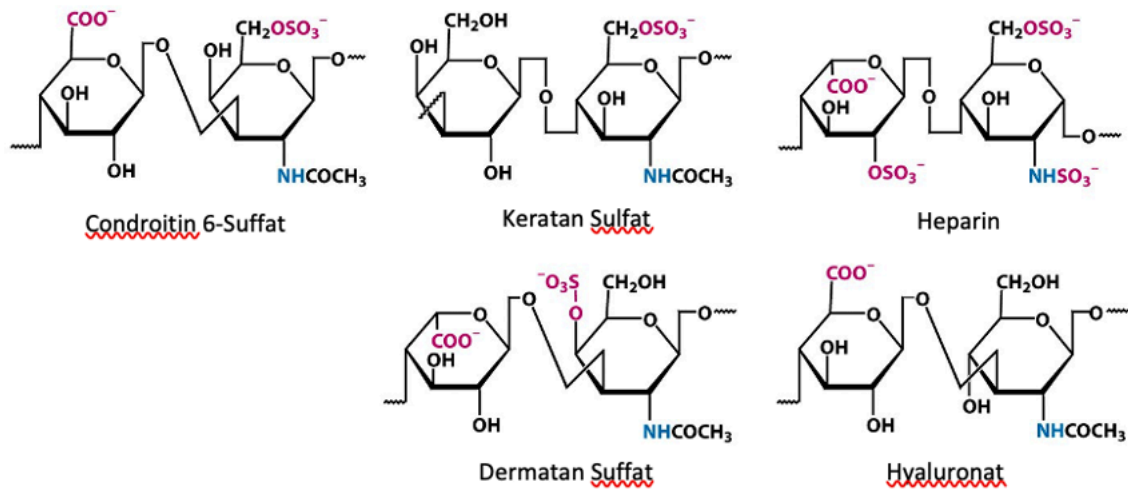
Kitin

Kitin adalah homopolisakarida linier yang terdiri dari residu *N*-asetilglukosamin yang terhubung dengan ikatan $\beta(1\rightarrow4)$. Kitin merupakan komponen utama dari kerangka luar antropoda, seperti serangga, lobster, dan kepiting. Kitin merupakan polisakarida terbanyak kedua setelah selulosa.



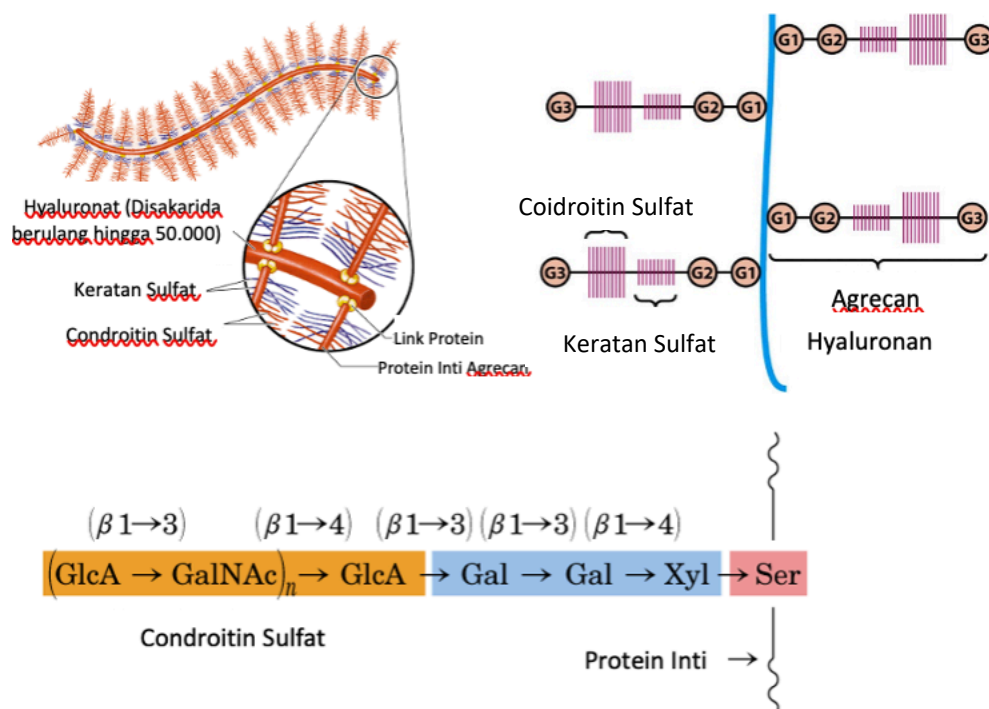
Glikosaminoglikan

Glikosaminoglikan adalah salah satu kelompok polisakarida yang berperan sebagai material struktural dalam vertebrata. Glukosaminoglikan merupakan polimer dari unit disakarida dimana salah satu residunya selalu *N*-asetilgalaktosamin atau *N*-asetilglukosamin. Contoh unit disakarida glikosaminoglikan:



Fungsi glikosaminoglikan

Fungsi utama glikosaminoglikan adalah untuk pembentukan matriks yang berperan dalam menahan komponen protein dari kulit dan jaringan.

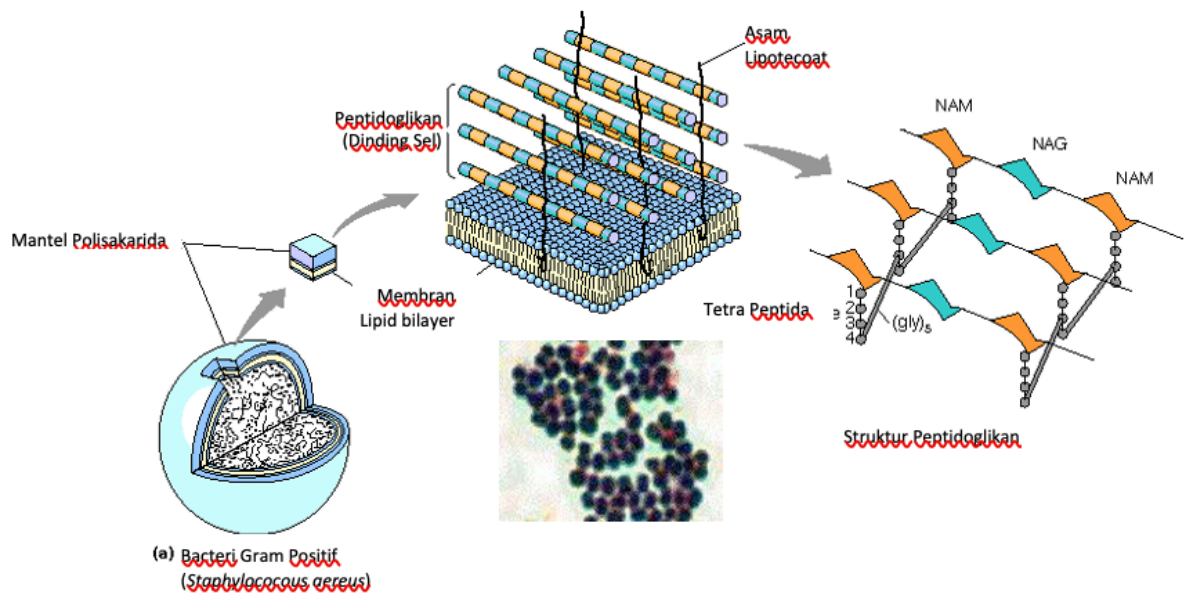


Gambar 182 glikosaminoglikan

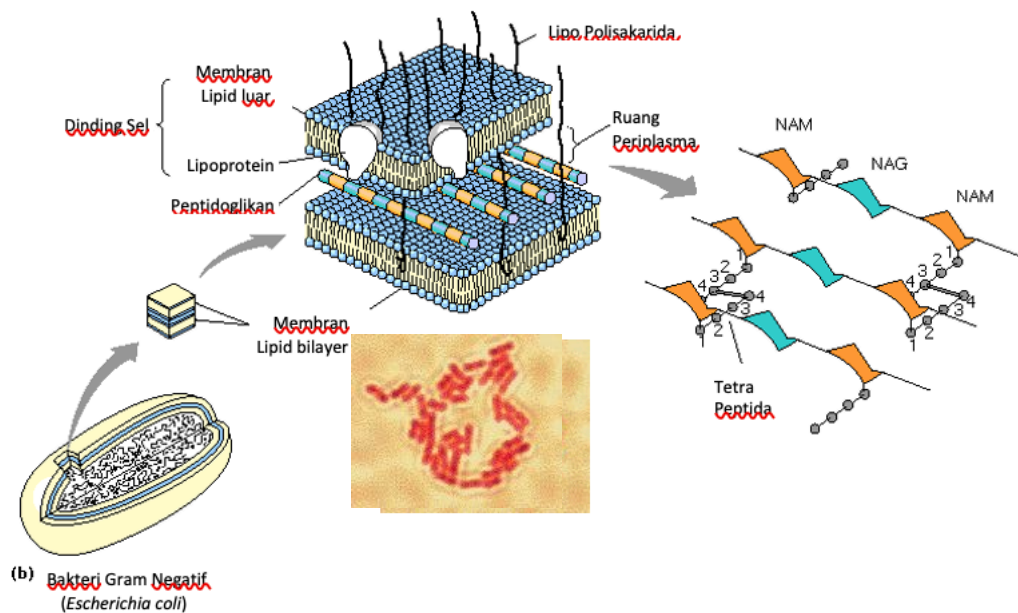
Dinding sel bakteri

Berdasarkan struktur dinding sel, bakteri dibagi ke dalam dua kelas utama:

1. Bakteri Gram-positif: Bakteri yang memiliki peptidoglikan berlapis pada permukaan luar dari membran lipid sel. Pada bakteri tipe ini zat warna Gram dapat terikat kuat pada peptidoglikan.
2. Bakteri Gram-negatif: Bakteri yang hanya memiliki satu lapis peptidoglikan yang diapit oleh membran lipid luar dan dalam. Pada bakteri tipe ini zat warna Gram mudah dicuci.



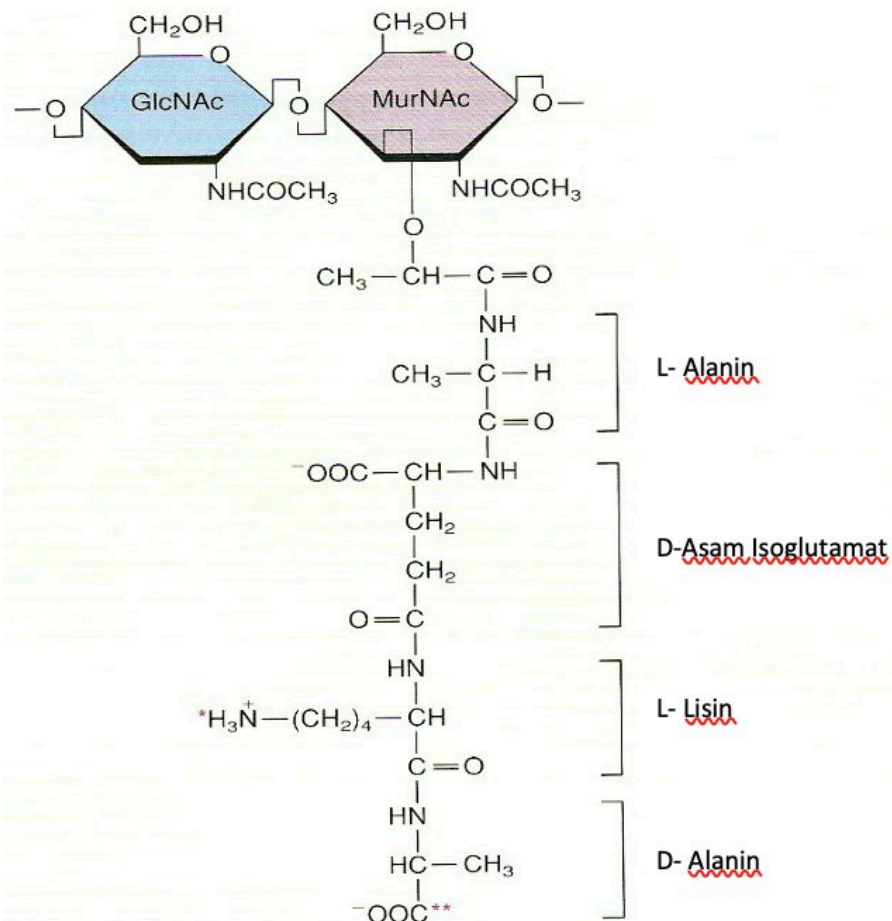
Gambar 183 Dinding sel bakteri gram positif

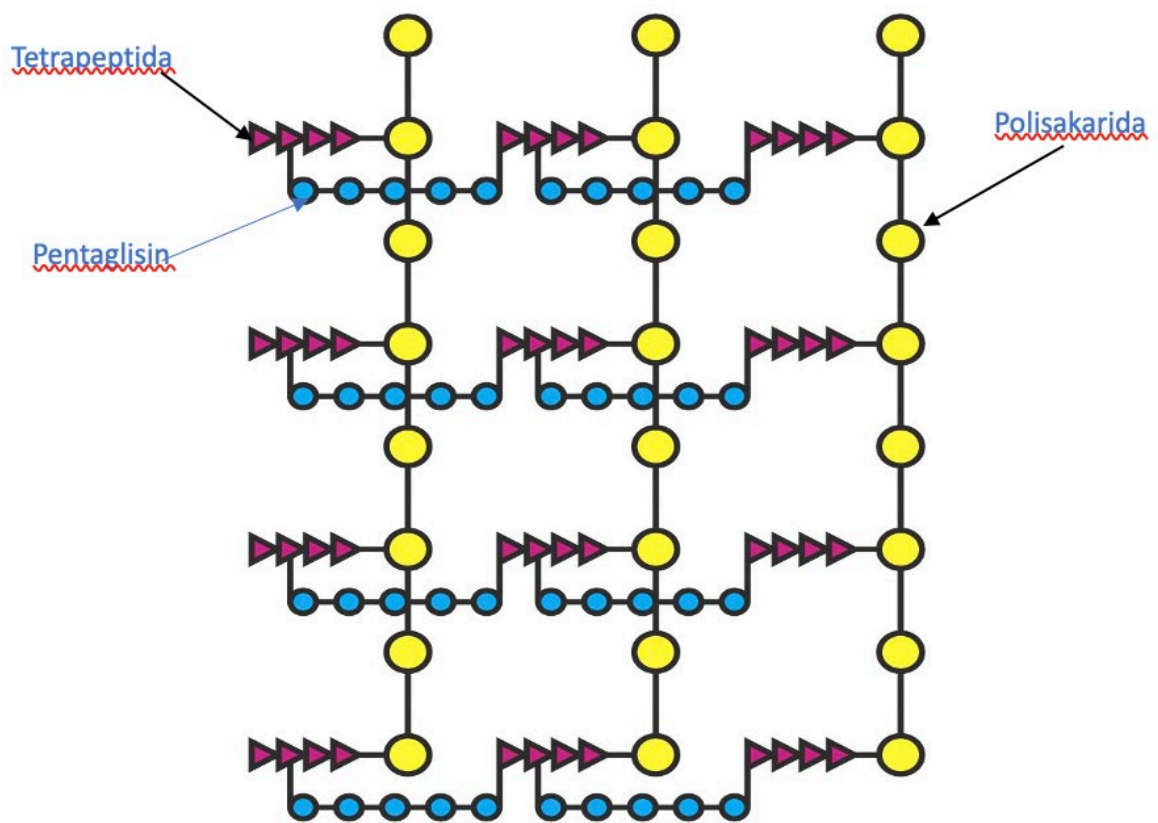


Gambar 184 Dinding sel bakteri Gram negatif

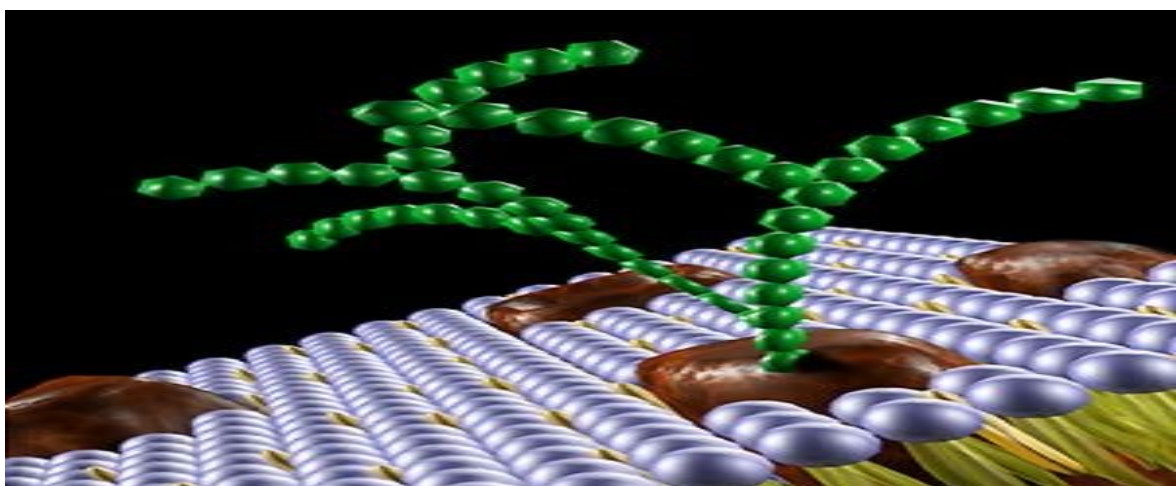
Struktur peptidoglikan

Struktur kimia dari peptidoglikan bakteri Gram positif terdiri dari rantai polisakarida yang panjang (perulangan dari kopolimer *N*-asetilglukosamin dan asam *N*-asetilmuramat) yang dihubungkan satu sama lain melalui peptida pendek. Komponen peptida memiliki urutan yang unik dan terikat pada gugus laktat dari asam *N*-asetilmuramat. Peptida ini terdiri dari empat residu dengan urutan: (L-Ala)-(D-Glu)-(L-Lys)-(D-Ala). Gugus amino dari L-Lys terikat pada pentapeptida Glisin, dimana ujung lain dari pentapeptida ini juga terikat pada residu D-Ala dari rantai tetrapeptida yang berdekatan.





Gambar 185 Struktur peptidoglikan



Gambar 186 Glikoprotein

Tabel 36 Glikoprotein

Glikoprotein	Oligosakarida ^a dan Tempat Perlekatan (berwarna merah)	Jumlah Rantai dalam Protein	Fungsi protein
Protein antibeku ikan	Gal-GalNAc- Thr	Dari 4 hingga 50 dalam protein berbeda	Penurunan titik beku cairan tubuh
Mucin submaxillary domba	Sia-GalNAc- Ser (atau Thr)	Banyak	Pelumasan
Ribonuklease B	(Man) ₆ -GlcNAc- GlcNAc- Asn	1	Enzim
Hen Ovalbumin	Man –Man Man- GlcNAc- GlcNAc- Asn Man-Man Man (hanya satu dari banyak variasi)	1	Penyimpanan protein dalam telur putih
Imunoglobulin G manusia	Fuc Sia-Gal-GlcNAc-Man Man-GlcNAc- GlcNAc- Asn Sia-Gal-GlcNAc-Man (banyak varian lain dalam antibodi)	2 atau lebih	Molekul antibodi

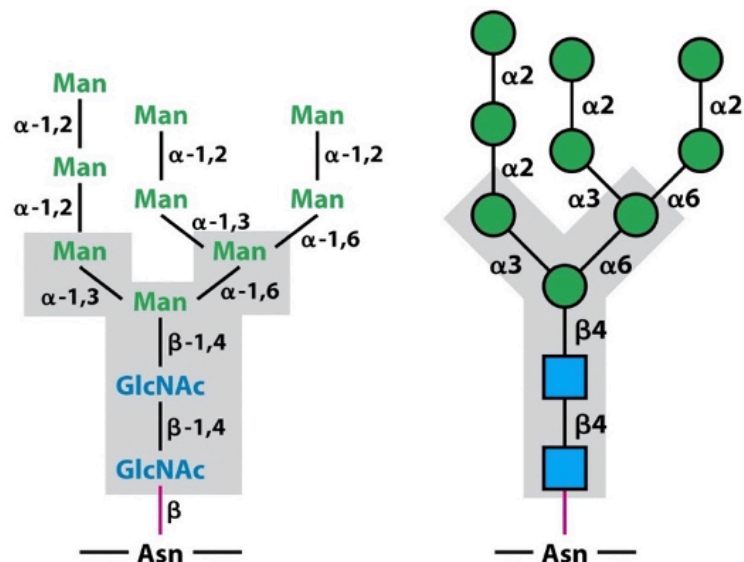
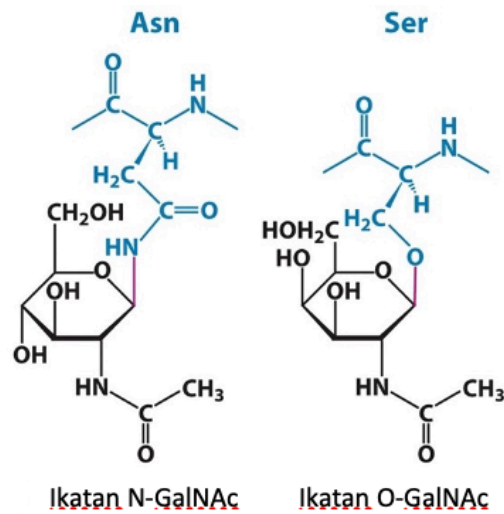
Klasifikasi glikoprotein

Rantai sakarida (glikan) terikat pada protein dengan dua cara:

O-linked glikan: glikan terikat pada protein melalui ikatan glikosida antara *N*-asetilgalaktosamin dan gugus hidroksil dari Thr atau Ser.

N-linked glikan: glikan terikat pada protein melalui ikatan glikosida antara *N*-asetilglukosamin dengan gugus amida dari residu Asn.

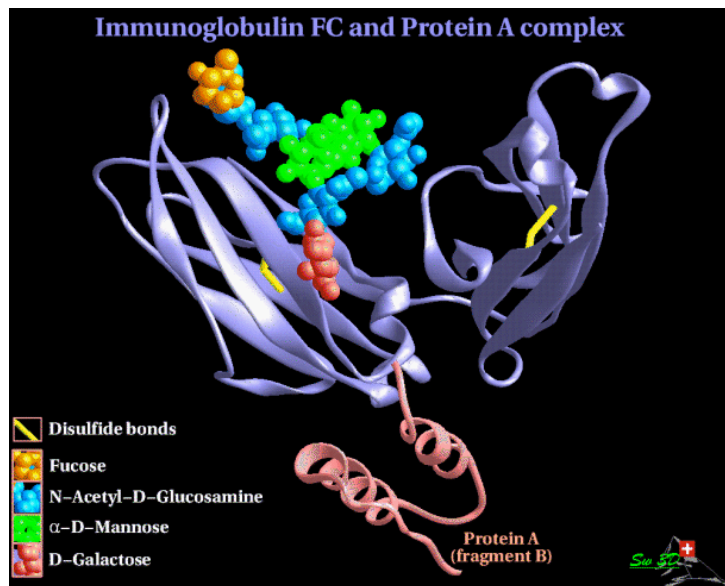
Tipe ikatan proteoglikan



Struktur oligosakarida pada human immunoglobulin

Immunoglobulin (Ig) selalu memiliki komponen oligosakarida yang terikat pada domain tertentu. Berbagai tipe protein Ig dapat dibedakan dari komponen oligosakarida yang terikat.

Kompleks protein IgG dengan oligosakarida

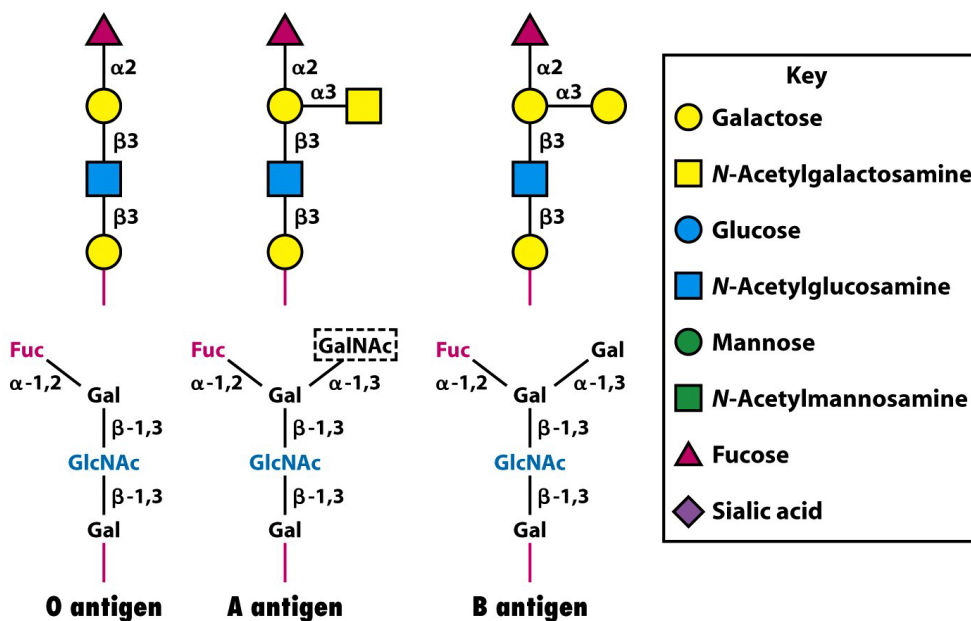


Gambar 187 Kompleks protein IgG dengan oligosakarida

O-linked Glycans

Salah satu fungsi penting dari O-linked glycoprotein adalah sebagai antigen golongan darah. Komponen oligosakarida yang menentukan tipe golongan darah manusia. Ada lebih dari 100 tipe antigen, tetapi yang umum dikenal adalah tipe A, B, AB, dan O.

Oligosakarida pada sistem ABO

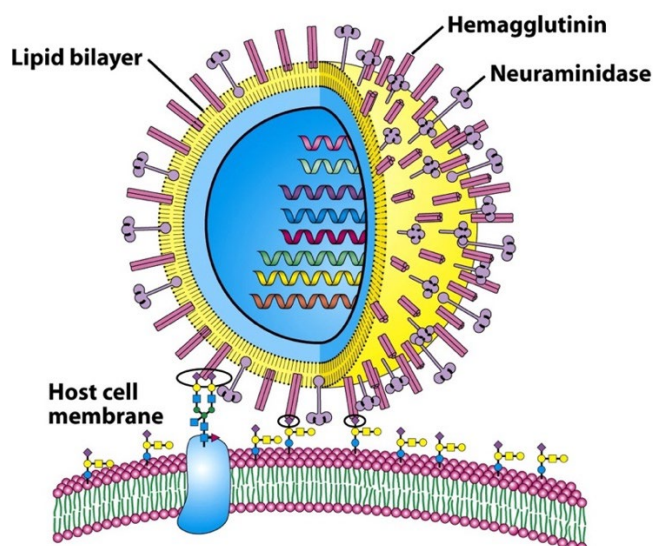


Tabel 37 Hubungan transfusi antar golongan darah

Orang Memiliki Golongan darah:	Membuat Antibodi terhadap	Dapat Menerima Dengan Aman Darah dari:	Dapat Berdonasi dengan Aman Darah ke:
O	A,B	O	O,A,B,AB
A	B	O,A	A,AB
B	A	O,B	B,AB
AB	Tidak ada	O,A,B,AB ^a	AB

Pada dasarnya, hubungan ini adalah benar. Namun, ABs tidak pernah diberikan sumbangan dari jenis yang lain, karena antibodi donor bisa bereaksi dengan antigen penerima.

Oligosakarida sebagai penanda sel



Gambar 188 Oligosakarida sebagai penanda sel

G. Reaksi Karbohidrat

Uji kualitatif karbohidrat yang mendasarkan pada pembentukan warna dapat dilakukan dengan cara:

a. Reaksi Molish

Uji ini berlaku umum, baik untuk aldosa maupun ketosa, caranya, karbohidrat ditambah H_2SO_4 melalui dinding-dinding tabung. Asam sulfat akan menyerap air dan membentuk furfural yang selanjutnya dikopling dengan

anaphthol membentuk senyawa gabungan berwarna ungu. Jika yang dideteksi pentose akan terbentuk furfural, sementara itu jika aldosa yang dideteksi akan terbentuk hidroksimetilfurfural.

b. Reaksi Selliwanof

Uji ini positif terhadap ketosa, misal fruktosa, akan tetapi negative terhadap aldosa. Pereaksi dibuat dengan mencampurkan resorsinol dengan HCl pekat kemudian diencerkan dengan akuades. Reaksi dilakukan dengan menambahkan larutan sampel ke dalam pereaksi lalu dipanaskan dalam air mendidih. Adanya warna merah menunjukkan adanya ketosa.

c. Reaksi Benedict

Uji ini positif untuk gula pereduksi atau gula inversi seperti glukosa dan fruktosa. Caranya gula reduksi ditambahkan dengan campuran CuSO_4 (tembaga sulfat), natrium sitrat (NaSO_3) dan natrium karbonat (NaCO_3) lalu dipanaskan maka akan terbentuk endapan kupro oksida (Cu_2O) yang berwarna merah coklat. Uji ini terjadi dalam suasana basa atau alkalis karena gula akan mereduksi dalam suasana basa. Natrium sitrat berfungsi sebagai pengkelat Cu dengan membentuk kompleks Cu- sitrat. Natrium karbonat berfungsi untuk menciptakan suasana basa. Berikut ini bentuk reaksi yang terjadi pada uji benedict.

d. Reaksi fehling

Uji ini hampir sama dengan uji benedict yang bertumpu pada adanya gula pereduksi pada karbohidrat. Cara ujinya: gula reduksi ditambah campuran larutan CuSO_4 dalam suasana alkalis (dengan ditambah NaOH) dan ditambah dengan Chelating agent, lalu dipanaskan maka akan terbentuk endapan kupro oksida.

e. Reaksi iodium

Polisakarida dengan penambahan iodium akan membentuk kompleks adsorpsi berwarna yang spesifik. Amilum atau pati yang dengan iodium menghasilkan warna biru, dekstrin menghasilkan warna merah anggur, sedangkan glikogen dan sebagian pati yang terhidrolisis akan membentuk warna merah.

Sedangkan uji kuantitatif dapat dilakukan dengan beberapa metode diantaranya

- a. Metode luff school, metode ini dapat digunakan untuk menentukan kandungan glukosa dalam bahan yang akan diuji berdasarkan pada reaksi titrasi iodometri.

- b. Metode dinitrosalisilat (DNS), metode ini dapat digunakan untuk mengukur gula pereduksi dengan teknik kolorimetri. Teknik ini hanya bisa mendeteksi satu gula pereduksi, misalnya glukosa. Gugus aldehida yang dimiliki oleh glukosa akan dioksidasi oleh asam 3,5 dinitrosalisilat menjadi gugus karboksil.
- c. Metode asam fenol sulfat, metode ini disebut juga dengan metode TS (total sugar) yang digunakan untuk mengukur total gula. Metode ini dapat mengukur dua molekul gula pereduksi. Metode Anthrone sulfat adalah metode yang paling umum digunakan dalam analisis karbohidrat dengan menggunakan instrumen spektrofotometer UV-Visible.
- d. Metode anthrone, metode ini memiliki banyak keunggulan antara lain kesederhanaan ujinya, spektrumnya yang luas dan sensitifitasnya yang cukup baik. Mekanisme pembentukan warna anthrone dengan gula telah diteliti, karbohidrat dan turunannya mengalami pembentukan cincin dalam keberadaan asam kuat dari mineral, seperti yang ditunjukkan untuk glukosa

Materi karbihidrat dapat di lihat pada video berikut ini.



Gambar 189 Karbohidrat
Sumber: Sukaryawan & Sari 2021

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke sepuluh biokimia 1 pada pokok bahasan karbohidrat yang telah disajikan, amatilah beberapa bahan pangan yang mengandung karbohidrat disekitar daerah saudara? Mengapa manusia membutuhkan karbohidrat?

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, kemudian amatilah didareah sekeliling anda beberapa produk makanan yang bahan bakunya dari karbohidrat. Bagaimana proses pengolahan pangan tersebut? kerjakanlah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan.

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang pengolahan karbohidrat menjadi produk makanan. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang pengolahan karbohidrat menjadi produk makanan. Buatlah analisa hasil yang menunjukkan kandungan karbohidrat pada produk makanan yang dibuat. Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

4. APLIKASI

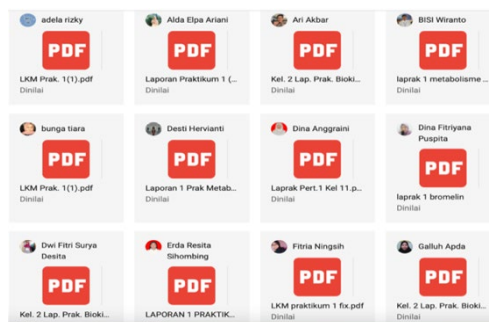
Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang pengolahan karbohidrat menjadi produk makanan. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di apload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal berikut ini.

- a. Bahaslah bersama kelompok saudara bagaimana kandungan karbohidrat pada bahan makanan yang saudara buat? Perkuatlah literatur saudara yang berasal dari berbagai jurnal yang berhubungan.
- b. Bahaslah Bersama kelompok saudara jenis karbohidrat yang dikandung pada masing-masing bahan pangan tersebut. Berdasarkan jumlah unit gula penyusunnya, golongkanlah karbohidrat yang sudara ketahui?

- c. Tulislah struktur senyawa golongan karbohidrat pada bahan pangan tersebut?

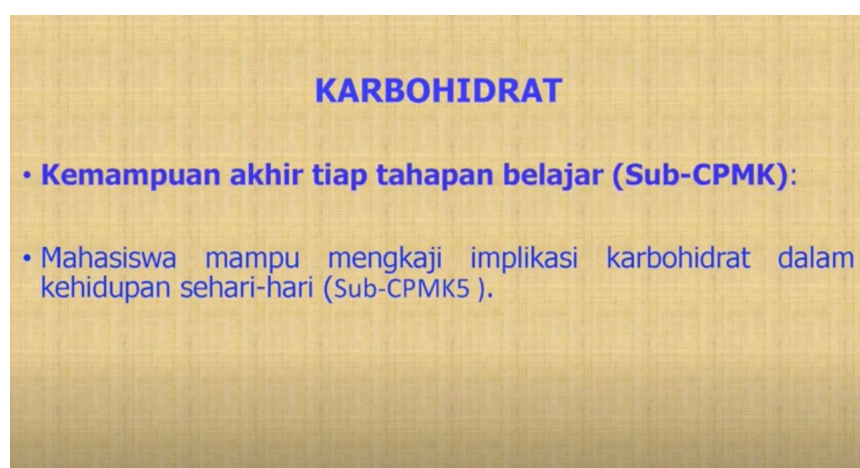
5. REFLEKSI

Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 10 Karbohidrat". Selanjutnya laporan tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id>. Laporan 10 karbohidrat minimal memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka. Contoh submit laporan 10 Karbohidrat



Gambar 190 Submit Laporan 10 Karbohidrat

Materi perkuliahan pokok bahasan pondasi biokimia dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.



Gambar 191 Paparan Karbohidrat

Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di disubmit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

1. Karbohidrat adalah polihidroksi aldehida atau keton atau senyawa yang menghasilkan senyawa-senyawa ini bila dihidrolisa. Tuliskan struktur Fisher dan Haworth Senyawa Berikut:
 - a. Glukosa
 - b. Fruktosa
 - c. Galaktosa
 - d. Manosa
2. Oligosakarida terdiri dari rantai pendek unit monosakarida yang digabungkan bersama-sama oleh ikatan kovalen. Diantaranya, adalah *disakarida* yang mempunyai *dua unit* monosakarida. Jelaskan dan tuliskan struktur sukrosa, laktosa dan galaktosa?
3. Struktur glikogen mirip dengan amilopektin. Tuliskan dan jelaskan perbedaan struktur dari kedua senyawa tersebut?
4. Menjamah Potensi Sumatera Selatan Jadi Lumbung Pangan dan Energi Dunia.



Sumber: <https://www.marketeers.com/category/industry/government-public-services/> Posted on July 30, 2020

Persoalan pangan dan energi terus menjadi sorotan dunia dalam beberapa tahun terakhir. Apalagi, di tengah kondisi krisis yang penuh dengan ketidakpastian. Di satu sisi, tantangan ini menjadi peluang bagi provinsi Sumatera Selatan (Sumsel) untuk mengisi kebutuhan pangan dan energi dunia dengan memanfaatkan Sumber Daya Alam (SDA) yang ada. Menilik potensi Sumsel sebagai lumbung energi dunia, data Badan Pusat Statistik (BPS) menunjukkan, wilayah ini menguasai 48,45% cadangan batu bara nasional. Nilai cadangan batu bara Sumsel mencapai 22,4 miliar ton. Sementara, total lahan kelapa sawit di wilayah ini mencapai 1,19 juta Ha atau menjadi yang terbesar dengan produksi CPO mencapai 3,8 juta ton. Tidak hanya itu, Sumsel juga memiliki cadangan minyak dan gas (migas) dengan jumlah minyak bumi mencapai 812,9 juta barel, dan 19,15 triliun *cubic feet* gas bumi.

Bicara soal pangan, Sumsel merupakan pusat lumbung pangan beras dengan luas lahan 539 ribu Ha, dan total produksi beras mencapai 2,6 juta ton. Potensi lain terdapat pada sektor perikanan darat dengan luas perairan darat 2,5 juta Ha dan potensi produksi ikan 439 ribu ton. "Kebutuhan pangan menjadi semakin strategis, apalagi kita merupakan negara dengan jumlah penduduk yang besar. Kita tidak bisa sekadar bergantung pada pasokan dari impor. Hal ini juga terkait erat dengan ketahanan ekonomi. Konsumsi makanan merupakan pangsa pengeluaran terbesar masyarakat," ungkap Kepala Bank Indonesia Sumatera Selatan Hari Widodo dalam gelaran Government Roundtable Series COVID-19: NEW, NEXT, POST edisi ke-14 yang digelar oleh MarkPlus Inc., secara virtual, Kamis (30/07/2020).

Berdasarkan Wacana di atas, jika setiap jiwa mengkonsumsi rata-rata 100 gram beras per hari, 20 gram ikan perhari, 1. Jika produksi di atas adalah per tahun analisislah kecukupan komoditi tersebut (1tahun = 365 hari)?. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Sumatera Selatan Jumlah penduduk Sumatera Selatan tahun 2020 diperkirakan berjumlah 8.567.923 jiwa. 2. Bagaimana proses terbentuknya karbohidrat pada beras

dan minyak sawit? 3. Senyawa apa yang terkandung pada beras, ikan dan minyak sawit?. 4. Jika kita mengkonsumsi beras, ikan, minyak bagaimana proses pencernaan makanan tersebut terjadi, enzim apa saja yang terlibat dan apa peranannya? 5. Uraikan secara rinci perubahan terjadi dari Makro molekul menjadi monomernya.

5. Invertase Mengubah Sukrosa Hidrolisis sukrosa ($[\alpha]_D^{20} = +66,5^\circ$) menghasilkan campuran D-glukosa ($[\alpha]_D^{20} = +52,5^\circ$) dan D-fruktosa ($[\alpha]_D^{20} = -92^\circ$) pada konsentrasi molar yang sama.
- (a) Kemukakanlah cara yang mudah untuk menentukan kecepatan hidrolisis sukrosa oleh suatu preparat enzim yang diekstrak dari dinding usus kecil.
 - (b) Jelaskan mengapa suatu campuran D-glukosa D-fruktosa pada konsentrasi molar yang sama yang dibentuk oleh hidrolisis sukrosa dinamakan gula invert dalam industri pangan.
 - (c) Enzim invertase dibiarkan bekerja pada larutan sukrosa, sampai rotasi optik system ini menjadi nol. Berapa bagian dari sukrosa yang telah dihidrolisa? (Sekarang, nama yang lebih disukai bagi invertase adalah sukrase).
6. Pembuatan Coklat yang berisi cairan di dalamnya merupakan aplikasi rekayasa enzim yang menarik. Cairan di dalam coklat berflavor ini terutama terdiri dari larutan gula yang kaya akan fruktosa untuk memberikan rasa manis. Masalah teknis yang ada adalah sebagai berikut: lapisan coklat harus disiapkan dengan menuang coklat cair panas menyelimuti suatu pusat padatan, akan tetapi produk akhir harus memiliki pusat cairan yang kaya akan fruktosa. Kemukakanlah suatu cara untuk memecahkan masalah ini. (*Petunjuk:* Kelarutan sukrosa jauh lebih pendek dari gabungan kelarutan glukosa dan fruktosa).
7. Anomer Laktosa, suatu disakarida yang tersusun atas galaktosa dan glukosa, terdapat dalam dua bentuk anomer, yang ditentukan sebagai α dan β . Sifat-sifat kedua anomer berbeda nyata. Sebagai contoh, anomer β rasanya lebih manis, dibandingkan dengan anomer α . Lebih jauh, anomer β lebih larut

dibandingkan dengan anomer α ; dengan demikian anomer α dapat membentuk Kristal jika es krim disimpan di dalam freezer untuk waktu yang lama; hal ini memberikan es krim tekstur berpasir.

- (a) Gambarkan rumus proyeksi Haworth dari kedua bentuk anomer laktosa.
- (b) Gambarkan rumus proyeksi Haworth semua produk yang dihasilkan jika anomer α dihidrolisa menjadi galaktosa dan glukosa. Kerjakan serupa itu untuk anomer β !
8. Anomer sukrosa ? walaupun disakarida laktosa terdapat dalam dua bentuk anomer tidak ada bentuk dari disakarida sukrosa yang telah dilaporkan. Mengapa ?
9. Kecepatan tumbuh batang bambu, suatu rumput tropis, dapat tumbuh pada kecepatan tinggi 1 ft/hari. Pada kondisi optimal. Seandainya batang ini terdiri dari hampir seluruhnya serabut selulosa yang tersusun menurut arah pertumbuhan. Hitunglah jumlah residu gula perdetik yang harus ditambahkan dengan aktivitas enzim terhadap rantai selulosa yang sedang tumbuh untuk menghasilkan kecepatan tumbuh tersebut. Tiap-tiap unit D-glukosa pada molekul selulosa kira-kira 0,45 nm panjangnya.
10. Perbandingan selulosa dan glikogen selulosa yang praktis murni yang diperoleh dari benang-benang biji tanaman spesies *Gossypium* (katun bersifat liat, berserat dan sama sekali tidak larut dalam air. Sebaliknya glikogen yang diperoleh dari otot atau hati segera terdispersi didalam air panas, membuat suatu larutan keruh. Walaupun keduanya mempunyai sifat-sifat fisik yang amat berbeda, senyawa-senyawa tersebut tersusun atas polimer D-glukosa yang berikatan 1,4 dengan berat molekul yang hampir sama. Ciri manakah dari struktur senyawa ini menyebabkan kedua polisakarida ini berbeda dalam sifat-sifatnya? Keuntungan biologi manakah yang diperoleh dari sifat-sifat fisik senyawa ini ?

DAFTAR PUSTAKA

1. Buckle, K.A, R.A Edwards, G.H. Fleet, and M. Wootton. 2007. Ilmu Pangan (Food Science). Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press).
2. Genomis Lab. 2013. *How to estimate carbohydrate by anthrone method*. <https://youtu.be/VzYDk4t97Ok>. di akses pada tanggal 3 November 2020.
3. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
4. Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
5. Methew, Holde, V., Ahern. 2000. *Biochemistry*. Sanfrancisco: Addison Wesley P.C
6. Sukaryawan, M. 2004. *Biokimia*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
7. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
8. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
9. Thenawidjaja. 1990. *Dasar-dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
10. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
11. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
12. Winarno, F.G. 2004. *Kimia Pangan dan Gizi*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta

BAB 8 LIPID DAN MEMBRAN

1. ORIENTASI

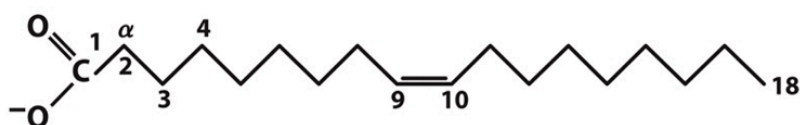
Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa mampu mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora sesuai dengan keahliannya berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam rangka menghasilkan solusi, gagasan, desain atau kritik seni (CPMK4), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah mahasiswa mampu mengkaji implikasi Lipid dan Membran dalam kehidupan sehari-hari (Sub-CPMK6). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

Lipid adalah kelompok senyawa kimia yang beragam yang ciri-ciri umumnya adalah ketidaklarutannya dalam air. Fungsi biologi lipid sangat beragam seperti sebagai sumber energi dan pembentuk membran sel. Lemak dan minyak adalah bentuk energi simpanan utama dalam banyak organisme. Fosfolipid dan sterol adalah komponen struktural utama dari membran biologi. Lipid lain memainkan peran penting sebagai kofaktor enzim, pembawa elektron, pigmen penyerap cahaya, ikatan hidrofobik untuk protein, pendamping yang membantu lipatan membran protein, agen pengemulsi dalam saluran pencernaan, hormon, dan pembawa pesan intraseluler. Penyimpanan lipid, misalnya, triasilgliserol, merupakan lemak dan minyak yang digunakan oleh sebagian besar organisme sebagai bentuk energi yang tersimpan. Senyawa ini mengandung asam lemak, yang merupakan turunan hidrokarbon yang memiliki tingkat oksidasi yang hampir sama dengan bahan bakar fosil hidrokarbon. Pembakaran (oksidasi) asam lemak sangat eksergonik.

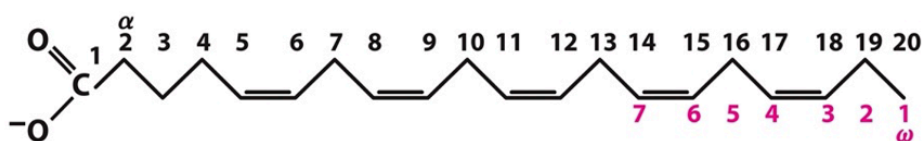
A. ASAM LEMAK

Asam lemak adalah asam karboksilat dengan rantai hidrokarbon mulai dari 4 hingga 36 karbon. Dalam beberapa asam lemak, rantai ini tidak bercabang dan jenuh (tidak mengandung ikatan rangkap). Sedangkan asam lemak lain mengandung rantai satu atau lebih ikatan rangkap (tidak jenuh). Beberapa mengandung cincin tiga

karbon, gugus hidroksil, atau cabang gugus metil. Dua konvensi penamaan asam lemak diilustrasikan pada Gambar dibawah ini. Tata nama standar (Bagian a) memberikan nomor 1 untuk karbon karboksil (C-1), dan untuk karbon di sebelahnya. Posisi setiap ikatan rangkap ditunjukkan dengan nomor superskrip yang menunjukkan karbon bernomor lebih rendah dalam ikatan rangkap. Untuk asam lemak tak jenuh ganda, sebuah konvensi alternatif memberi nomor karbon dalam arah yang berlawanan, menetapkan nomor 1 untuk karbon metil di ujung rantai yang lain (Bagian b). Karbon ini juga disebut (omega, huruf terakhir dalam alfabet Yunani). Posisi ikatan rangkap ditunjukkan relatif terhadap karbon , seperti pada asam lemak -3 dan -6.



(a) 8:1(Δ^9) Cis-9-Asam Oktadekanoat



(b) 20:5($\Delta^{5,8,11,14,17}$) Asam Eicosapentanoat (EPA) dan omega 3 asam lemak

Asam lemak yang paling umum terjadi pada hewan memiliki jumlah atom karbon genap dalam rantai tidak bercabang dari 12 hingga 24 karbon (tabel 38). Ada pola umum di lokasi ikatan rangkap. Pada sebagian besar asam lemak tak jenuh tunggal, ikatan rangkap antara C-9 dan C-10 (Δ^9), dan ikatan rangkap lain dari asam lemak tak jenuh ganda umumnya 12 dan 15. Arachidonat [20:4($\Delta^{5,8,11,14}$)] adalah pengecualian untuk generalisasi ini. Ikatan rangkap pada asam lemak tak jenuh ganda hampir tidak pernah terkonjugasi (ikatan tunggal dan rangkap berselang-seling, seperti pada $-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-$), tetapi dipisahkan oleh gugus metilen ($-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-$). Di hampir semua asam lemak tak jenuh alami pada hewan, ikatan rangkap berada dalam konfigurasi cis. Asam lemak trans disintesis secara alami melalui fermentasi dalam rumen hewan perah dan diperoleh dari produk susu dan daging.

a) Asam Lemak Jenuh

Asam lemak jenuh yang ditemukan dalam sel hewan tercantum dalam tabel 38 Asam palmitat (16:0) dan asam stearat (18:0) sangat lazim.

Tabel 38 Beberapa Asam Lemak jenuh Alami: Struktur, Sifat, dan Nomenklatur

Kerangka Karbon	Struktur	Nama sistematis	Nama umum (turunan)	Titik didih (°C)	Kelarutan pada 30°C (mg/g pelarut)	
					Air	Benzena
12:0	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	n-Asam dodekanoat	Asam Laurat (latin laurus, "tumbuhan laurel")	44.2	0,063	2,600
14:0	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOH	n-Asam tetradekanoat	Asam miristat (latin Myristica, Nutmeg genus)	53.9	0.024	874
16:0	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ COOH	n-Asam heksadekanoat	Asam palmitat (Latin palma, Poho sawit)	63.1	0.0083	348
18:0	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	n-Asam oktadekanoat	Asam stearat (Yunani stear, Lemak keras)	69.6	0.0034	124
20:0	CH ₃ (CH ₂) ₁₈ COOH	n-Asam eikosanoat	Asam arakidat (Latin Arachis, Legume genus)	76.5		
24:0	CH ₃ (CH ₂) ₂₂ COOH	n-Asam tetrakosanoat	Asam lignoserat (Latin lignum, "kayu"+ cera, "karet"	86.0		

b) Asam Lemak Tak Jenuh

Dari asam lemak tak jenuh yang ada pada tabel 39, asam linoleat [18:2(Δ9,12)] dan -linolenat [18:3(Δ9,12,15)] diperlukan dalam makanan manusia (esensial). Asam linoleat adalah prekursor asam arakidonat, yang digunakan untuk sintesis eikosanoid (misalnya, prostaglandin). Asam Linolenat adalah prekursor asam lemak -3 asam eikosapentaenoat [EPA; 20:5(Δ5,8,11,14,17)] dan asam dokosaheksaenoat [DHA; 22:6(Δ4,7,10,13,16,19)] yang merupakan asam lemak

penting yang ditemukan di membran retina. Asam lemak -3 adalah komponen penting dari diet jantung sehat.

Tabel 39 Beberapa Asam Lemak Tak Jenuh Alami: Struktur, Sifat, dan Nomenklatur

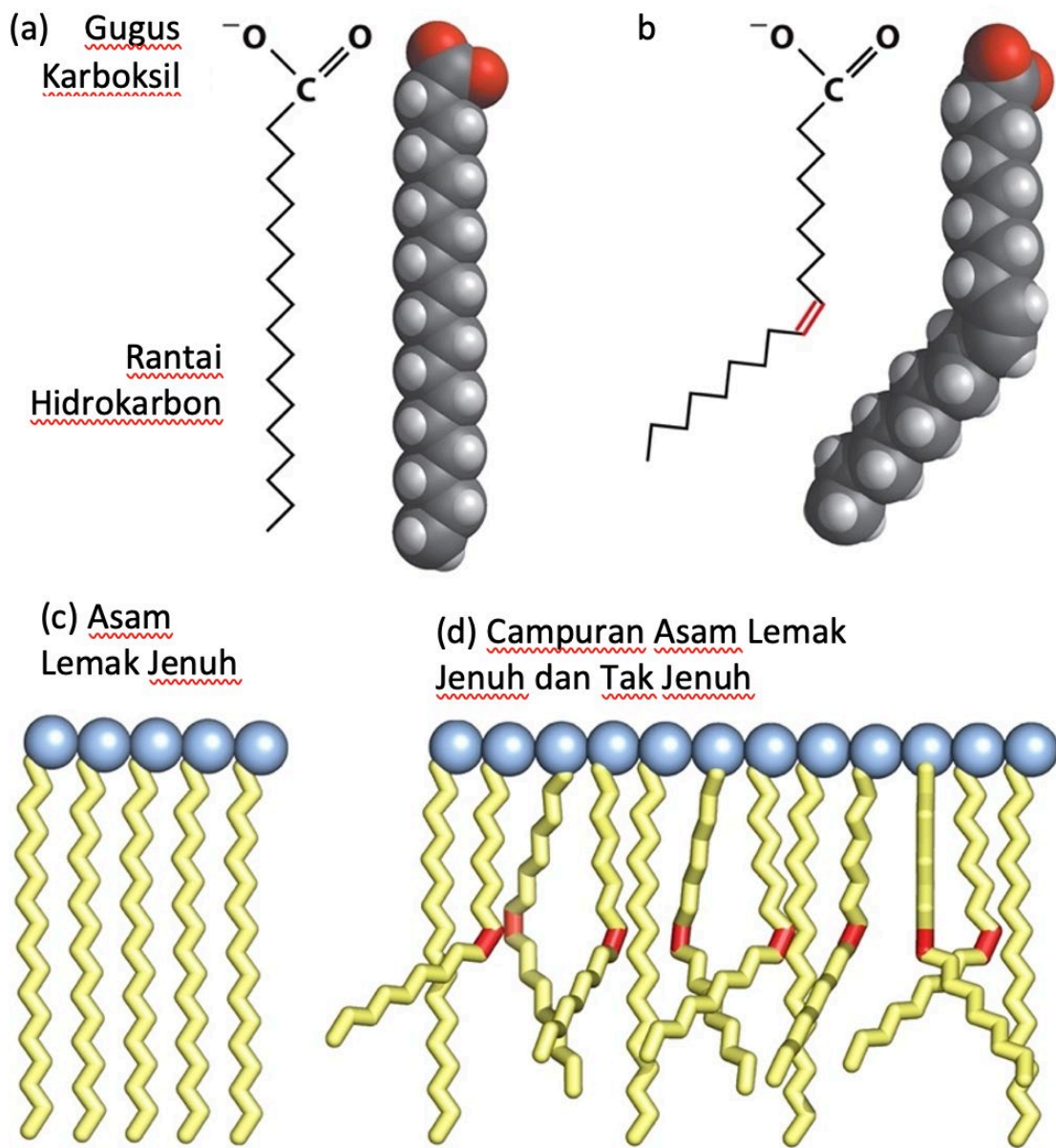
Kerangka Karbon	Struktur*	Nama sistematis	Nama umum (turunan)	Titik didih (°C)	Kelarutan pada 30°C (mg/g pelarut)	
					Air	Benzena
16:1 (Δ^9)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	cis-9-asam Heksadesenoat	Asam palmitoleat	1 hingga -0,5		
18:1(Δ^9)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	cis-9-asam Octadecenoat	Asam oleat (Latin oleum, "minyak")	13,4		
18:2($\Delta^{9,12}$)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	cis-,cis-9,12-Asam oktadekadienoat	Asam Linoleat, (Yunani linon, "Flaks")	1-5		
18:3($\Delta^{9,12,15}$)	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	cis-,cis,cis-9,12,15-Asam oktadecatrienoat	Asam alfa linoleat	-111		
20:4($\Delta^{5,8,11,14}$)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$	cis-,cis-,cis,cis-5,8,11,14- Asam ikosatetraenoat	Asam arakidonat	-49.5		

c) Sifat Fisik Asam Lemak

Sifat fisik asam lemak sangat ditentukan oleh panjang dan derajat ketidakjenuhan rantai hidrokarbonnya. Rantai hidrokarbon menyebabkan kelarutan asam lemak dalam air sangat rendah. Semakin panjang rantai asam lemak dan semakin sedikit ikatan rangkap, semakin rendah kelarutannya dalam air. Gugus asam karboksilat bersifat polar (dan terionisasi pada pH netral) dan menyumbang sedikit kelarutan asam lemak rantai pendek dalam air.

Titik leleh juga sangat dipengaruhi oleh panjang dan derajat ketidakjenuhan rantai hidrokarbon. Pada 25°C, asam lemak jenuh dari 12:0 hingga 24:0 memiliki konsistensi seperti lilin, sedangkan asam lemak tak jenuh dengan panjang ini adalah

cairan berminyak. Perbedaan titik leleh disebabkan oleh perbedaan kemampuan pengemasan rantai asam lemak, lihat gambar berikut ini.



Gambar 192 Rantai Asam Lemak
 Sumber: Nelson & Cox, 2013

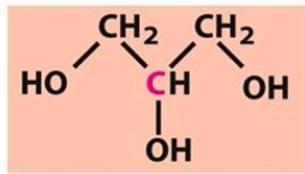
Dalam asam lemak jenuh, rotasi bebas di sekitar setiap ikatan karbon-karbon memberikan rantai hidrokarbon fleksibilitas yang besar. Konformasi yang paling stabil adalah bentuk perpanjangan penuh, di mana rintangan sterik atom tetangga diminimalkan. Molekul-molekul ini dapat membentuk bersama-sama dalam susunan hampir kristal, dengan atom-atom sepanjang panjangnya melalui interaksi van der

Waals dengan atom-atom molekul tetangga. Dalam asam lemak tak jenuh, ikatan rangkap cis memaksa terjadinya kekakuan pada rantai hidrokarbon.

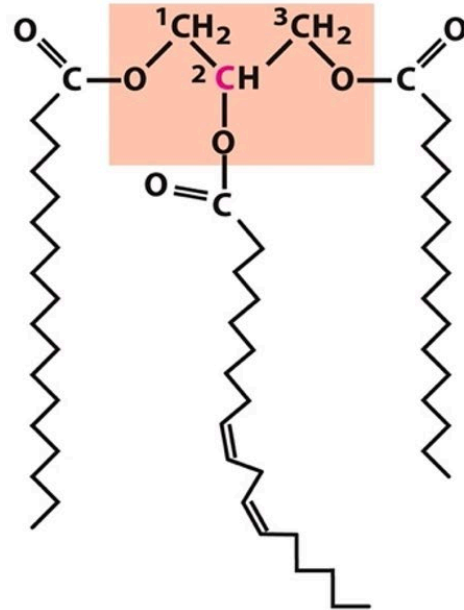
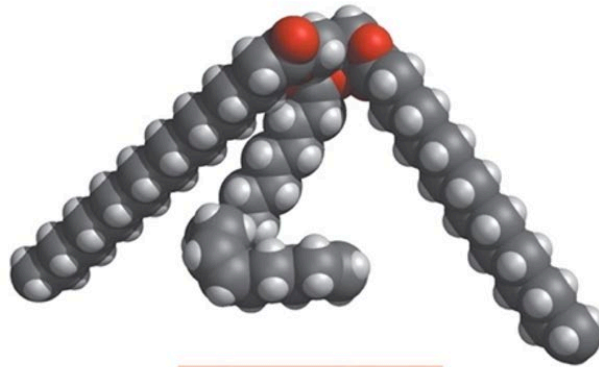
Asam lemak dengan satu atau beberapa interaksi seperti itu tidak dapat menyatu sekuat asam lemak jenuh, dan oleh karena itu interaksinya satu sama lain lebih lemah. Karena lebih sedikit energi panas yang dibutuhkan untuk mengacaukan susunan asam lemak tak jenuh yang tidak teratur ini, mereka memiliki titik leleh yang jauh lebih rendah daripada asam lemak jenuh dengan panjang rantai yang sama.

B. Struktur Triasilgliserol

Lipid paling sederhana yang dibangun dari asam lemak adalah triasilgliserol (atau, trigliserida, lemak, lemak netral). Triasilgliserol terdiri dari tiga asam lemak masing-masing dalam ikatan ester dengan satu molekul gliserol (gambar di bawah). Mereka yang mengandung jenis asam lemak yang sama di ketiga posisi disebut triasilgliserol sederhana dan dinamai berdasarkan asam lemak yang dikandungnya. Triasilgliserol sederhana 16:0, 18:0, dan 18:1(Δ 9) masing-masing disebut tripalmitin, tristearin, dan triolein. Kebanyakan triasilgliserol yang terjadi secara alami dicampur, dan mengandung dua atau lebih asam lemak yang berbeda. Untuk memberi nama senyawa ini, nama dan posisi masing-masing asam lemak harus ditentukan. Karena gugus hidroksil polar dari gliserol dan karboksilat polar dari asam lemak terikat dalam ikatan ester, triasilgliserol adalah molekul yang sangat nonpolar yang pada dasarnya tidak larut dalam air. Lipid memiliki berat jenis yang lebih rendah daripada air yang menjelaskan mengapa campuran triasilgliserol dan air memiliki dua fase di mana fase triasilgliserol mengapung di atas.



Glycerol

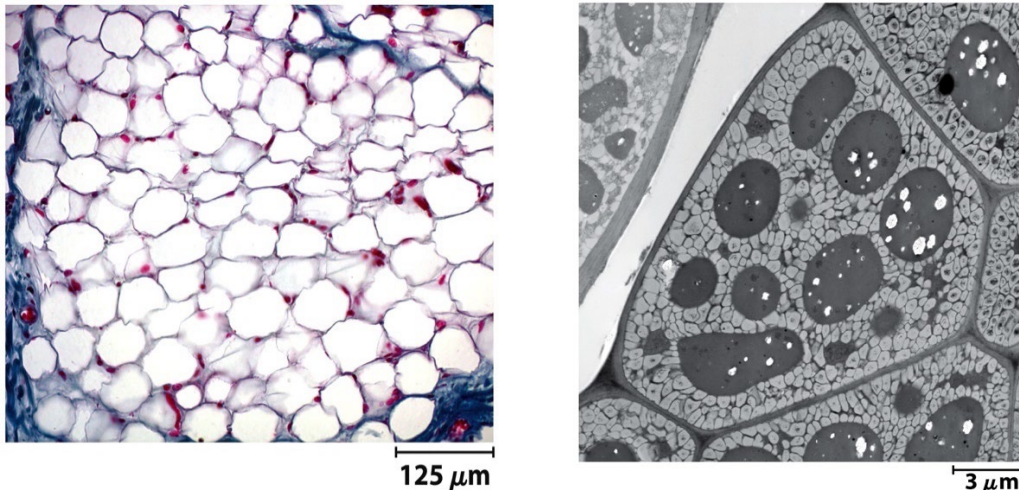


1-Stearoyl, 2-Linoleoyl, 3-Palmitoyl Glycerol
(Sebuah Campuran Triasilgliserol)

a) Penyimpanan Lemak dalam Sel

Pada sebagian besar sel eukariotik, triasilgliserol membentuk tetesan minyak mikroskopis dalam sitosol berair, yang berfungsi sebagai bahan bakar metabolik. Pada vertebrata, sel khusus yang disebut adiposit atau sel lemak, menyimpan sejumlah besar triasilgliserol sebagai tetesan lemak yang hampir memenuhi sel (gambar dibawah). Triasilgliserol juga disimpan dalam biji berbagai jenis tanaman, menyediakan energi dan prekursor biosintetik selama perkecambahan biji (Gambar b). Adiposit dan biji berkecambah mengandung enzim yang dikenal sebagai lipase yang mengkatalisis hidrolisis simpanan triasilgliserol, melepaskan asam lemak untuk diekspor ke tempat yang membutuhkannya sebagai bahan bakar. Triasilgliserol mengandung lebih banyak energi per gram daripada polisakarida seperti glikogen (9

kal/g vs 5 kal/g). Selain itu, triasilgliserol tidak terhidrasi, dan organisme tidak harus membawa beban ekstra dalam bentuk air terhidrasi seperti pada polisakarida yang disimpan. Pada beberapa hewan, seperti anjing laut, penguin, dan beruang, simpanan lemak di bawah kulit juga berfungsi sebagai penyekat terhadap suhu dingin.

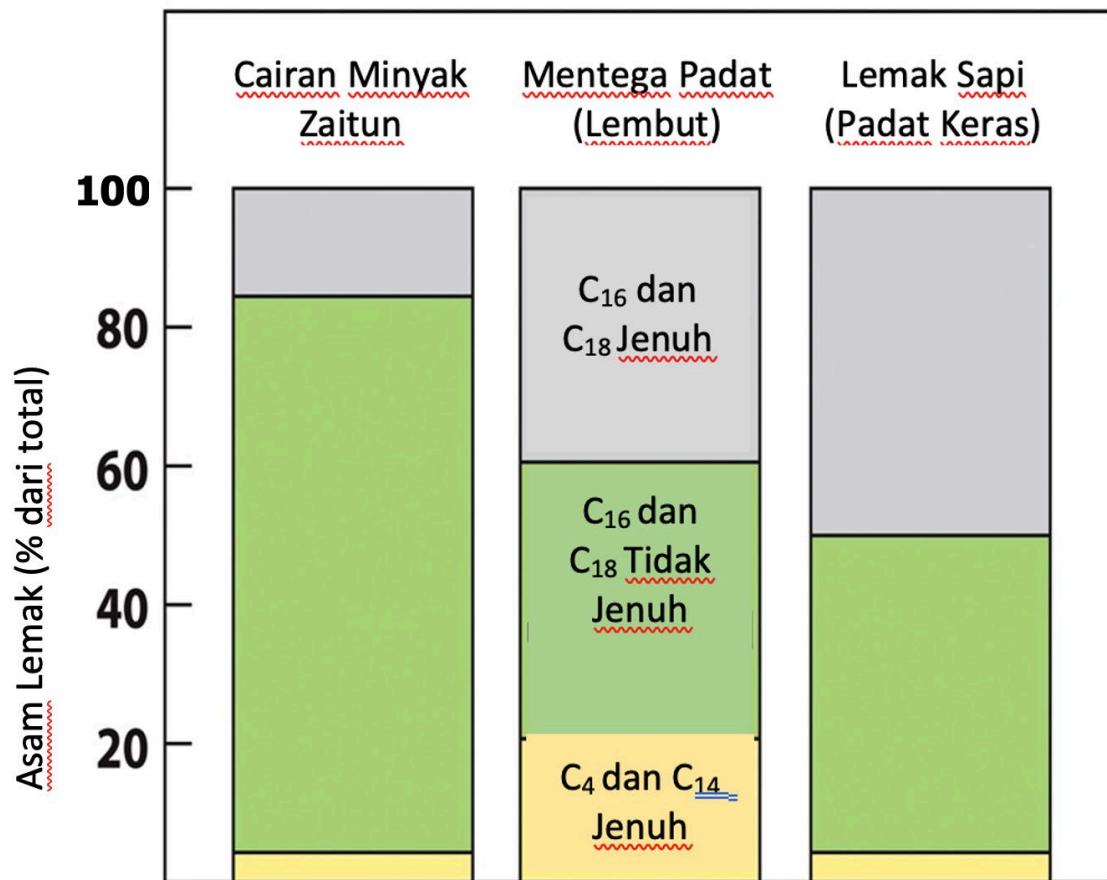


Gambar 193 Jaringan Adiposa.
Sumber: Nelson & Cox, 2013

a) Komposisi Asam Lemak pada makanan

Sebagian besar lemak alami, seperti minyak nabati, produk susu, dan lemak hewani, merupakan campuran kompleks dari triasilgliserol sederhana. Lemak ini mengandung berbagai asam lemak yang berbeda dalam panjang rantai dan tingkat kejenuhan (Gambar dibawah ini)). Titik leleh lemak adalah pada suhu kamar fungsi langsung dari komposisi asam lemaknya. Minyak zaitun memiliki proporsi asam lemak tak jenuh rantai panjang (C16 dan C18) yang tinggi, yang menyebabkan keadaan cairnya pada 25°C. Proporsi yang lebih tinggi dari asam lemak jenuh rantai panjang (C16 dan C18) dalam mentega meningkatkan titik lelehnya, sehingga mentega adalah padatan lunak pada suhu kamar. Lemak daging sapi, dengan proporsi asam lemak jenuh rantai panjang yang lebih tinggi adalah padatan yang keras.

Lemak alami pada 25°C



Gambar 194 Komposisi Asam Lemak pada makanan

b) Asam Lemak Trans dalam Makanan

Ketika makanan kaya lipid terkena terlalu lama oksigen di udara, asam lemak tak jenuh dapat bereaksi menyebabkan pembentukan aldehida dan keton terkait dengan ketengikan. Untuk meningkatkan umur simpan minyak nabati yang digunakan dalam memasak, dan untuk meningkatkan stabilitasnya pada suhu tinggi yang digunakan dalam penggorengan, minyak nabati komersial diubah dengan hidrogenasi parsial. Proses ini mengubah banyak ikatan rangkap cis dalam asam lemak menjadi ikatan tunggal dan meningkatkan suhu leleh minyak sehingga lebih mendekati padat pada suhu kamar. Proses ini digunakan untuk memproduksi margarin dari minyak nabati. Hidrogenasi parsial memiliki efek lain yang tidak diinginkan: beberapa ikatan rangkap cis diubah menjadi ikatan rangkap trans.

Sekarang ada bukti kuat bahwa asupan makanan asam lemak trans (lemak trans) meningkatkan kejadian penyakit kardiovaskular. Ini mungkin sebagian karena fakta bahwa lemak trans meningkatkan kadar LDL dan menurunkan kadar HDL. Banyak makanan cepat saji dan makanan siap saji lainnya digoreng dalam minyak sayur terhidrogenasi parsial dan karena itu mengandung asam lemak trans tingkat tinggi (tabel 40). Efek merusak dari lemak trans terjadi pada asupan 2 hingga 7 g/hari

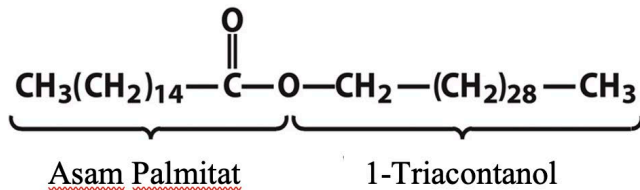
Tabel 40 Asam Lemak Trans dalam beberapa Makanan Cepat Saji dan Makanan Ringan

Kandungan Asam Lemak Trans		
	Dalam Sajian Khas (g)	Sebagai % dari Total Asam Lemak
Kentang Goreng	4.7 – 6.1	28 – 36
Roti Burger Ikan	5.6	28
Roti Ayam Nugget	5.0	25
Pizza	1.1	9
Keripik Jagung Tortila	1.6	22
Donat	2.7	25
Muffin	0.7	14
Cokelat Batangan	0.2	2

C. Lilin

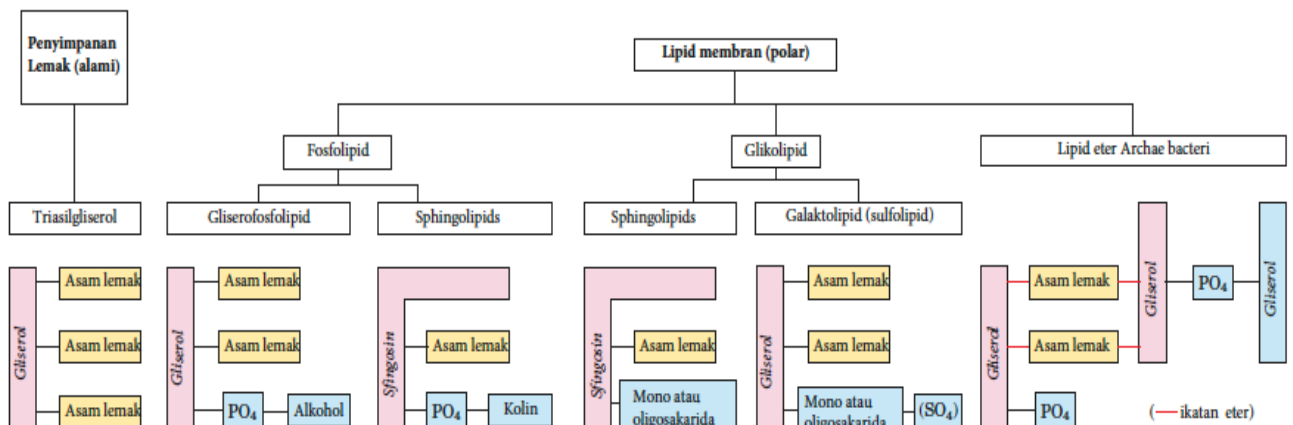
Lilin adalah ester asam lemak jenuh dan tak jenuh rantai panjang (C14 hingga C36) dengan alkohol rantai panjang (C16 hingga C30). Struktur lilin, triacontanoylpalmitate, yang merupakan komponen utama dari lilin lebah yang digunakan dalam konstruksi sarang lebah, ditunjukkan pada Gambar di bawah ini. Titik leleh lilin (60 hingga 100°C) umumnya lebih tinggi daripada triasilgliserol. Dalam plankton, lilin adalah bentuk penyimpanan utama bahan bakar metabolik. Bagi banyak organisme lain, lilin berfungsi sebagai penolak air (misalnya, unggas air, daun

tanaman). Lilin juga menemukan berbagai aplikasi dalam industri farmasi, kosmetik, dan lainnya, di mana mereka digunakan dalam pembuatan losion, salep, dan pemoles.



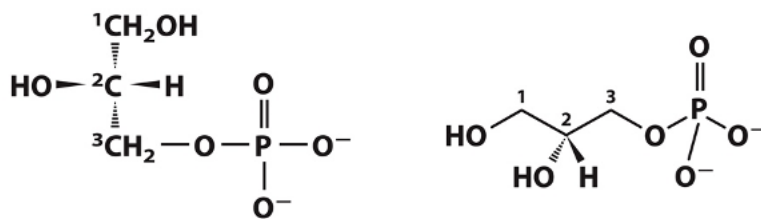
D. Membran Lipid

Struktur utama membran biologi adalah lapisan ganda lipid, yang bertindak sebagai penghalang untuk lewatnya molekul dan ion polar. Membran lipid bersifat amfipatik: salah satu ujung molekul bersifat hidrofobik, ujung lainnya bersifat hidrofilik. Interaksi hidrofobiknya satu sama lain, dan interaksi hidrofiliknya dengan air mengarahkan pengemasannya ke dalam lembaran yang disebut bilayer membran. Komposisi beberapa jenis membran lipid yang umum dapat di lihat gambar di bawah ini. Semua jenis lipid yang ditunjukkan memiliki gliserol atau spingosin sebagai tulang punggung (arus merah muda), yang melekat satu atau lebih gugus alkil rantai panjang (kuning) dan gugus kepala kutub (biru).



E. Gliserofosfolipid

Gliserofosfolipid, juga disebut fosfoglisericida, adalah membran lipid di mana dua asam lemak terikat dalam ikatan ester dengan karbon pertama dan kedua gliserol, dan gugus yang sangat polar atau bermuatan diikat melalui ikatan fosfodiester ke karbon ketiga. Gliserol bersifat prokiral; ia tidak memiliki karbon asimetris, tetapi ikatan fosfat pada salah satu ujungnya mengubahnya menjadi senyawa kiral. Gliserol terfosforilasi dalam membran hewan dapat diberi nama yang tepat baik L-gliserol 3-fosfat, D-gliserol 1-fosfat, atau sn-gliserol 3-fosfat. Pada archaea, gliserol dalam lipid memiliki konfigurasi lain, yaitu D-gliserol 3-fosfat.



L-Gliserol 3-posfat (sn-gliserol 3-posfat)

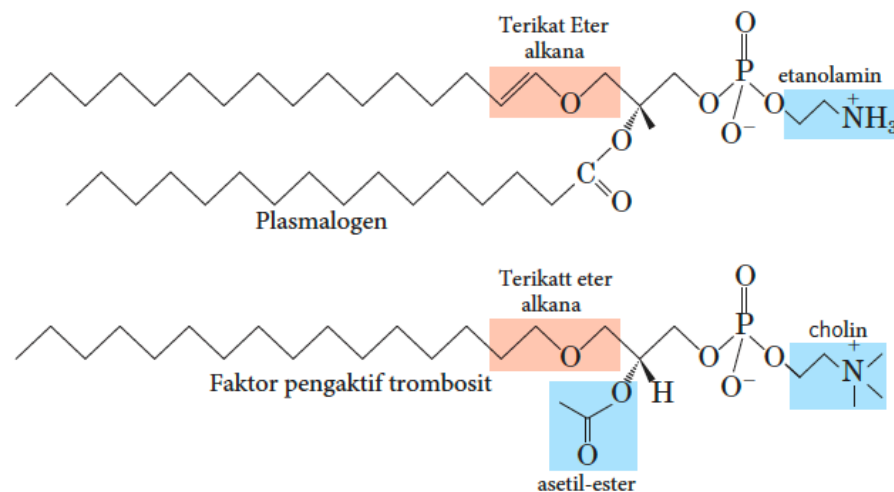
Gliserofosfolipid dinamai sebagai turunan dari senyawa induknya, asam fosfatidat Gambar dibawah, mengandung alkohol polar dalam gugus kepala. Phosphatidylcholin dan phosphatidylethanolamin, misalnya, memiliki kolin dan etanolamin yang bersifat polar pada bagian kepala. Semua senyawa ini, gugus kepala bergabung dengan gliserol melalui ikatan fosfodiester, di mana gugus fosfat membawa muatan negatif pada pH netral. Alkohol polar dapat bermuatan negatif (phosphatidylinositol 4,5-biphosphate), netral (phosphatidylserine), atau bermuatan positif (phosphatidylcholine, phosphatidylethanolamine). Muatan pada gugus kepala berkontribusi besar pada sifat permukaan membran.

Nama gliserofosfolipid	Nama X O—	Rumus X	Muatan (pada pH 7)
Asam lemak jenuh (misalnya, asam palmitat) Asam lemak tak jenuh (misalnya, asam linoleat)			
Asam fosfatidat	—	—H	-2
Phosphatidylethanolamine	Etanolamin		0
Fosfatidilkolin	Kolin		0
Fosfatidilserin	Serin		-1
Fosfatidilgliserol	Gliserol		-1
Phosphatidylinositol 4,5-bisfosfat	myo-Inositol 4,5-bisfosfat		-4*
Kardiolipin	fosfatidil-gliserol		-2

Berbagai macam asam lemak terdapat dalam gliserofosfolipid, dan fosfolipid tertentu seperti fosfatidilkolin dapat terdiri dari beberapa spesies molekul, masing-masing dengan komplemen unik dari asam lemak. Distribusi spesies molekuler spesifik untuk organisme yang berbeda, jaringan yang berbeda dari organisme yang sama, dan gliserofosfolipid yang berbeda dalam sel atau jaringan yang sama. Secara umum, gliserofosfolipid hewan mengandung asam lemak jenuh C16 atau C18 pada C-1 gliserol, dan asam lemak tak jenuh C18 atau C20 pada C-2.

Beberapa jaringan hewan dan beberapa organisme uniseluler kaya akan lipid eter, di mana salah satu dari dua rantai hidrokarbon melekat pada gliserol dalam ikatan eter, bukan ester. Rantai terkait eter mungkin jenuh, seperti pada lipid alkil

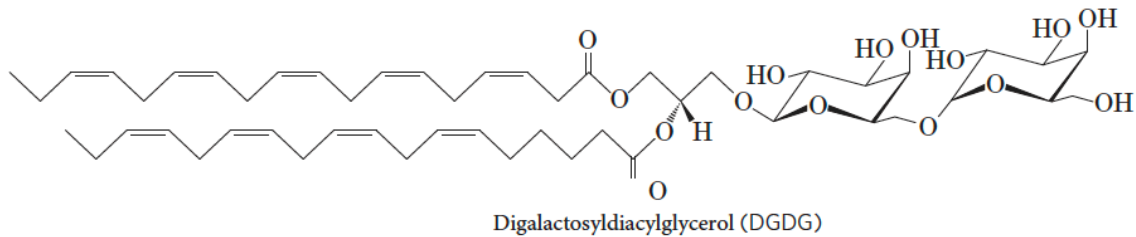
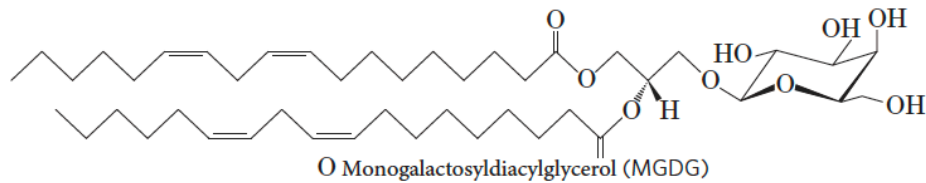
eter, atau mungkin mengandung ikatan rangkap antara C-1 dan C-2, seperti pada plasmalogens (gambar di bawah). Membran jaringan jantung vertebrata diperkaya dengan lipid eter, seperti juga membran bakteri halofilik, protista bersilia, dan invertebrata tertentu. Fungsional lipid eter dalam membran belum diketahui, tetapi mungkin ada hubungannya dengan ketahanannya terhadap pembelahan oleh fosfolipase yang memecah asam lemak terkait ester dalam lipid membran. Lipid eter yang dikenal sebagai faktor pengaktif trombosit berfungsi dalam pensinyalan sel. Ini dilepaskan dari leukosit yang disebut basofil dan merangsang agregasi trombosit dan pelepasan serotonin (vasokonstriktor) dari trombosit. Faktor pengaktif trombosit mengandung gugus asetil pada C-2 gliserol, yang membuatnya lebih larut dalam air daripada kebanyakan gliserofosfolipid dan plasmalogens.



F. Galaktolipid

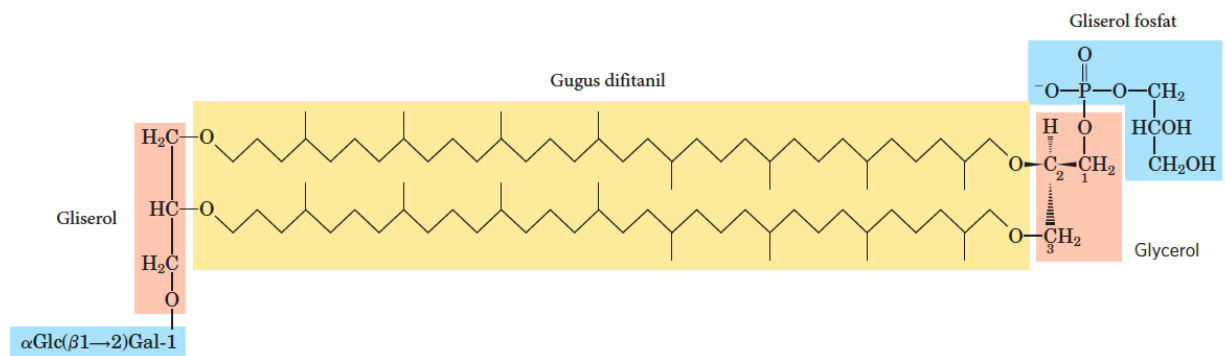
Galaktolipid mengandung satu atau dua residu galaktosa yang terhubung melalui glikosidik ke C-3 dari 1,2-diasilgliserol (Gbr di bawah). Galaktolipid sangat melimpah di sel tumbuhan di mana sebagian besar terlokalisasi pada membran tilakoid (membran internal) kloroplas. Mereka membuat 70% sampai 80% dari total membran lipid dari tanaman vaskular dan karena itu mungkin membran lipid yang paling melimpah di biosfer. Fosfat sering merupakan nutrisi yang membatasi pertumbuhan di dalam tanah, dan mungkin tekanan evolusioner untuk mengatasi fosfat untuk peran yang kritis terhadap tanaman yang membuat lipid bebas fosfat. Tumbuhan juga mengandung sulfolipid, di mana residu glukosa tersulfonasi

bergabung dengan diasilgliserol dalam glikosidik. Gugus sulfonat memiliki muatan negatif seperti gugus fosfat dalam fosfolipid.



G. Membran Lipid Archaea


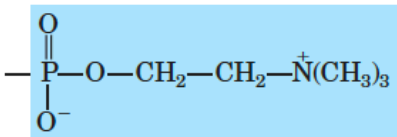
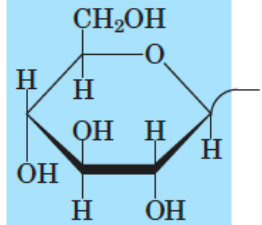
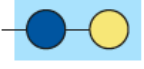
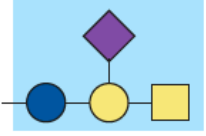
Beberapa archaea yang hidup dalam kondisi ekstrim suhu tinggi (air mendidih), pH rendah, kekuatan ion tinggi, misalnya memiliki lipid membran yang mengandung rantai panjang (32 karbon) hidrokarbon bercabang (gugus fitanal) yang terhubung di setiap ujungnya dengan gliserol (Gbr dibawah). Keterkaitan ini melalui ikatan eter, yang lebih stabil terhadap hidrolisis pada pH rendah dan suhu tinggi daripada ikatan ester yang ditemukan dalam lipid membran bakteri dan eukariot. Dalam lipid *diphytanyl tetraether* yang ditunjukkan pada diagram, bagian *diphytanyl* (kuning) adalah hidrokarbon panjang yang terdiri dari delapan gugus isoprena lima karbon yang terkondensasi dari ujung ke ujung. Dalam bentuk yang diperluas ini, gugus difitanil kira-kira dua kali panjang asam lemak 16-karbon, dan oleh karena itu salah satu lipid ini membentang di membran. Gugus gliserol dalam lipid archaea berada dalam konfigurasi R, berbeda dengan bakteri dan eukariot, yang memiliki konfigurasi S. Lipid archaea berbeda dalam substituen pada gliserol. Dalam molekul yang ditunjukkan di sini, satu gliserol terkait dengan disakarida -*glucopyranosyl*-(1→2)-*β*-*galactofuranose*. Gliserol lainnya terkait dengan gugus kepala gliserol fosfat.



H. Sphingolipid

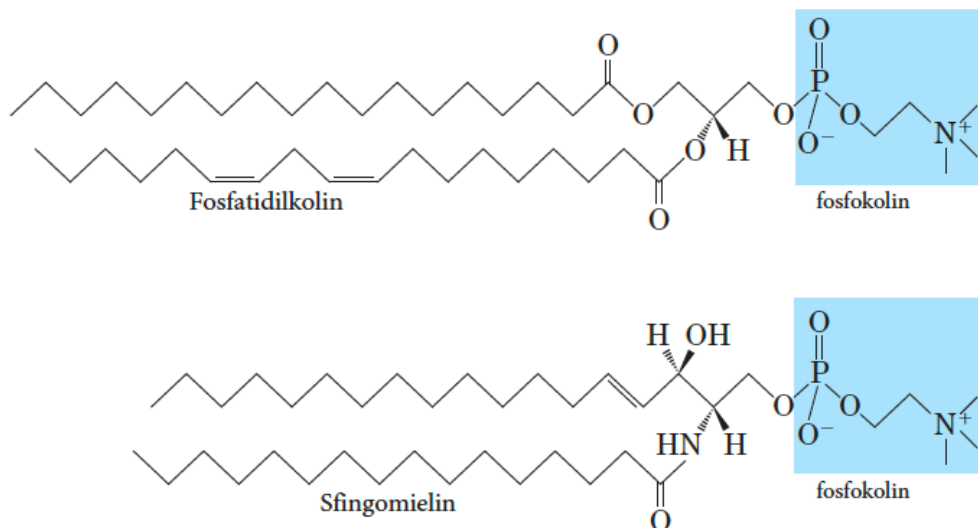
Sphingolipid adalah kelas besar membran lipid yang memiliki kelompok gugus kepala polar dan dua ekor nonpolar. Tidak seperti gliserofosfolipid dan galaktolipid, mereka tidak mengandung gliserol. Sebaliknya, sphingolipid terdiri dari satu molekul rantai panjang amino alkohol *sphingosine* (juga disebut 4-sphingenine) atau salah satu turunannya, satu molekul asam lemak rantai panjang, dan gugus kepala polar yang dihubungkan oleh glikosidik. hubungan dalam beberapa kasus dan oleh ikatan fosfodiester pada kasus lain (Gbr di bawah). Karbon C-1, C-2, dan C-3 dari molekul *sphingosine* secara struktural analog dengan tiga karbon gliserol dalam gliserofosfolipid. Ketika asam lemak terikat dalam ikatan amida ke $-NH_2$ pada C-2 dari *sphingosine*, senyawa yang dihasilkan adalah ceramide. Ceramide secara struktural mirip dengan diasilgliserol, dan ditemukan di semua sphingolipid.

Ada tiga subkelas sphingolipid, yang semuanya merupakan turunan dari ceramida, tetapi berbeda dalam gugus kepalanya. Ini adalah sfingomielin, glikosfingolipid netral (tidak bermuatan), dan gangliosida (Gbr.Dibawah). Sfingomielin mengandung fosfokolin dan fosfoetanolamina sebagai gugus kepala kutubnya dan oleh karena itu diklasifikasikan bersama dengan gliserofosfolipid sebagai fosfolipid. Spingomielin secara struktural sangat mirip dengan gliserofosfolipid. Spingomielin terdapat dalam membran plasma sel hewan dan terutama menonjol pada mielin, selubung membran yang mengelilingi dan menyekat akson beberapa neuron dengan demikian dinamakan "spingomielin".

Sfingosin		
		
Nama sphingolipid	Nama X O—	Rumus X
seramida	—	—H
Sfingomielin	fosfokolin	
Glikolipid netral Glukosilcerebrosida	Glukosa	
Laktosilceramida (sebuah globosida)	Di-, tri-, atau tetrasakarida	
Gangliosida GM2	Compleks Oligosakarida	

I. Struktur Spingomyelin

Spingomielin menyerupai fosfatidilkolin dalam sifat umum dan struktur tiga dimensinya, dan tidak memiliki muatan bersih pada gugus kepalanya (Gbr. dibawah). Sementara dimensi dan sifat fisiknya serupa, mereka mungkin memainkan peran yang berbeda dalam membran.

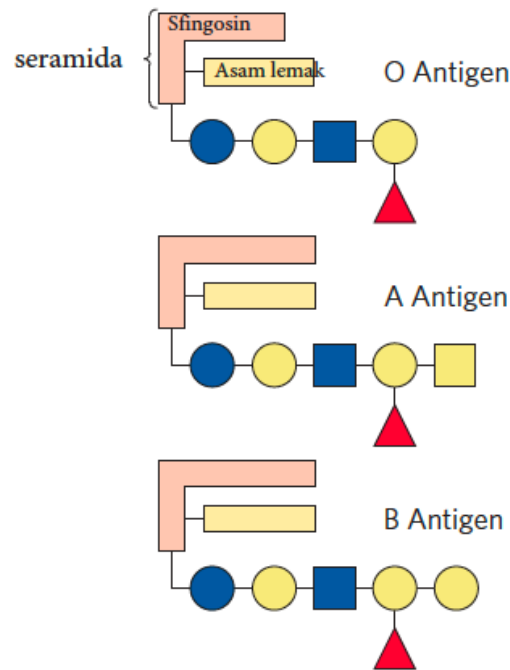


Glikosfingolipid meliputi serebrosida dan globosida (Gbr. dibawah). Ini adalah glikolipid netral yang tidak memiliki muatan dalam gugus kepala gula, dan kekurangan fosfat. Dalam serebrosida, gula tunggal dihubungkan melalui ikatan glikosidik ke C-1 dari bagian ceramida. Lipid dengan galaktosa secara khas ditemukan di selebaran luar membran plasma sel dalam jaringan saraf. Itu dengan glukosa ditemukan di selebaran luar membran plasma sel di jaringan nonneural. Globosida adalah glikosfingolipid dengan dua atau lebih gula, biasanya D-glukosa, D-galaktosa, atau N-asetil-D-galaktosamin. Antigen golongan darah adalah anggota kelas globosida. Gangliosida adalah glikosfingolipid yang paling kompleks. Mereka mengandung gugus kepala oligosakarida dengan satu atau lebih residu monosakarida bermuatan, asam sialat. Asam sialat memberikan gangliosida muatan negatif pada pH netral.

J. Antigen Golongan Darah

Golongan darah manusia (O, A, B, dan AB) ditentukan oleh gugus kepala oligosakarida dari glikosfingolipid globosida yang ada di selebaran luar membran sel darah merah (Gbr. dibawah). Tiga oligosakarida yang sama juga ditemukan melekat pada protein darah tertentu dari individu-individu dari tiga golongan darah. Ketiga antigen golongan darah mengandung inti lima gula yang sama, tetapi A dan antigen B juga masing-masing mengandung residu terminal N-asetilgalaktosamin (kotak kuning) atau galaktosa (lingkaran kuning). Gangliosida juga memainkan peran pengenalan penting dalam selebaran luar membran sel. Dalam sistem saraf,

gangliosida dianggap terlibat dalam pengkabelan neuron selama perkembangan. Di saluran usus, ganglioside GM1 bertindak sebagai reseptor dimana toksin kolera dan toksin lainnya masuk ke dalam sel epitel usus.



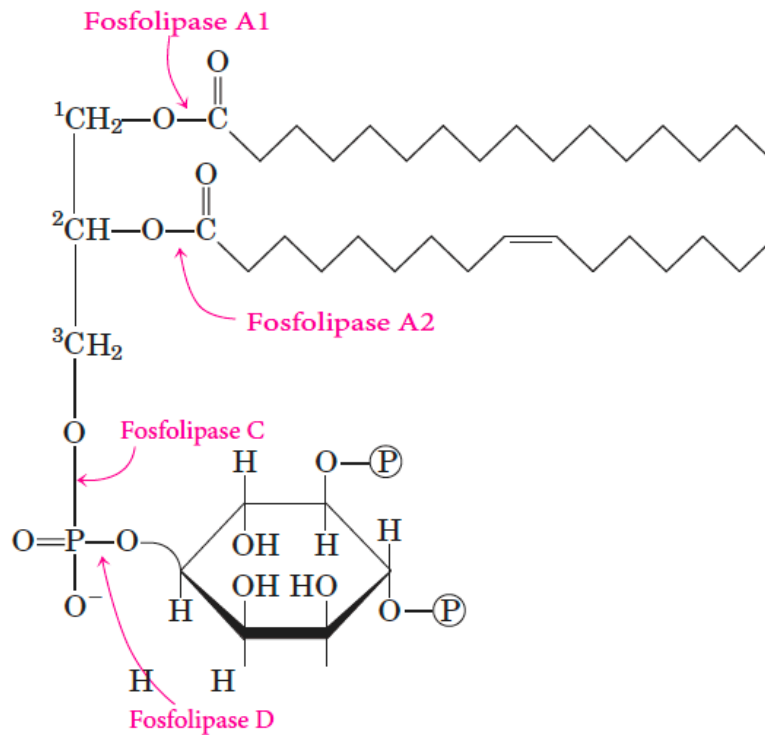
Gambar 195 Antigen

Glikosfingolipid sebagai penentu golongan darah. Golongan darah manusia (O, A, B) ditentukan sebagian oleh kelompok kepala oligosakarida dari glikosfingolipid ini. Tiga oligosakarida yang sama juga ditemukan melekat pada protein darah tertentu dari individu bergolongan darah O, A, dan B, masing-masing.

K. Fosfolipase

Sebagian besar sel terus-menerus menurunkan dan mengganti lipid membrannya. Untuk setiap ikatan yang dapat terhidrolisis dalam gliserofosfolipid, terdapat enzim hidrolitik spesifik dalam lisosom yang menjalankan fungsi ini (Gbr. dibawah). Fosfolipase A1 dan A2 menghidrolisis ikatan ester dari gliserofosfolipid utuh masing-masing pada C-1 dan C-2 gliserol. Ketika salah satu asam lemak telah dihilangkan, molekul tersebut disebut sebagai lisofosfolipid. Asam lemak kedua dihilangkan oleh lisofosfolipase (tidak ditampilkan). Fosfolipase C dan D masing-masing memisahkan salah satu ikatan fosfodiester ke gugus kepala. Beberapa

fosfolipase bekerja hanya pada satu jenis gliserofosfolipid seperti fosfatidilinositol 4,5-bifosfat (ditampilkan di sini) atau fosfatidilkolin. Lainnya kurang spesifik. Pembelahan gliserofosfolipid membran tertentu sangat penting dalam sejumlah proses pensinyalan sel.

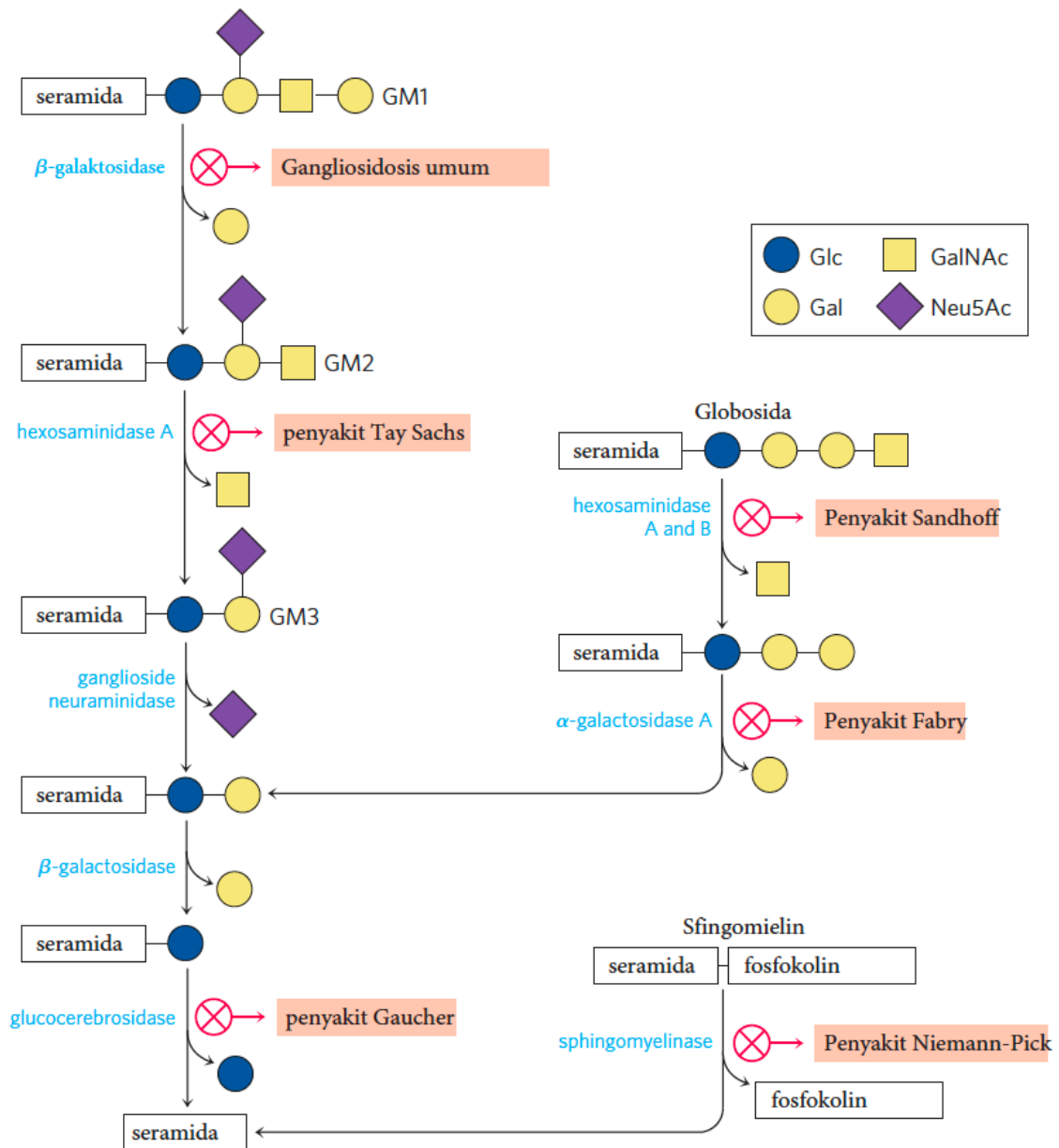


Kekhususan fosfolipase, Fosfolipase A1 dan A2 menghidrolisis ikatan ester dari gliserofosfolipid utuh masing-masing pada C-1 dan C-2 gliserol. Ketika salah satu asam lemak telah dihidrolisis oleh fosfolipase tipe A, maka asam lemak kedua dihidrolisis oleh lisofosfolipase. Fosfolipase C dan D masing-masing memisahkan salah satu ikatan fosfodiester pada gugus kepala.

L. Penyakit Penyimpanan Lisosomal

Gangliosida terdegradasi oleh satu set enzim lisosom yang mengkatalisis penghilangan bertahap unit gula dari gugus kepala, akhirnya menghasilkan ceramida. Cacat bawaan pada salah satu enzim hidrolitik ini menyebabkan akumulasi produk degradasi gangliosida dalam sel, dan menyebabkan konsekuensi medis yang parah. Misalnya, pada penyakit Tay-Sachs, Ganglioside GM2 terakumulasi dalam lisosom neuron di otak dan sel limpa karena kekurangan enzim heksosaminidase A. Lingkaran

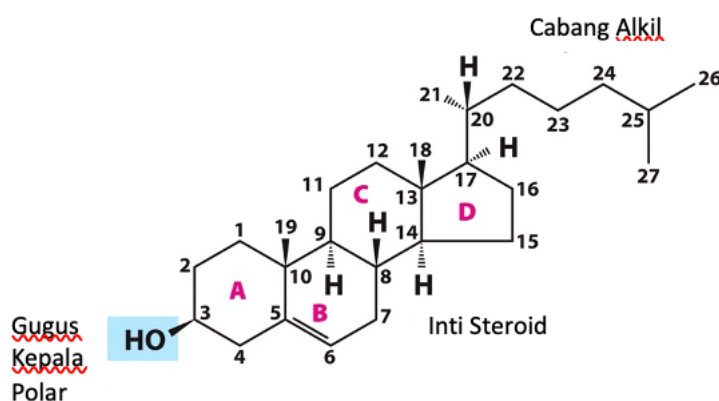
membran yang terdiri dari gangliosida GM2 diamati pada lisosom neuron pada otopsi. Gejala penyakit Tay-Sachs adalah keterbelakangan perkembangan progresif, kelumpuhan, kebutaan, dan kematian pada usia 3 atau 4 tahun. Penyakit penyimpanan lisosom seperti penyakit Tay-Sachs dapat disaring dengan pengujian genetik.



Jalur untuk pemecahan GM1, globosida, dan sphin-gomyelin menjadi ceramida. Cacat dalam enzim yang menghidrolisis langkah tertentu ditunjukkan oleh; penyakit yang dihasilkan dari akumulasi produk pemecahan parsial dicatat.

M. Sterol

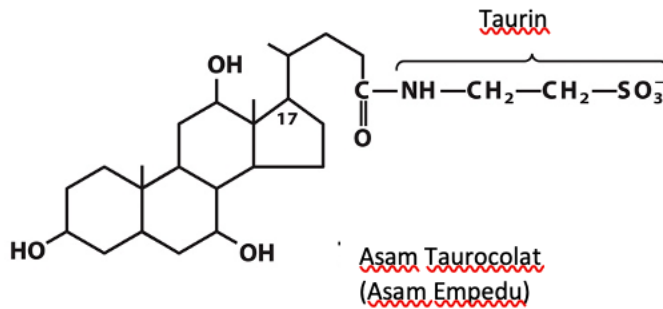
Sterol adalah lipid struktural yang ada di membran sebagian besar sel eukariotik. Sterol seperti kolesterol, terdiri dari inti steroid kaku yang mengandung empat cincin yang menyatu, rantai samping alkil dari 8 karbon, dan satu-satunya gugus hidroksil hidrofilik yang melekat pada C-3 dari cincin A. Inti steroid adalah hampir planar, dan molekul tersebut terbungkus baik dengan rantai asil membran gliserofosfolipid dan sfingolipid. Panjang keseluruhan molekul mirip dengan asam lemak 16-karbon dalam bentuk diperpanjang. Kolesterol tidak ditemukan dalam minyak nabati. Tanaman malah mensintesis molekul stigmasterol dan sitosterol yang terkait erat. Jamur seperti ragi membuat sterol lain yang disebut ergosterol. Sementara bakteri tidak dapat mensintesis sterol, beberapa dapat memasukkannya ke dalam membran mereka. Sterol disintesis dari unit isoprena 5-karbon sederhana, seperti vitamin yang larut dalam lemak, kuinon, dan dolikol.



N. Turunan Sterol: Asam Empedu

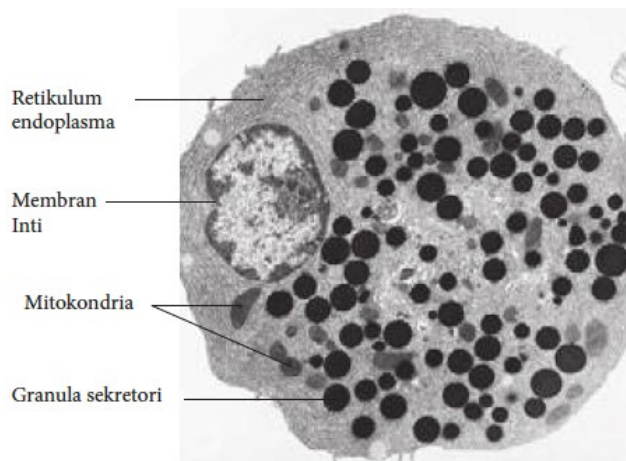
Selain perannya sebagai konstituen membran, sterol berfungsi sebagai prekursor untuk berbagai produk dengan fungsi biologis tertentu. Hormon steroid, misalnya, adalah molekul pensinyalan biologi ampuh yang mengatur ekspresi gen.

Vitamin D, yang membantu mengatur metabolisme kalsium, juga berasal dari kolesterol. Asam empedu (misalnya, asam taurokolat, lihat di bawah) adalah turunan polar dari kolesterol yang dibuat di hati, yang bertindak sebagai deterjen di usus, mengemulsi lemak makanan agar lebih mudah diakses oleh enzim pencernaan.



O. Membran dan Transportasi Biologis

Sel pertama mungkin muncul ketika membran terbentuk, membungkus sejumlah kecil larutan berair dan memisahkannya dari alam semesta lainnya. Membran menentukan batas luar sel dan mengontrol lalu lintas molekul melintasi batas dalam sel eukariotik, mereka membagi ruang internal menjadi kompartemen terpisah untuk memisahkan proses dan komponen. Mereka mengatur urutan reaksi yang kompleks dan merupakan pusat konservasi energi biologis dan komunikasi sel ke sel. Aktivitas biologis membran mengalir dari sifat fisiknya yang luar biasa. Membran bersifat fleksibel, menyegel sendiri, dan selektif permeabel terhadap zat terlarut polar. Fleksibilitasnya memungkinkan perubahan bentuk yang menyertai pertumbuhan dan gerakan sel (seperti gerakan amoeboid). Dengan kemampuannya untuk memecahkan dan menutup kembali, dua membran dapat menyatu, seperti pada eksositosis, atau kompartemen tertutup membran tunggal dapat mengalami pembelahan untuk menghasilkan dua kompartemen tertutup, seperti pada endositosis atau pembelahan sel, tanpa menciptakan kebocoran besar melalui permukaan sel. Karena membran bersifat selektif permeabel, membran mempertahankan senyawa dan ion tertentu di dalam sel dan di dalam kompartemen seluler tertentu.



Gambar 196 Membran Biologis.

Mikrograf elektron dari sel pankreas eksokrin berpotongan tipis ini menunjukkan beberapa kompartemen yang terbuat dari atau dibatasi oleh membran: retikulum endoplasma, mitokondria, granula sekretori, dan membran nukleus.

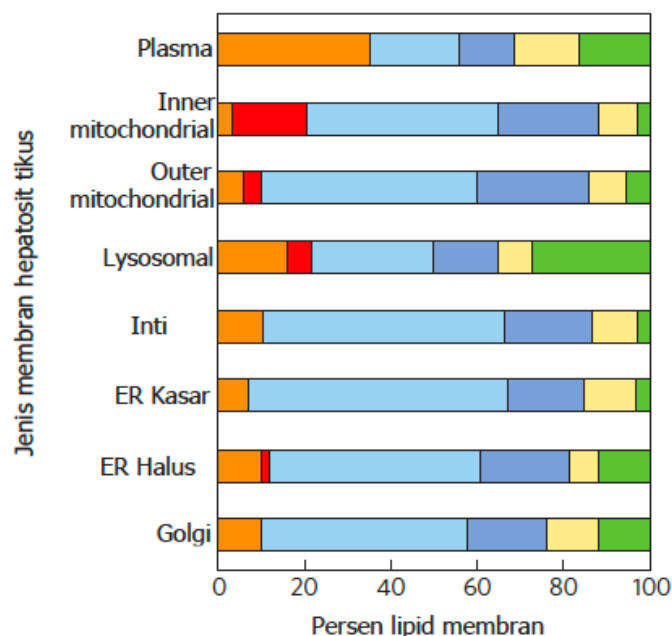
Membran bukan hanya penghalang pasif, ia termasuk berbagai protein khusus untuk mempromosikan atau mengkatalisis berbagai proses seluler. Pada permukaan sel, pengangkut memindahkan zat terlarut organik spesifik dan ion anorganik melintasi membran; reseptor merasakan sinyal ekstraseluler dan memicu perubahan molekuler dalam sel; molekul adhesi memegang sel tetangga bersama-sama. Di dalam sel, membran mengatur proses seluler seperti sintesis lipid dan protein tertentu, dan transduksi energi di mitokondria dan kloroplas. Karena membran hanya terdiri dari dua lapisan molekul, mereka sangat tipis pada dasarnya dua dimensi. Tabrakan antarmolekul jauh lebih mungkin terjadi di ruang dua dimensi ini daripada di ruang tiga dimensi, jadi efisiensi proses yang dikatalisis enzim yang diatur di dalam membran sangat meningkat.

1 Komposisi Membran

Salah satu pendekatan untuk memahami fungsi membran adalah mempelajari komposisi membran untuk menentukan, misalnya, komponen mana yang umum untuk semua membran dan mana yang unik untuk membran dengan fungsi spesifik. Setiap jenis membran memiliki karakteristik lipid dan protein. Proporsi relatif protein dan lipid bervariasi dengan jenis membran yang mencerminkan keragaman peran biologis. Misalnya, neuron tertentu memiliki selubung mielin membran plasma memanjang yang membungkus sel berkali-kali dan bertindak

sebagai isolator listrik pasif. Selubung mielin terutama terdiri dari lipid, sedangkan membran plasma bakteri dan membran mitokondria dan kloroplas, tempat banyak proses yang dikatalisis enzim, mengandung lebih banyak protein daripada lipid (dalam massa per massa total).

Untuk studi komposisi membran, tugas pertama adalah mengisolasi membran yang dipilih. Ketika sel eukariotik mengalami geseran mekanis, membran plasma mereka robek dan terfragmentasi, melepaskan komponen sitoplasma dan organel yang dibatasi membran seperti mitokondria, kloroplas, lisosom, dan nukleus. Sel jelas memiliki mekanisme untuk mengontrol jenis dan jumlah lipid membran yang mereka sintesis dan untuk menargetkan lipid spesifik ke organel tertentu. Setiap kingdom, setiap spesies, setiap jaringan atau jenis sel, dan organel dari setiap jenis sel memiliki seperangkat lipid membran yang khas. Membran plasma, misalnya, diperkaya dengan kolesterol dan tidak mengandung cardiolipin yang terdeteksi, membran mitokondria sangat rendah kolesterol dan sphingolipids, tetapi mereka mengandung *phosphatidylglycerol* dan *cardiolipin*, yang disintesis dalam mitokondria. Dalam semua kecuali beberapa kasus, signifikansi fungsional dari kombinasi ini belum diketahui.



Gambar 197 Komposisi lipid membran plasma dan membran organel hepatosit tikus (Sumber: Nelson & Cox, 2013)

Spesialisasi fungsional dari setiap jenis membran tercermin dalam komposisi lipidnya yang unik. Kolesterol menonjol di membran plasma tetapi hampir tidak terdeteksi di membran mitokondria. Kardiolipin adalah komponen utama dari membran mitokondria bagian dalam tetapi bukan dari membran plasma. *Phosphatidylserine*, *phosphatidylinositol*, dan *phosphatidylglycerol* adalah komponen yang relatif kecil dari sebagian besar membran tetapi memiliki fungsi penting; *phosphatidylinositol* dan turunannya, misalnya, penting dalam transduksi sinyal yang dipicu oleh hormon. *Sphingolipids*, *phosphatidylcholine*, dan *phosphatidylethanolamine* hadir di sebagian besar membran tetapi dalam proporsi yang bervariasi. Glikolipid, yang merupakan komponen utama membran kloroplas tumbuhan, hampir tidak ada di sel hewan.

Tabel 41 Komponen Utama Membran Plasma di Berbagai Organisme

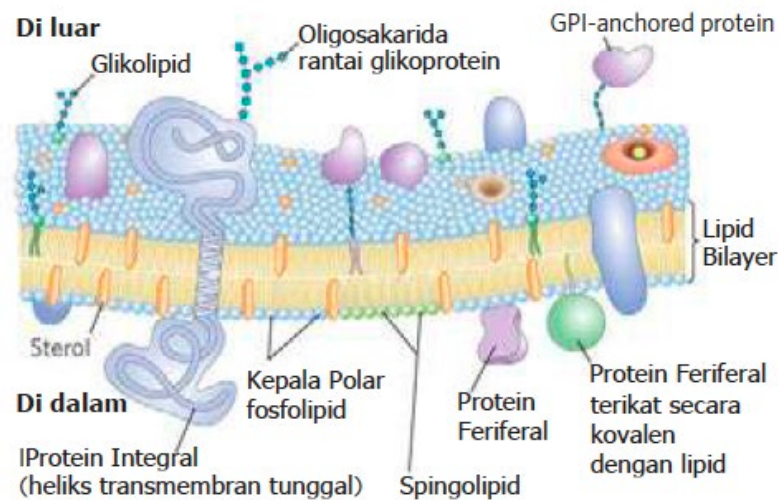
	Komponen (% berat)			Jenis sterol	Lipid Lain
	Protein	Phospholipid	Sterol		
Selubung mielin manusia	30	30	19	Kolesterol	Galaktolipid, plasmalogens
Hati tikus	45	27	25	Kolesterol	—
Daun jagung	47	26	7	Sitosterol	Galaktolipid
Ragi	52	7	4	Ergosterol	Triasilgliserol, ester steril
Paramecium (protista bersilia)	56	40	4	Stigmasterol	—
<i>E. coli</i>	75	25	0	—	—

Catatan: Nilai tidak bertambah hingga 100% dalam setiap kasus karena ada komponen selain protein, fosfolipid, dan sterol; tanaman, misalnya, memiliki kadar glikolipid yang tinggi (Sumber: Nelson & Cox, 2013).

Komposisi protein membran dari sumber yang berbeda bervariasi bahkan lebih luas daripada komposisi lipidnya, yang mencerminkan spesialisasi fungsional. Selain itu, beberapa protein membran terikat secara kovalen dengan oligosakarida. Misalnya, dalam glikoforin, suatu gliko-protein membran plasma eritrosit, 60% massa terdiri dari oligosakarida kompleks yang terikat secara kovalen dengan residu asam amino spesifik. Residu Ser, Thr, dan Asn adalah titik perlekatan yang paling umum. Bagian gula dari glikoprotein permukaan mempengaruhi pelipatan protein serta stabilitas dan tujuan intraselulernya, dan mereka memainkan peran penting dalam pengikatan spesifik ligan ke reseptor permukaan glikoprotein. Beberapa protein membran secara

kovalen melekat pada satu atau lebih lipid, yang berfungsi sebagai jangkar hidrofobik yang menahan protein ke membran, seperti yang akan kita lihat.

Semua membran biologis memiliki beberapa sifat dasar, membran tidak permeabel terhadap sebagian besar zat terlarut polar atau bermuatan, tetapi permeabel terhadap senyawa nonpolar. Tebalnya 5 hingga 8 nm (50 hingga 80 \AA) ketika protein yang menonjol di kedua sisi dimasukkan dan tampak *trilaminar* jika dilihat dalam penampang lintang dengan mikroskop elektron. Bukti gabungan dari salinan mikroskop elektron dan studi komposisi kimia, serta studi fisik permeabilitas dan pergerakan molekul protein dan lipid dalam membran, mengarah pada pengembangan model mosaik fluida untuk struktur membran biologis. Fosfolipid membentuk bilayer di mana daerah nonpolar dari molekul lipid di setiap lapisan menghadapi inti bilayer dan kelompok kepala polar mereka menghadap ke luar, berinteraksi dengan fase air di kedua sisi.



Gambar 198 Model mosaik fluida untuk struktur membran plasma.

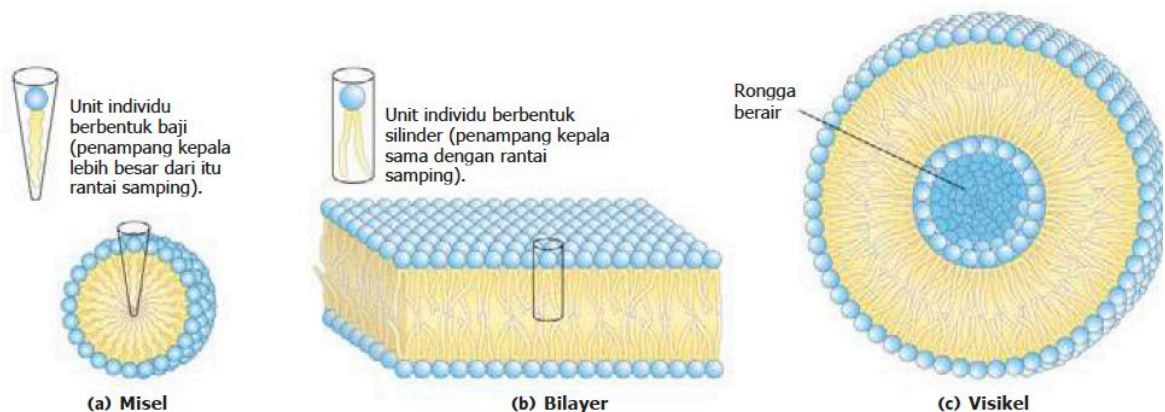
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Rantai asil lemak di bagian dalam membran membentuk cairan, hidrofobik wilayah. Protein integral mengapung di lautan lipid ini, dipegang oleh hidrofobik interaksi dengan rantai samping asam amino nonpolar mereka. Baik protein dan lipid bebas bergerak secara lateral pada bidang bilayer, tetapi baik dari satu sebaran bilayer ke yang lain dibatasi. Karbohidrat bagian yang melekat pada beberapa protein dan lipid dari membran plasma terpapar pada permukaan ekstraseluler.

Protein tertanam dalam lembaran bilayer ini, ditahan oleh interaksi hidrofobik antara lipid membran dan domain hidrofobik dalam protein. Beberapa protein menonjol hanya dari satu sisi membran; yang lain memiliki domain yang terbuka di kedua sisi. Orientasi protein dalam lapisan ganda adalah asimetris, memberikan "kesisipan" membran: domain protein yang terpapar di satu sisi lapisan ganda berbeda dari yang terpapar di sisi lain, yang mencerminkan asimetri fungsional. Unit lipid dan protein individu dalam membran membentuk mosaik cair dengan pola yang, tidak seperti mosaik ubin keramik dan mortar, bebas berubah secara konstan. Mosaik membran bersifat cair karena sebagian besar interaksi di antara komponen-komponennya bersifat nonkovalen, sehingga molekul lipid dan protein individu bebas bergerak ke lateral pada bidang membran.

Sebuah bilayer lipid struktur dasar membran, gliserofosfolipid, sphingolipid, dan sterol hampir tidak larut dalam air. Ketika dicampur dengan air, mereka secara spontan membentuk agregat lipid mikroskopis, mengelompok bersama, dengan bagian hidrofobiknya bersentuhan satu sama lain dan gugus hidrofiliknya berinteraksi dengan air di sekitarnya. Pengelompokan ini mengurangi jumlah permukaan hidrofobik yang terpapar air dan dengan demikian meminimalkan jumlah molekul dalam cangkang air yang dipesan pada antarmuka lipid-air, menghasilkan peningkatan entropi. Interaksi hidrofobik antara molekul lipid memberikan kekuatan pendorong termodinamika untuk pembentukan dan pemeliharaan cluster ini. Tergantung pada kondisi yang tepat dan sifat lipid, tiga jenis agregat lipid dapat terbentuk ketika lipid amfipatik dicampur dengan air. Misel adalah struktur bola yang mengandung beberapa lusin hingga beberapa ribu molekul amfipatik. Molekul-molekul ini diatur dengan daerah hidrofobik mereka dikumpulkan di interior, di mana air dikeluarkan, dan kelompok kepala hidrofilik mereka di permukaan, dalam kontak dengan air. Pembentukan misel disukai bila luas penampang gugus kepala lebih besar dari pada rantai samping asil, seperti pada asam lemak bebas, lisofosfolipid (fosfolipid yang kekurangan satu asam lemak), dan deterjen seperti natrium dodesil sulfat (SDS).

Jenis agregat lipid kedua dalam air adalah bilayer, di mana dua lapisan tunggal lipid (selebaran) membentuk lembaran dua dimensi. Pembentukan bilayer disukai jika luas penampang gugus kepala dan rantai samping asil serupa, seperti pada gliserofosfolipid dan sfingolipid. Bagian hidrofobik di setiap lapisan tunggal, dikecualikan dari air, berinteraksi satu sama lain. Gugus kepala hidrofilik berinteraksi dengan air pada setiap permukaan bilayer. Karena daerah hidrofobik di tepinya (Gbr. 199b) bersentuhan dengan air, lembaran bilayer relatif tidak stabil dan secara spontan melipat kembali membentuk bola berongga, vesikel (Gbr.199c). Permukaan vesikel yang terus menerus menghilangkan daerah hidrofobik yang terpapar, memungkinkan bilayer untuk mencapai stabilitas maksimal dalam lingkungan berairnya. Pembentukan vesikel juga menciptakan kompartemen air yang terpisah. Sangat mungkin bahwa prekursor sel hidup pertama menyerupai vesikel lipid, kandungan airnya dipisahkan dari lingkungannya oleh cangkang hidrofobik.

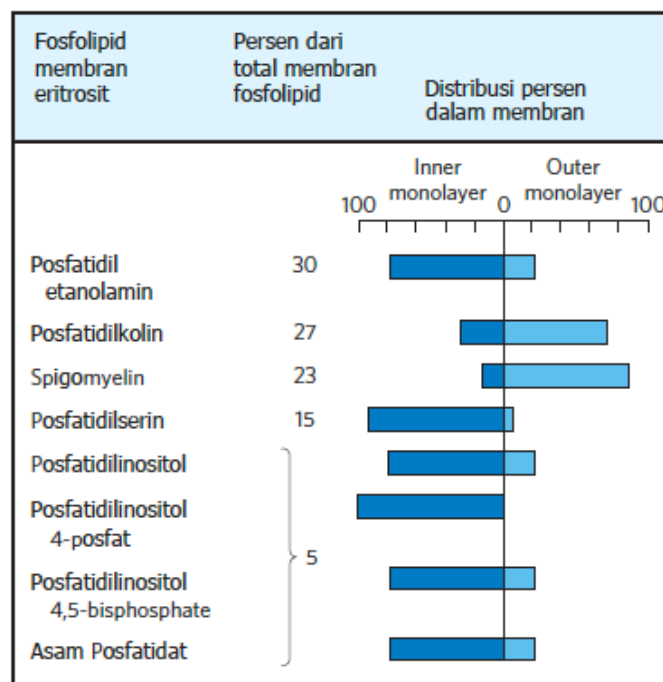


Gambar 199 Agregat lipid amfipatik yang terbentuk dalam air.

(a) Dalam misel, rantai hidrofobik asam lemak diasingkan pada inti bola. Hampir tidak ada air di hidrofobik bagian dalam. (b) Dalam lapisan ganda terbuka, semua rantai samping asil kecuali yang di tepi lembaran dilindungi dari interaksi dengan air. (c) Ketika lapisan ganda dua dimensi melipat dirinya sendiri, ia membentuk lapisan ganda tertutup, vesikel berongga tiga dimensi (liposom) yang menutupi rongga berair (Sumber: Lehninger 2013)

Lapisan ganda lipid tebalnya 3 nm (30^oA). Hidrokarbon inti, terdiri dari -CH₂- dan -CH₃ dari lemak gugus asil, sama nonpolarinya dengan dekana, dan vesikel dibentuk di laboratorium dari lipid murni (liposom) pada dasarnya kedap terhadap zat terlarut polar, seperti halnya lipid bilayer membran biologis (meskipun biologis membran, seperti yang akan kita lihat, permeabel terhadap zat terlarut untuk yang mereka miliki pengangkut khusus).

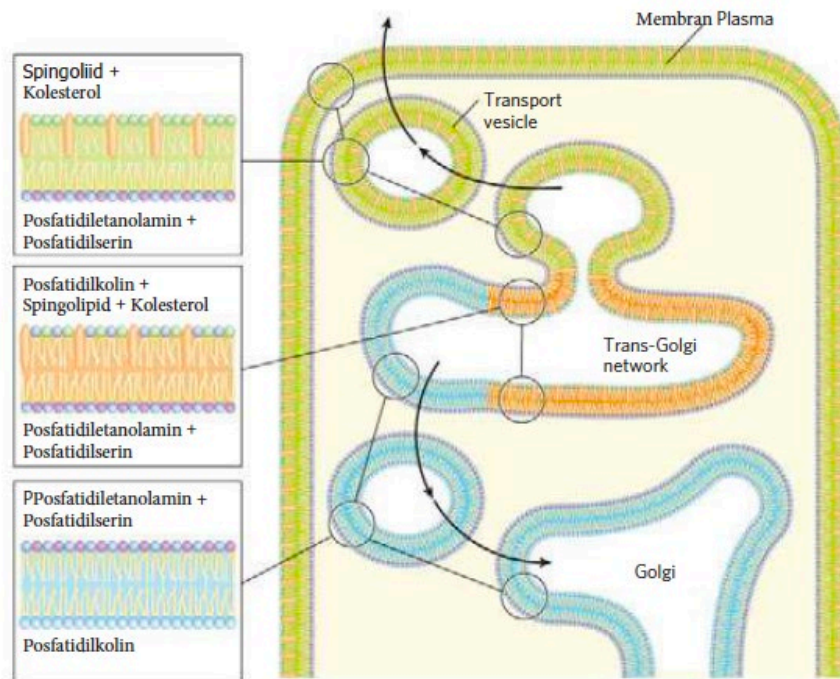
Lipid membran plasma didistribusikan secara asimetris antara dua lapisan tunggal bilayer, meskipun asimetri, tidak seperti protein membran, tidak mutlak. Dalam membran plasma eritrosit, misalnya, lipid yang mengandung kolin (fosfatidilkolin dan sfingomielin) biasanya ditemukan di selebaran luar (ekstraseluler, atau eksoplasma, sedangkan fosfatidilserin, fosfatidiletanol-amina, dan phosphatidylinositols jauh lebih umum di dalam (sitoplasma) selebaran. Aliran komponen membran dari retikulum endoplasma melalui aparatus Golgi dan ke membran plasma melalui vesikel transport disertai dengan perubahan komposisi lipid dan melintasi bilayer. Fosfatidilkolin adalah fosfolipid utama dalam monolayer luminal membran Golgi, tetapi dalam vesikel transpor, fosfatidilkolin sebagian besar telah digantikan oleh sphingolipid dan kolesterol, yang pada fusi vesikel transport dengan membran plasma, membentuk mayoritas lipid di monolayer luar membran plasma.



Gambar 200 Distribusi asimetris fosfolipid antara monolayer dalam dan luar membran plasma eritrosit.

Distribusi fosfolipid spesifik ditentukan dengan memperlakukan sel utuh dengan fosfolipase C, yang tidak dapat mencapai lipid di lapisan dalam (selebaran) tetapi menghilangkan kelompok utama lipid di lapisan tunggal luar. Proporsi setiap

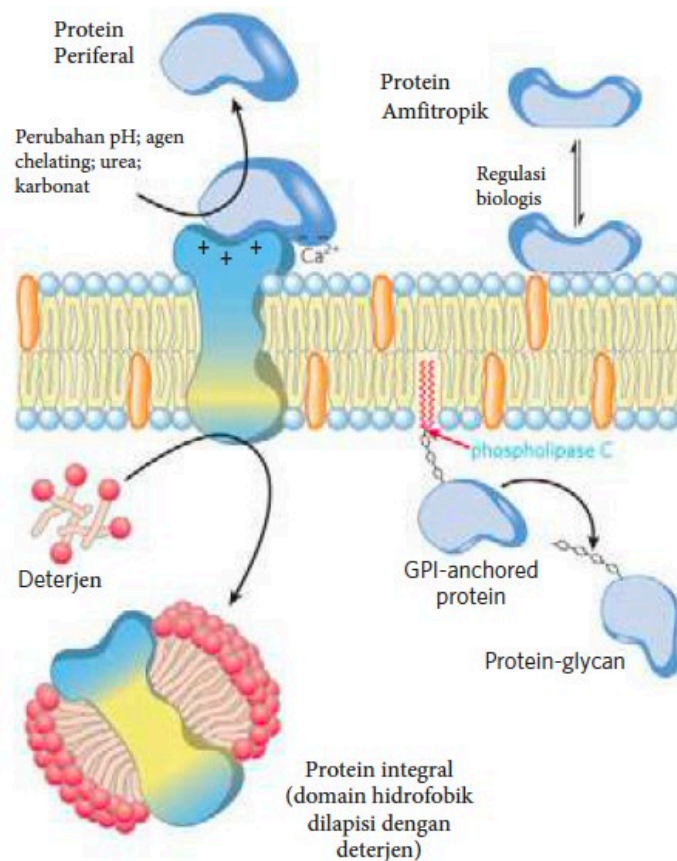
kelompok kepala yang dilepaskan memberikan perkiraan fraksi setiap lipid di lapisan tunggal luar.



Gambar 201 Distribusi lipid dalam membran sel yang khas. Setiap membran memiliki komposisi karakteristiknya sendiri, dan dua lapisan tunggal dari membran tertentu mungkin juga berbeda dalam komposisinya.

Perubahan distribusi lipid antara membran plasma memiliki konsekuensi biologis. Misalnya, hanya ketika fosfatidilserin dalam membran plasma bergerak ke luar, trombosit dapat memainkan perannya dalam pembentukan bekuan darah. Untuk banyak jenis sel lainnya, paparan fosfatidilserin pada permukaan luar menandai sel untuk dihancurkan dengan kematian sel terprogram. Pergerakan transbilayer molekul fosfolipid dikatalisis dan diatur oleh protein spesifik.

Tiga jenis protein membran berbeda dalam asosiasi dengan membran, protein membran integral sangat erat terkait dengan lapisan ganda lipid dan hanya dapat dilepas oleh agen yang mengganggu interaksi hidrofobik, seperti deterjen, pelarut organik, atau denaturants.



Gambar 202 Protein perifer, integral, dan amfitropik.

Sumber: Nelson & Cox, 2013

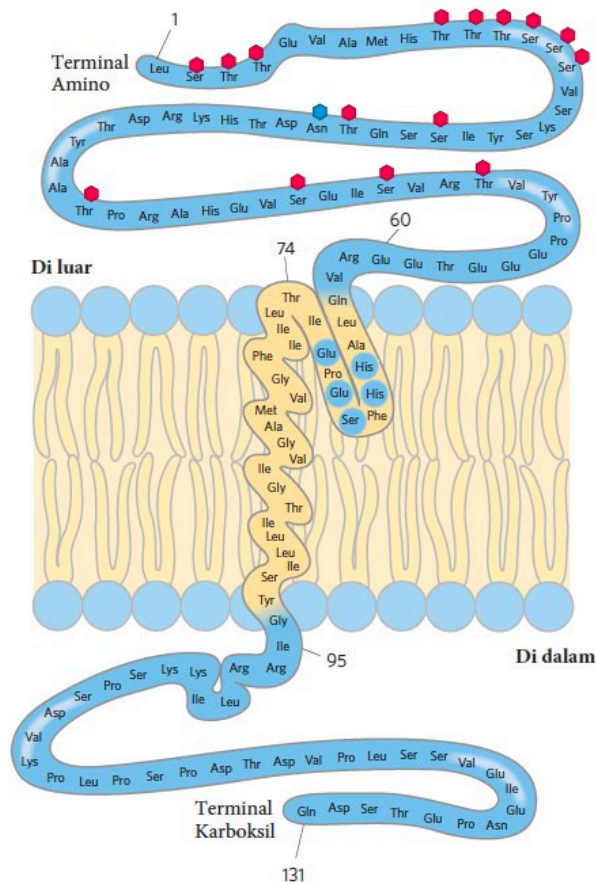
Protein membran secara operasional dapat dibedakan dengan kondisi yang diperlukan untuk melepaskannya dari membran. Sebagian besar protein periferal dilepaskan oleh perubahan pH atau kekuatan ionik, penghilangan Ca^{2+} oleh agen pengkelat, atau penambahan urea atau karbonat. Protein integral dapat diekstraksi dengan deterjen, yang mengganggu interaksi hidrofobik dengan lapisan ganda lipid dan membentuk kelompok seperti misel di sekitar molekul protein individu. Protein integral yang terikat secara kovalen pada lipid membran, seperti glikosil fosfatidilinositol (GP), dapat dilepaskan dengan pengobatan dengan fosfolipase C. Protein amfitropik kadang-kadang dikaitkan dengan membran dan kadang tidak, tergantung pada beberapa jenis proses regulasi seperti palmitoylation reversibel.

Protein membran periferal berasosiasi dengan membran melalui interaksi elektrostatis dan ikatan hidrogen dengan domain hidrofilik protein integral dan dengan kelompok kepala polar lipid membran. Mereka dapat dilepaskan dengan mengganggu interaksi elektrostatis atau memutuskan ikatan hidrogen; agen yang

umum digunakan adalah karbonat pada pH tinggi. Protein amphitropic ditemukan baik di sitosol dan dalam hubungan dengan membran. Afinitasnya terhadap membran menghasilkan beberapa kasus dari interaksi nonkovalen protein dengan protein membran atau lipid, dan dalam kasus lain dari adanya satu atau lebih lipid yang terikat secara kovalen dengan protein amfitropik. Umumnya, asosiasi reversibel protein amfitropik dengan membran diatur; misalnya, fosforilasi atau pengikatan ligan dapat memaksa perubahan konformasi pada protein, memperlihatkan situs pengikatan membran yang sebelumnya tidak dapat diakses.

Banyak Protein Membran Menjangkau Lipid Bilayer, topologi protein membran (lokalisasi domain protein relatif terhadap bilayer lipid) dapat ditentukan dengan reagen yang bereaksi dengan rantai samping protein tetapi tidak dapat melintasi membran reagen kimia polar yang bereaksi dengan amina primer residu Lys, misalnya, enzim seperti tripsin yang memutuskan protein tetapi tidak dapat melewati membran. Eritrosit manusia cocok untuk studi semacam itu karena tidak memiliki organel yang dibatasi membran; membran plasma adalah satu-satunya membran yang ada. Jika protein membran dalam eritrosit utuh bereaksi dengan reagen impermeant membran, protein tersebut harus memiliki setidaknya satu domain yang terpapar pada permukaan luar (ekstraseluler) membran. Tripsin memutuskan domain ekstraseluler tetapi tidak mempengaruhi domain yang terkubur di dalam bilayer atau hanya terpapar pada permukaan bagian dalam, kecuali membran plasma dipecah untuk membuat domain ini diakses oleh enzim.

Eksperimen dengan reagen spesifik topologi tersebut menunjukkan bahwa glikoforin glikoprotein eritrosit menjangkau membran plasma. Domain terminal aminonya (membawa rantai karbohidrat) berada di permukaan luar dan dipotong oleh tripsin. Ujung karboksil menonjol di bagian dalam sel, di mana ia tidak dapat bereaksi dengan reagen impermeant. Baik domain terminal amino dan terminal karboksil mengandung banyak residu asam amino polar atau bermuatan dan karenanya bersifat hidrofilik. Namun, segmen di tengah protein (residu 75 hingga 93) terutama mengandung residu asam amino hidrofobik, menunjukkan bahwa glikoforin memiliki segmen transmembrane yang diatur.



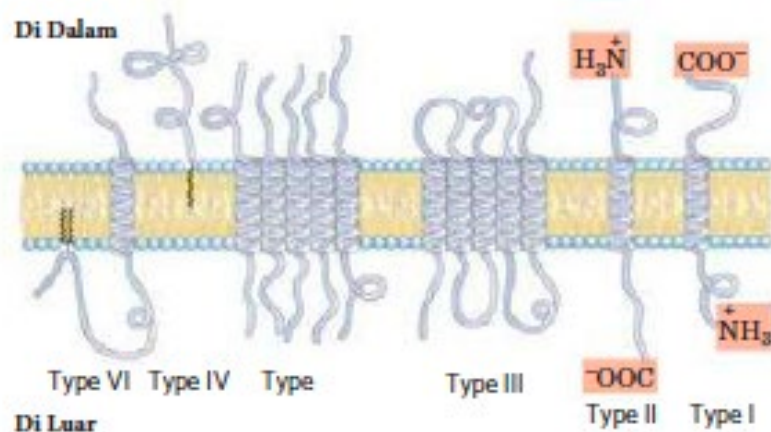
Gambar 203 Disposisi transbilayer glikoforin dalam eritrosit
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Satu domain hidrofilik, yang mengandung semua residu gula, berada di permukaan luar, dan domain hidrofilik lainnya menonjol dari permukaan dalam membran. Setiap segi enam merah mewakili tetrasakarida (mengandung dua Neu5Ac (asam sialic), Gal, dan GalNAc) yang terkait dengan residu Ser atau Thr; segi enam biru mewakili oligosakarida N-terkait dengan residu Asn. Ukuran relatif unit oligosakarida lebih besar dari yang ditunjukkan di sini. Segmen 19 residu hidrofobik (residu 75 hingga 93) membentuk heliks yang melintasi bilayer membrane. Segmen dari residu 64 hingga 74 memiliki beberapa residu hidrofobik dan mungkin menembus permukaan luar lapisan ganda lipid, seperti yang ditunjukkan.

Eksperimen nonkristalografi ini juga mengungkapkan bahwa orientasi glikoforin dalam membran tidak simetris: segmen terminal aminonya selalu berada di luar. Studi serupa dari protein membran lain menunjukkan bahwa masing-masing memiliki orientasi spesifik dalam bilayer, memberikan membran keberpihakan yang

berbeda. Untuk glikoforin, dan untuk semua glikoprotein lain dari membran plasma, domain glikosilasi selalu ditemukan pada permukaan ekstraseluler bilayer. Seperti yang akan kita lihat, susunan asimetris protein membran menghasilkan asimetri fungsional. Semua molekul pompa ion tertentu, misalnya, memiliki orientasi yang sama di dalam membran dan memompa ion ke arah yang sama.

Protein integral, perlekatan kuat protein integral ke membran adalah hasil interaksi hidrofobik antara lipid membran dan domain hidrofobik protein. Beberapa protein memiliki urutan hidrofobik tunggal di tengah (seperti dalam glikoforin) atau di ujung amino atau karboksil. Protein lainnya memiliki beberapa urutan hidrofobik, yang masing-masing, ketika dalam konformasi α -heliks, cukup panjang untuk menjangkau lapisan ganda lipid.

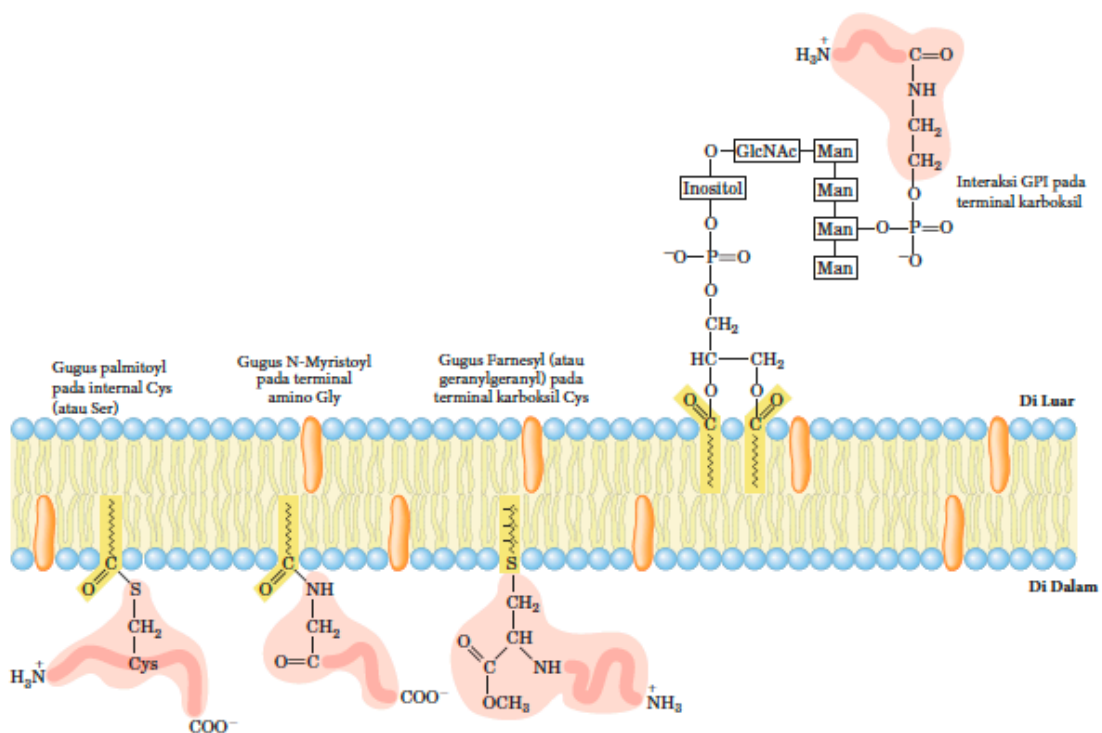


Gambar 204 Protein membran integral.

Protein membran integral, untuk protein membran plasma yang diketahui, hubungan domain protein dengan lapisan ganda lipid terbagi dalam enam kategori. Tipe I dan II memiliki heliks transmembran tunggal; domain terminal amino berada di luar sel pada protein tipe I dan di dalam pada tipe II. Protein tipe III memiliki banyak heliks transmembran dalam satu polipeptida. Pada protein tipe IV, domain transmembran dari beberapa polipeptida yang berbeda berkumpul untuk membentuk saluran melalui membran. Protein tipe V terikat pada lapisan ganda terutama oleh lipid yang terhubung secara kovalen, dan protein tipe VI memiliki heliks transmembran dan jangkar lipid. Dalam gambar ini, segmen protein transmembran

dalam konformasi yang paling mungkin: sebagai α heliks enam sampai tujuh putaran. Kadang-kadang heliks ini ditampilkan hanya sebagai silinder.

Lipid terikat secara kovalen pada protein membran, beberapa protein membran mengandung satu atau lebih lipid yang terikat secara kovalen, yang mungkin terdiri dari beberapa jenis: asam lemak rantai panjang, isoprenoid, sterol, atau turunan glikosilasi dari fosfatidilinositol (GPI). Kekuatan interaksi hidrofobik antara bilayer dan rantai hidrokarbon tunggal yang terkait dengan protein hampir tidak cukup untuk mengikat protein dengan aman, tetapi banyak protein memiliki lebih dari satu bagian lipid yang terikat. Interaksi lain, seperti atraksi ionik antara residu Lys yang bermuatan positif dalam protein dan kelompok kepala lipid yang bermuatan negatif, mungkin berkontribusi pada stabilitas ikatan. Asosiasi protein terkait lipid ini dengan membran tentu lebih lemah daripada protein membran integral dan, setidaknya dalam kasus palmitoilasi sistein, reversibel.



Gambar 205 Interaksi protein membran dengan lipid
Sumber: Nelson & Cox, 2013

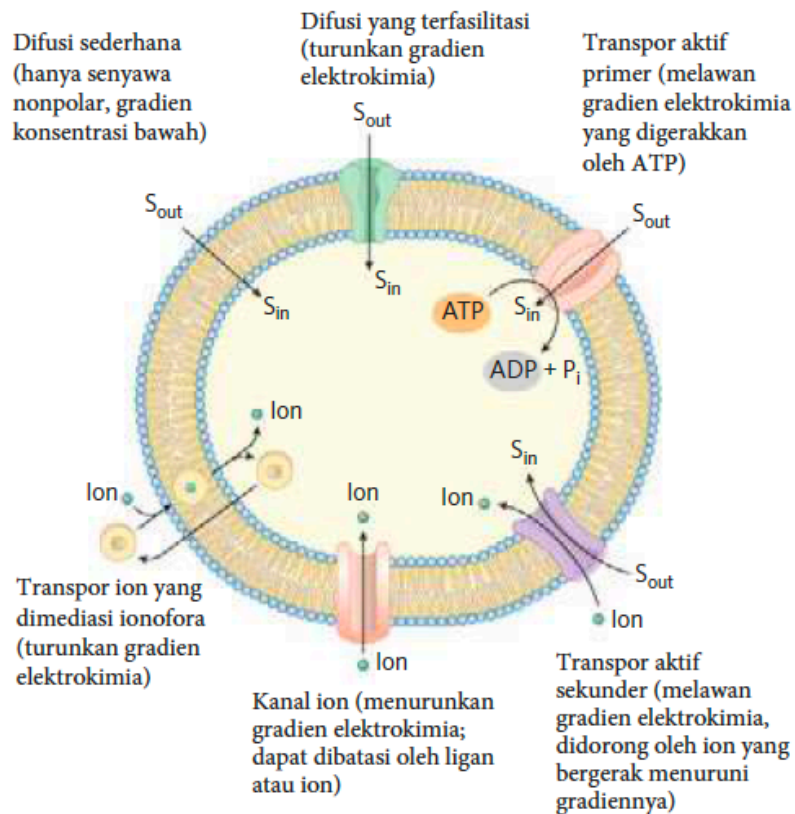
Lipid yang terikat secara kovalen mengikat protein membran ke lapisan ganda lipid. Gugus palmitoil ditunjukkan terikat oleh ikatan tioester ke residu Cys; gugus N-miristoil umumnya terikat pada terminal amino Gly, khususnya dari protein yang juga

memiliki segmen bran transmem hidrofobik; gugus farnesil dan geranyl geranyl yang terikat pada residu Cys terminal karboksil adalah isoprenoid masing-masing dengan 15 dan 20 karbon. Residu Cys terminal karboksil selalu dimetilasi. *Interaksi Glycosyl phosphatidylinositol (GPI)*, adalah turunan dari phosphatidylinositol di mana inositol mengandung oligosakarida pendek yang secara kovalen bergabung dengan residu terminal karboksil protein melalui phosphoetha-nolamin. Protein terikat GPI selalu berada di permukaan ekstraseluler membran plasma. Protein membran *farnesylated* dan *palmitoylated* ditemukan pada permukaan bagian dalam membran plasma, dan protein *myristoylated* memiliki domain baik di dalam maupun di luar membran plasma.

Lipid dan Protein Berdifusi Secara Lateral di Bilayer, molekul lipid dapat bergerak secara lateral di bidang membran dengan mengubah tempat dengan molekul lipid tetangga; yaitu, mereka mengalami gerakan brown di dalam bilayer, yang bisa sangat cepat. Sebuah molekul di selebaran luar membran plasma eritrosit, misalnya, dapat berdifusi ke lateral begitu cepat sehingga mengelilingi eritrosit dalam hitungan detik. Difusi lateral yang cepat dalam bidang lapisan ganda ini cenderung mengacak posisi molekul individu dalam beberapa detik.

Transport Zat terlarut melintasi Membran, setiap sel hidup harus memperoleh dari lingkungannya bahan mentah untuk biosintesis dan untuk produksi energi, dan harus melepaskan produk sampingan metabolisme ke lingkungannya. Beberapa senyawa nonpolar dapat larut dalam lapisan ganda lipid dan melintasi membran tanpa bantuan, tetapi untuk pergerakan transmembran dari senyawa atau ion polar, protein membran sangat penting. Dalam beberapa kasus, protein membran hanya memfasilitasi difusi zat terlarut menuruni gradien konsentrasinya, tetapi transpor juga dapat terjadi melawan gradien konsentrasi, muatan listrik, atau keduanya, dalam hal ini proses membutuhkan energi. Energi dapat datang langsung dari hidrolisis ATP atau dapat disuplai dalam bentuk satu zat terlarut yang bergerak menuruni gradien elektrokimiawinya, yang menyediakan energi yang cukup untuk mendorong zat terlarut lain ke atas gradiennya. Ion juga dapat bergerak melintasi membran melalui saluran ion yang dibentuk oleh protein, atau dapat dibawa oleh ionofor, molekul kecil yang menutupi muatan ion dan memungkinkannya berdifusi melalui lapisan ganda

lipid. Dengan sedikit pengecualian, lalu lintas molekul kecil melintasi membran plasma dimediasi oleh protein seperti saluran bran-transmem, pembawa, atau pompa. Di dalam sel eukariotik, kompartemen yang berbeda memiliki konsentrasi ion dan zat antara dan produk metabolik yang berbeda, dan ini juga harus bergerak melintasi membran intraseluler dalam proses yang diatur secara ketat dan diperantarai protein.

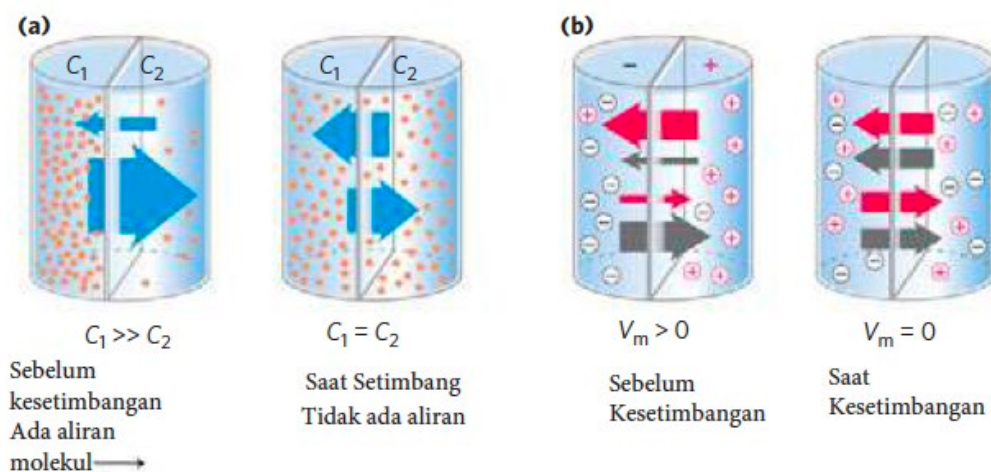


Gambar 206 Ringkasan jenis pengangkut
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Beberapa jenis (ionofor, saluran ion, dan pengangkut pasif) hanya mempercepat pergerakan transmembran zat terlarut menuruni gradien elektrokimianya, sedangkan yang lain (pengangkut aktif) dapat memompa zat terlarut melawan gradien, menggunakan ATP atau gradien zat terlarut kedua untuk menyediakan energi.

Transportasi Pasif Difasilitasi oleh Protein membran, jika dua kompartemen berair yang mengandung konsentrasi yang tidak sama dari senyawa atau ion terlarut

dipisahkan oleh pembagi permeabel (membran), zat terlarut bergerak dengan difusi sederhana dari daerah konsentrasi tinggi, melalui membran, ke daerah konsentrasi lebih rendah, sampai kedua kompartemen memiliki konsentrasi zat terlarut yang sama. Ketika ion muatan berlawanan dipisahkan oleh membran permeabel, ada gradien listrik transmembran, potensial membran. Potensial membran ini menghasilkan gaya yang menentang pergerakan ion dan mendorong pergerakan ion. Jadi, arah di mana zat terlarut bermuatan cenderung bergerak secara spontan melintasi membran bergantung pada gradien kimia (perbedaan konsentrasi zat terlarut) dan gradien listrik melintasi membran. Bersama-sama kedua faktor ini disebut sebagai gradien elektrokimia atau potensial elektrokimia.

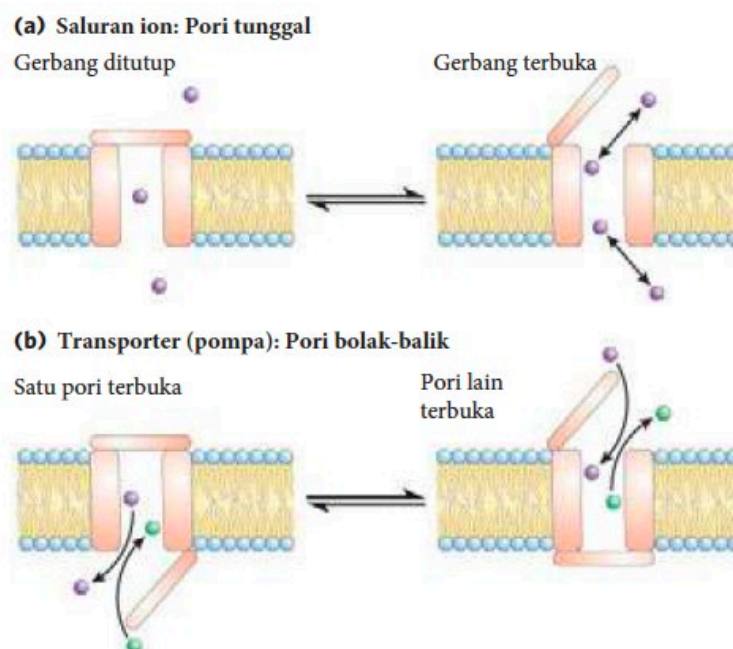


Gambar 207 Pergerakan zat terlarut melintasi membran permeable

(a) Pergerakan zat terlarut yang netral secara elektrik adalah menuju sisi konsentrasi zat terlarut yang lebih rendah sampai keseimbangan tercapai. Konsentrasi zat terlarut di sisi kiri dan kanan membran disebut C_1 dan C_2 . Laju pergerakan zat terlarut transmembran (ditunjukkan oleh panah) sebanding dengan rasio konsentrasi. (b) Pergerakan zat terlarut bermuatan listrik ditentukan oleh kombinasi potensial listrik (V_m) dan rasio konsentrasi kimia (C_2/C_1) melintasi membran; gerakan ion berlanjut sampai potensial elektrokimia ini mencapai nol.

Transporter dan saluran ion pada dasarnya berbeda, protein transporter termasuk dalam dua kategori yang sangat luas: pengangkut dan saluran. Pengangkut

untuk molekul dan ion mengikat substratnya dengan spesifisitas tinggi, mengkatalisis transport pada kecepatan jauh di bawah batas difusi bebas. Arah pergerakan ion melalui saluran ion ditentukan oleh muatan ion dan gradien elektrokimia melintasi membran. Di dalam masing-masing kategori ini terdapat famili dari berbagai jenis, yang ditentukan tidak hanya oleh urutan primernya tetapi juga oleh struktur sekundernya. Di antara transporter, beberapa hanya memfasilitasi difusi menuruni gradien konsentrasi; mereka adalah transporter pasif. Transporter aktif dapat mendorong substrat melintasi membran melawan gradien konsentrasi, beberapa menggunakan energi yang disediakan secara langsung oleh reaksi kimia (transporter aktif primer) dan beberapa menggabungkan transportasi menanjak dari satu substrat dengan transportasi menurun lainnya (transporter aktif sekunder).



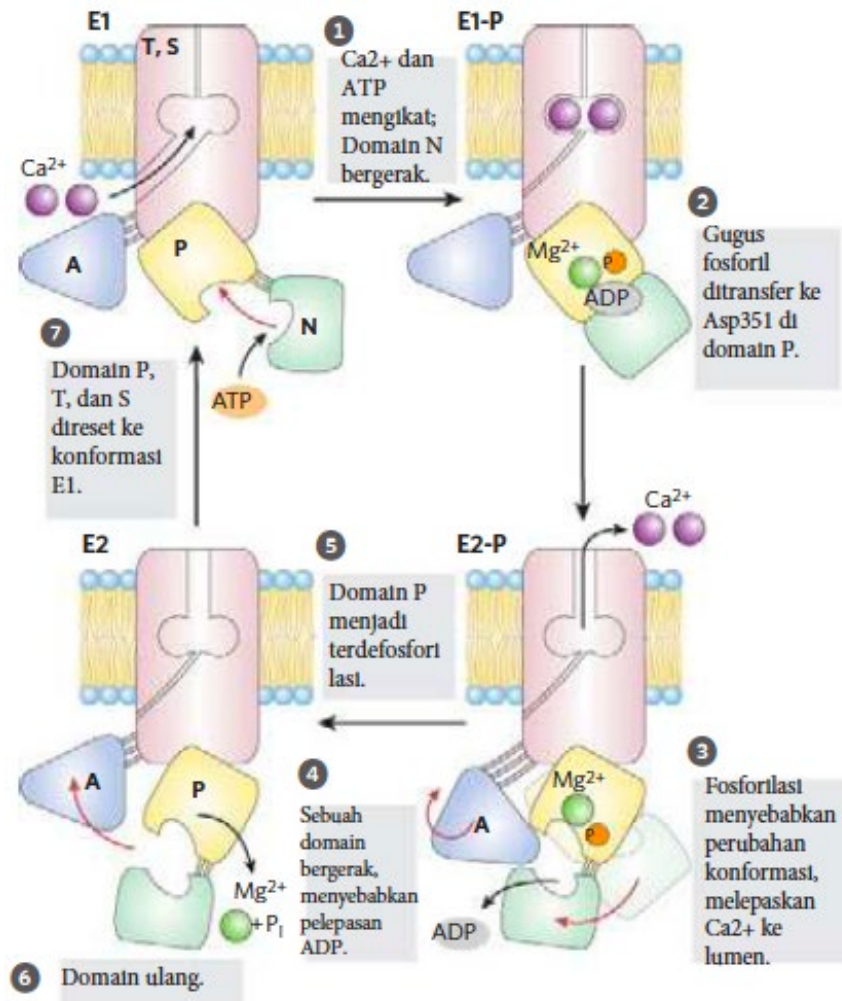
Gambar 208 Perbedaan antara saluran dan transporter.
Sumber: Nelson & Cox, 2013

(a) Dalam saluran ion, pori transmembran terbuka atau tertutup, tergantung pada posisi pori tunggal. Ketika terbuka, ion bergerak dengan kecepatan yang dibatasi hanya oleh kecepatan difusi maksimum. (b) Pengangkut (pompa) memiliki dua pori, dan keduanya tidak pernah terbuka. Pergerakan substrat (ion atau molekul kecil) melalui membran oleh karena itu dibatasi oleh waktu yang dibutuhkan untuk satu pori untuk membuka dan menutup (di satu sisi membran) dan untuk gerbang kedua untuk membuka. Laju pergerakan melalui saluran ion dapat lebih besar daripada laju

melalui pompa, tetapi saluran hanya memungkinkan ion mengalir menuruni gradien elektrokimia, sedangkan pompa dapat memindahkan substrat melawan gradien konsentrasi.

Transport Aktif melawan Konsentrasi atau Gradien Elektrokimia, dalam transpor pasif, spesies yang diangkut selalu bergerak menuruni gradien elektrokimia dan tidak terakumulasi di atas konsentrasi kesetimbangan. Transport aktif, sebaliknya, menghasilkan akumulasi zat terlarut di atas titik kesetimbangan. Transport aktif secara termodinamika tidak menguntungkan (endergonik) dan terjadi hanya ketika digabungkan (langsung atau tidak langsung) ke proses eksergonik seperti penyerapan sinar matahari, reaksi oksidasi, pemecahan ATP, atau aliran bersamaan dari beberapa bahan kimia lainnya. Dalam transport aktif primer, akumulasi zat terlarut digabungkan langsung ke reaksi kimia eksergonik. Transport aktif sekunder terjadi ketika transpor endergonik (menanjak) dari satu zat terlarut digabungkan dengan aliran eksergonik (menurun) dari zat terlarut yang berbeda yang awalnya dipompa ke atas bukit oleh transpor aktif primer.

Pada gambar 209 siklus transport dimulai dengan protein dalam konformasi E1, dengan situs pengikatan Ca^{2+} menghadap sitosol. Dua ion Ca^{2+} mengikat, kemudian ATP mengikat transporter dan memfosforilasi Asp³⁵¹, membentuk E1-P. Fosforasi mendukung konformasi kedua, E2-P, di mana situs pengikatan Ca^{2+} , sekarang dengan afinitas yang berkurang untuk Ca^{2+} , dapat diakses di sisi lain membran (lumen atau ruang ekstraseluler), dan Ca^{2+} yang dilepaskan berdifusi menjauh. Akhirnya, E2-P mengalami defosforilasi, mengembalikan protein ke konformasi E1 untuk putaran transportasi lainnya.



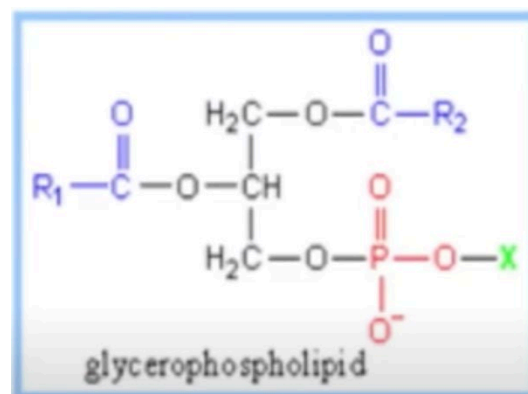
Gambar 209 Mekanisme postulat dari pompa SERCA.
 Sumber: Nelson & Cox, 2013

Mekanisme yang didalilkan untuk ATPase tipe-P memperhitungkan perubahan konformasi besar dan fosforilasi-defosforilasi residu Asp kritis dalam domain P yang diketahui terjadi selama siklus katalitik. Untuk pompa SERCA, setiap siklus katalitik memindahkan dua ion Ca^{2+} melintasi membran dan mengubah ATP menjadi ADP dan Pi. ATP memiliki dua peran dalam mekanisme ini, satu katalitik dan satu modulasi.

Peran pengikatan ATP dan fosforilasi transfer gugus fosforil ke enzim adalah untuk mewujudkan interkonversi dari dua konformasi (E1 dan E2) dari pengangkut. Dikonformasi E1, keduanya situs pengikatan Ca^{2+} terbuka pada sisi sitosol RE atau retikulum sarkoplasma dan mengikat Ca^{2+} dengan afinitas tinggi. Pengikatan ATP dan Asp fosforilasi mendorong perubahan konformasi dari E1 ke E2 di mana situs pengikatan Ca^{2+} sekarang terbuka di sisi luminal membran dan afinitasnya terhadap

Ca²⁺ sangat berkurang, menyebabkan pelepasan Ca²⁺ ke dalam lumen. Melalui mekanisme ini, energi yang dilepaskan oleh hidrolisis ATP selama satu siklus fosforilasi-defosforilasi mendorong Ca²⁺ melintasi membran melawan gradien elektrokimia yang besar. Variasi pada mekanisme dasar ini terlihat pada Na⁺K⁺ ATPase dari membran plasma. *cotransport* (transport Bersama) ini menggabungkan phosphorylation-dephosphorylation dari residu Asp kritis, karena pergerakan simultan dari kedua Na⁺ dan K⁺ melawan gradien elektrokimianya. Na⁺K⁺ ATPase bertanggung jawab untuk mempertahankan konsentrasi Na⁺ yang rendah dan K⁺ yang tinggi dalam sel relatif terhadap cairan ekstraseluler. Untuk setiap molekul ATP yang diubah menjadi ADP dan Pi, transporter memindahkan dua ion K⁺ ke dalam dan tiga ion Na⁺ keluar melintasi membran plasma. Oleh karena itu, cotransport bersifat elektrogenik—menciptakan pemisahan muatan bersih melintasi membran; pada hewan, ini menghasilkan potensial membran 250 hingga 270 mV (di dalam negatif relatif terhadap luar) yang merupakan karakteristik sebagian besar sel dan penting untuk konduksi potensial aksi di neuron.

Materi Lipid dan Membran dapat di lihat pada video berikut ini.



Gambar 210 Lipid dan Membran
Sumber: Sukaryawan & Sari 2021

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke sebelas biokimia 1 pada pokok bahasan lipid dan membran yang telah disajikan, amatilah beberapa bahan pangan yang mengandung lemak disekitar daerah saudara? Mengapa manusia membutuhkan lemak?

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, kemudian amatilah didaerah sekeliling anda beberapa produk makanan yang bahan bakunya dari lemak. Bagaimana proses pengolahan pangan tersebut?

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang pengolahan lemak menjadi produk makanan. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang pengolahan lemak menjadi produk makanan. Buatlah analisa hasil yang menunjukkan kandungan lemak pada produk makanan yang dibuat. Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

4. APLIKASI

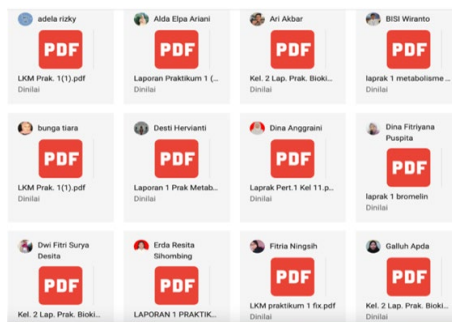
Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang pengolahan lemak menjadi produk makanan. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di apload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal berikut ini.

- a. Bahaslah bersama kelompok saudara bagaimana kandungan lemak pada bahan makanan yang saudara buat? Perkuatlah literatur saudara yang berasal dari berbagai jurnal yang berhubungan.
- b. Bahaslah bersama kelompok saudara jenis lemak yang dikandung pada masing-masing bahan makanan tersebut. Berdasarkan unit penyusunnya, golongkanlah lemak yang sudara ketahui?
- c. Bahaslah bersama kelompok saudara jenis transport aktif dan transport pasif yang terjadi?

- d. Tulislah struktur senyawa golongan lemak pada bahan makanan tersebut?
- e. Bahaslah mengapa manusia mandi supaya bersih menggunakan sabun?

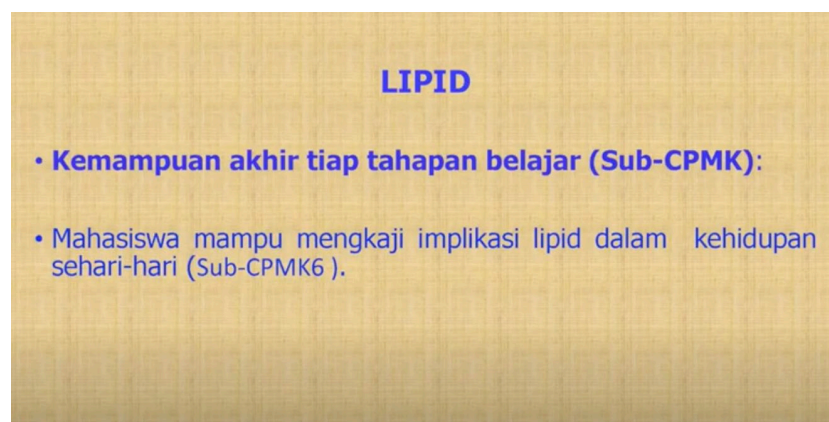
5. REFLEKSI

Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 11 Lipid dan membran". Selanjutnya laporan lipid dan membran tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id>. Laporan 11 lipid dan membran minimal memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka. Contoh submit laporan 11 Lipid



Gambar 211 Submit Laporan 10 Karbohidrat

Materi perkuliahan pokok bahasan lipid dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.



Gambar 212 Paparan materi Lipid dan Membran

Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di submit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

- 1 Sifat fisik asam lemak sangat ditentukan oleh panjang dan derajat ketidakjenuhan rantai hidrokarbonnya. Rantai hidrokarbon menyebabkan kelarutan asam lemak dalam air sangat rendah. Semakin panjang rantai asam lemak dan semakin sedikit ikatan rangkap, semakin rendah kelarutannya dalam air. Jelaskan mengapa demikian?
- 2 Dari asam lemak tak jenuh diperlukan dalam makanan manusia karena bersifat esensial. Asam linoleat adalah prekursor asam arakidonat, yang digunakan untuk sintesis eikosanoid (misalnya, prostaglandin). Asam Linolenat adalah prekursor asam lemak -3 asam eicosapentaenoic dan asam dokosaheksaenoat yang merupakan asam lemak penting yang ditemukan di membran retina. Tuliskan dan jelaskan struktur asam lemak berikut ini:
 - a Asam palmitoleat
 - b Asam oleat
 - c Asam Linoleat
 - d Asam alfa linoleat
 - e Asam arakidonat
- 3 Dalam beberapa kasus, protein membran hanya memfasilitasi difusi zat terlarut menuruni gradien konsentrasinya, tetapi transport juga dapat terjadi melawan gradien konsentrasi, muatan listrik, atau keduanya, dalam hal ini proses membutuhkan energi. Energi dapat datang langsung dari hidrolisis ATP atau dapat disuplai dalam bentuk satu zat terlarut yang bergerak menuruni gradien elektrokimiawinya, yang menyediakan energi yang cukup untuk mendorong zat terlarut lain ke atas gradiennya. Jelaskanlah dan gambarkan mekanisme transport aktif dan transport pasif.

- 4 Titik leleh serangkaian asam lemak dengan 18 karbon adalah sebagai berikut: asam stearat ($69,6^\circ$), asam oleat ($13,4^\circ$), asam linoleat (-5°), dan asam linolenat (-11°). Aspek struktural manakah pada asam lemak 18 karbon ini yang dapat dihubungkan dengan titik leleh? Berikanlah penjelasan molekular bagi kecenderungan pola titik leleh ini?
- 5 Lemak yang digunakan untuk memasak, seperti mentega segera rusak dalam keadaan terbuka ke udara pada suhu kamar, sedangkan jenis yang lain seperti 'shortening' (Crisco) padat tetap utuh. Mengapa? Jelaskan?
- 6 Selama persiapan saus bearnaise, fosfatidilkolin (lesitin) dari kuning telur menyatu ke dalam mentega cair untuk menstabilkan saus dan mencegah pemisahan. Kemukakan, mengapa demikian?
- 7 Muatan Listrik Total Fosfolipida. Pada pH 7,0 berapakah muatan listrik dari (a) fosfatidilkolin, (b) fosfatidiletanolamin, dan (c) fosfatidilserin?
- 8 Perlindungan Tanaman Sukulen. Permukaan tanaman sukulen yang biasa tumbuh di daerah kering biasanya ditutupi oleh lapisan lilin? Bagaimanakah hal ini dapat membantu tanaman untuk bertahan?
- 9 Sebutkanlah produk dari hidrolisis ringan terhadap senyawa-senyawa di bawah ini, dengan mempergunakan sodium hidroksida.
 - (a) 1-stearoil-2,3-dipalmitoilgliserol
 - (b) 1-palmitoil-2-oleil fosfatidilkolin
 Apakah produk dari kerja NaOH panas pekat terhadap senyawa (b)?
1. Jumlah Molekul Detergen per Misel. Jika sejumlah kecil sodium dodesil sulfat [$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3^-$, Na^+ , suatu detergen komersial yang umum dipergunakan] di larutkan di dalam air, ion detergen melarut ke dalam air sebagai bentuk monomer. Dengan penambahan lebih banyak detergen, dicapai suatu keadaan (konsentrasi kritis dari misel) yang memungkinkan monomer bergabung membentuk misel (Gambar 12-16). Konsentrasi kritis

misel dari sodium dodesil sulfat adalah 8,2 mM. Pengamatan terhadap misel memperlihatkan bahwa bentuk ini mempunyai berat molekul 18,000. Hitunglah jumlah molekul detergen di dalam misel rata-rata.

2. Unit Hidrofobik dan Hidrofilik dari Lipida Membran. Ciri struktural yang umum dari molekul lipida membran adalah sifat amfipatiknya, yaitu, molekul ini mengandung ke dua gugus hidrofobik dan hidrofilik. Sebagai contoh, pada fosfatidilkolin, kedua rantai asam lemak bersifat hidrofobik, dan gugus kepala fosfokolin merupakan bagian hidrofilik dari molekul. Bagi tiap-tiap lipida membran di bawah ini, berikanlah nama unit penyusun yang berperan sebagai unit hidrofobik dan hidrofilik:
 - (a) fosfatidiletanolamin
 - (b) spingomielin
 - (c) galaktoserebrosida
 - (d) gangliosida
 - (e) kolesterol

3. Sifat-sifat Lipida dan Lapisan Ganda Lipida. Lapisan ganda lipida yang dibentuk di antara dua fase cair memiliki tiga sifat penting, molekul ini membentuk lembaran dua dimensi, sisi lembaran menutup terhadap molekul itu sendiri, dan lembaran ini juga dapat menyambung dirinya sendiri membentuk liposom.
 - (a) Sifat lipida manakah yang memungkinkan sifat-sifat lapisan ganda di atas? Terangkan.
 - (b) Konsekuensi biologi manakah yang ditimbulkan oleh sifat-sifat ini, dipandang dari struktur membran biologi?

DAFTAR PUSTAKA

1. Buckle, K.A, R.A Edwards, G.H. Fleet, and M. Wootton. 2007. Ilmu Pangan (Food Science). Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press).
2. Genomis Lab. 2013. *How to estimate carbohydrate by anthrone method*. <https://youtu.be/VzYDk4t97Ok>. di akses pada tanggal 3 November 2020.
3. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
4. Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
5. Methew, Holde, V., Ahern. 2000. *Biochemistry*. Sanfrancisco: Addison Wesley P.C
6. Sukaryawan, M. 2004. *Biokimia*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
7. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
8. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
9. Thenawidjaja. 1990. *Dasar-dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
10. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
11. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
12. Winarno, F.G. 2004. *Kimia Pangan dan Gizi*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta

BAB 9 PENCERNAAN MAKANAN

1. ORIENTASI

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa menguasai pondasi metode saintifik dan integritas akademik serta prinsip-prinsip penggunaan Teknologi Informasi dan Komunikasi dalam pembelajaran kimia, penelitian dan karya ilmiah (CPMK3), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi pencernaan makanan (Sub-CPMK3). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

Makanan merupakan faktor utama yang menentukan kesehatan individu, bahan pangan yang kurang bergizi dan waktu yang tidak teratur dapat menyebabkan kesehatan terganggu. Jumlah zat makanan yang kita makan tidak sama, tergantung kebutuhan tubuh. Sistem kerja organ-organ pencernaan makanan yang kemudian mengolah bahan-bahan makanan tersebut menjadi energi untuk makhluk hidup beraktivitas.

Makhluk hidup memerlukan energi untuk pemeliharaan, pertumbuhan, reproduksi, dan bekerja. Untuk hampir semua Makhluk hidup, energi adalah dari makanan yang diperoleh (secara langsung atau secara tidak langsung) dari tumbuhan. Metabolisme adalah suatu istilah yang umum yang mengacu pada penjumlahan dari semua perubahan tenaga biologi dan bahan. Bahan makanan yang kita makan belum dapat dimanfaatkan oleh sel-sel tubuh manakala makanan tersebut belum mengalami proses pencernaan, kecuali: air, vitamin, dan mineral. Beberapa bahan pangan yang diperlukan oleh tubuh adalah sebagai berikut : protein, lipid, karbohidrat vitamin dan mineral.

Protein mengandung asam amino essensial dan non essensial, Protein merupakan zat makanan yang berfungsi untuk membangun tubuh dan memperbaiki

jaringan dan sel yang rusak. Asam amino esensial adalah asam amino yang tidak dapat dibuat sendiri oleh tubuh, jadi harus didatangkan dari luar, sedangkan asam amino non esensial merupakan asam amino yang dapat dibuat di dalam tubuh manusia. Lemak (Lipid) diperlukan sebagai pelarut beberapa vitamin, sebagai pelindung jaringan tubuh dan penghasil energi. Contoh lemak hewani adalah daging, keju, minyak ikan, telur, dan mentega. Adapun lemak nabati adalah lemak yang berasal dari tumbuh-tumbuhan seperti kelapa, kacang tanah, dan margarin. Karbohidrat berfungsi sebagai penghasil energi, pembentuk membran sel, sumber utama karbohidrat adalah bahan pangan seperti nasi, jagung, kue, roti, ubi, dan kentang.

Sistem pencernaan makanan adalah sistem organ dalam multisel yang menerima makanan, mencernanya menjadi energi, serta mengeluarkan sisa proses tersebut. Sistem pencernaan antara satu makhluk hidup dengan makhluk hidup yang lain berbeda-beda. Pada dasarnya sistem pencernaan makanan dalam tubuh manusia terjadi di sepanjang saluran pencernaan dan dibagi menjadi 3 bagian, yaitu proses penghancuran makanan yang terjadi dalam mulut hingga lambung. Selanjutnya adalah proses penyerapan sari-sari makanan yang terjadi di dalam usus dan proses pengeluaran sisa-sisa makanan melalui anus.

Pencernaan makanan adalah proses pemecahan zat-zat makanan sehingga dapat diabsorpsi oleh saluran pencernaan. Berdasarkan proses pencernaannya dapat dibedakan menjadi digesti makanan secara mekanis, enzimatik, dan mikrobiotik. Hasil akhir proses pencernaan adalah terbentuknya molekul-molekul atau partikel-partikel makanan yakni: glukosa, asam lemak, dan asam amino yang siap diserap oleh mukosa saluran pencernaan. Selanjutnya, partikel-partikel makanan tersebut dibawa melalui sistem sirkulasi untuk diedarkan dan digunakan oleh sel-sel tubuh sebagai bahan untuk proses metabolisme sebagai sumber energi, zat pembangun, dan molekul-molekul fungsional (hormon, enzim) dan keperluan tubuh lainnya.

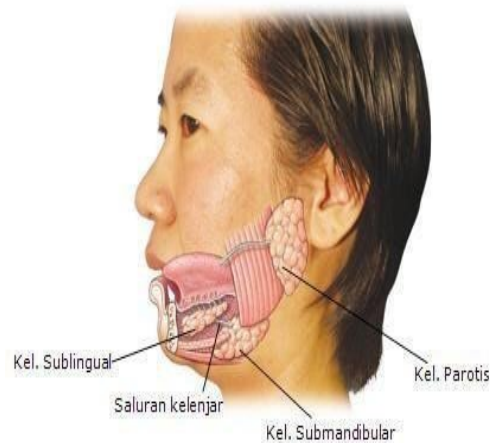
Pada manusia, makanan dicerna oleh alat-alat pencernaan yang dimulai dari mulut dan berakhir di usus. Hasil-hasil pencernaan kemudian diserap, sedangkan

sisa-sisa pencernaan dibuang melalui alat-alat pengeluaran khusus. Proses Pencernaan pada manusia makanan yang dimakan tidak dapat langsung diserap oleh tubuh melainkan melalui dua macam proses pencernaan yaitu:

1. Pencernaan secara mekanis merupakan proses pencernaan yakni dengan cara mematahkan partikel makanan yang semula besar menjadi lebih kecil. Proses pencernaan ini dilakukan dengan proses fisik atau mekanis. Misalnya seperti mengunyah makanan di dalam mulut, atau gerakan meremas-remas (gerakan peristaltic) yang ada di dalam lambung dan tenggorokan. Beberapa organ tubuh yang melakukan pencernaan mekanis adalah gigi, lambung atau kontraksi perut, dan empedu. Fungsi pencernaan mekanis adalah untuk meningkatkan luas permukaan dari makanan. Hal ini berguna dalam proses reaksi enzimatik atau proses reaksi yang memerlukan bantuan dari enzim, sehingga mampu meningkatkan laju reaksi kimia yang ada di dalam tubuh.
2. Pencernaan secara kimiawi merupakan jenis proses pencernaan yang menggunakan bahan kimiawi yang ada di dalam tubuh. fungsinya adalah merubah atau melakukan transformasi bentuk makanan yang awalnya besar, menjadi bentuk partikel yang lebih kecil. Reaksi yang berlangsung adalah reaksi enzimatik, yang berlangsung dalam sistem. Sistem pencernaan makanan pada manusia terdiri dari beberapa organ sebagai berikut.

A. Mulut

Proses pencernaan pertama kali terjadi di dalam rongga mulut. Di dalam rongga mulut, makanan dikunyah dan dihancurkan oleh gigi, dibantu oleh lidah. Dalam rongga mulut juga ada enzim yang membantu pencernaan yaitu enzim amilase. Gigi manusia terdiri atas gigi seri, gigi taring, dan gigi geraham.



Gambar 213 Rongga Mulut

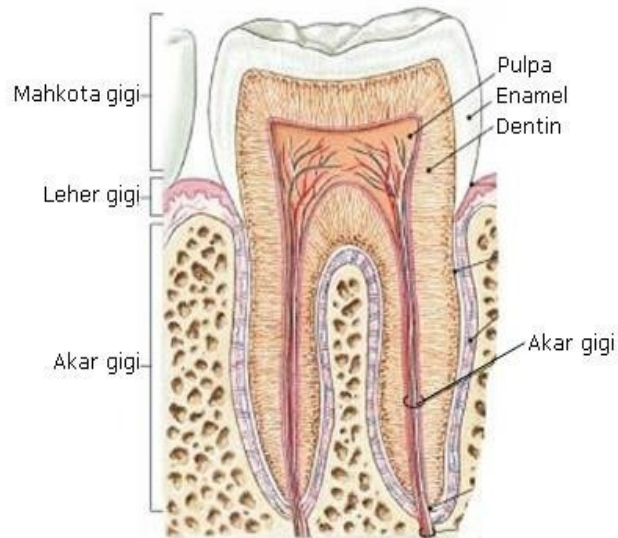
Pada Mulut terjadi proses memotong, mengoyak dan menggiling makanan menjadi partikel yang kecil-kecil. Di dalam rongga mulut terdapat dua organ sistem pencernaan, yaitu gigi dan lidah. Masing-masing organ sistem pencernaan yang terdapat di dalam rongga mulut memiliki peranan dalam proses pencernaan makanan.

1) Gigi (Dentin)

Gigi merupakan alat pencernaan mekanis, gigi berfungsi untuk memotong, mengoyak dan menggiling makanan menjadi partikel yang kecil-kecil. Di dalam gigi terdapat rongga gigi atau pulpa yang mengandung pembuluh darah dan urat syaraf. Bagian gigi yang masuk ke rahang dilapisi zat yang disebut semen. Bakteri yang hidup di sela-sela gigi adalah *Entamoeba gingivalis* yang berperan untuk menguraikan sisa-sisa makanan yang tertinggal di dalam mulut.

2) Lidah (Lingua)

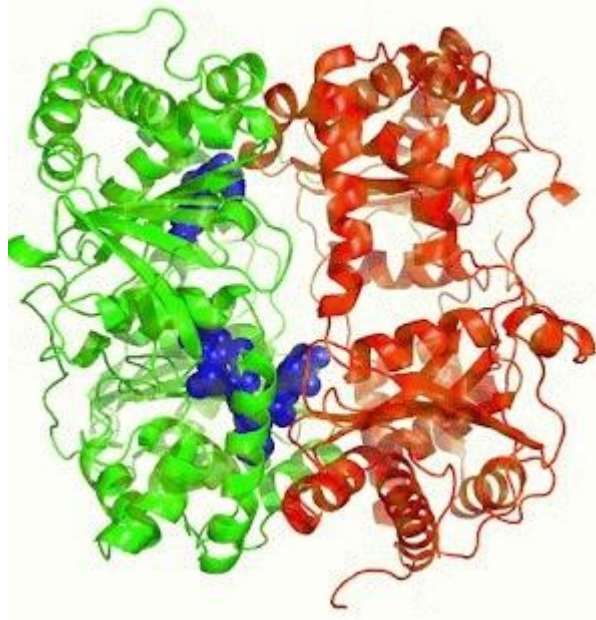
Permukaan lidah dilapisi oleh lapisan mukosa yang penuh dengan bintil-bintil (*papilla*) yang mengandung saraf pengecap. Lidah berfungsi sebagai indera pengecap makanan, mengatur makanan pada saat mengunyah dan menelan makanan, serta membantu menghasilkan suara ketika berbicara. Lidah juga berfungsi untuk membantu mencampur makanan dengan air liur dan mendorong makanan masuk ke esofagus.



Gambar 214 Anatomi Gigi

3) Kelenjar Ludah

Ada 3 kelenjar ludah pada rongga mulut. Ketiga kelenjar ludah tersebut menghasilkan ludah setiap harinya sekitar 1 sampai 2,5 liter ludah. Kandungan ludah pada manusia adalah : air, mucus, enzim amilase, zat antibakteri, dll. Fungsi ludah adalah melumasi rongga mulut serta mencerna karbohidrat menjadi disakarida.



Gambar 215 Enzim Amilase

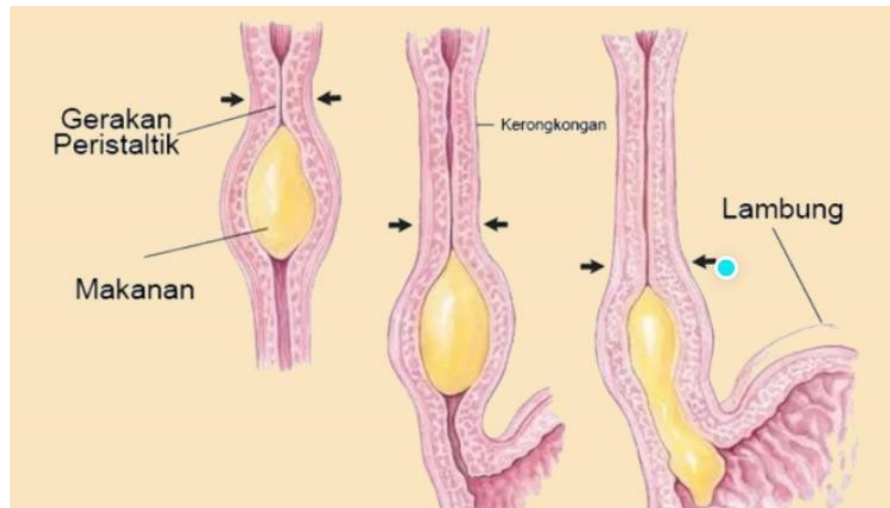
B. Faring (Pharynx)

Faring merupakan persilangan antara saluran makanan dan saluran udara. Epiglotis berperan sebagai pengatur (klep) kedua saluran tersebut. Pada saat menelan makanan saluran udara ditutup oleh epiglotis dan sebaliknya jika sedang menghirup nafas. Tekak merupakan pertemuan saluran pernapasan antara rongga hidung dengan tenggorokan dan saluran pencernaan antara rongga mulut dan kerongkongan. Tekak memiliki lubang yang menuju tenggorokan, disebut glotis dan ditutup oleh klep yang disebut epiglotis pada waktu proses menelan. Tekak terdiri dari tiga bagian, yaitu nasofaring, orofaring, dan tubaeustachius.

- a. Nasofaring adalah ruang di atas langit-langit lunak di bagian belakang hidung yang menghubungkan hidung ke mulut. Nasofaring memungkinkan seseorang bernapas melalui hidung. Langit-langit lunak memisahkan nasofaring dan orofaring. Nasofaring tetap terbuka bahkan ketika otot fleksibel sehingga manusia bisa terus melanjutkan fungsi pernapasan. Nasofaring dikelilingi oleh lipatan salpingopharyngeal dan tonsil tuba, yang dapat menjadi meradang ketika terinfeksi.
- b. Orofaring merupakan saluran pernapasan yang memiliki bentuk seperti tabung dan berada di antara faring dengan trakea,
- c. Tubaeustachius adalah saluran yang menghubungkan rongga telinga tengah dengan nasofaring, yaitu daerah di belakang hidung. Tubaeustachius selalu tertutup dan dalam keadaan steril, hanya terbuka apabila udara diperlukan masuk ke telinga tengah atau pada saat mengunyah, menelan, dan menguap

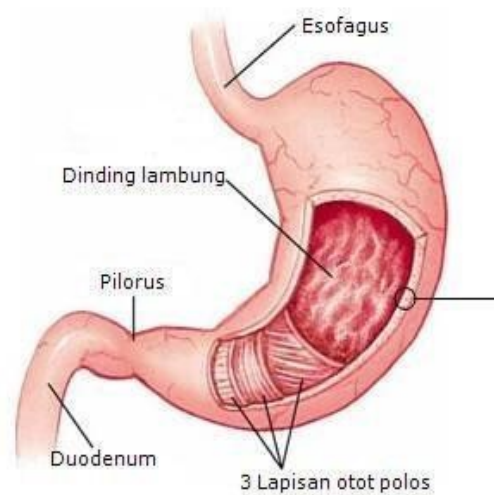
C. Esofagus (Kerongkongan)

Merupakan saluran yang menghubungkan antara rongga mulut dengan lambung. Pada ujung saluran esophagus setelah mulut terdapat daerah yang disebut faring. Pada faring terdapat klep, yaitu epiglotis yang mengatur makanan agar tidak masuk ke trakea (tenggorokan). Fungsi esophagus adalah menyalurkan makanan ke lambung. Agar makanan dapat berjalan sepanjang esophagus, terdapat gerakan peristaltik sehingga makanan dapat berjalan menuju lambung.



Gambar 216 Esofagus

D. Lambung

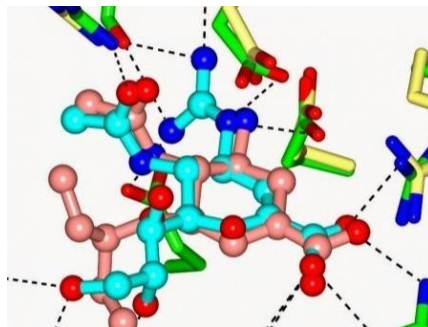


Gambar 217 Lambung

Di lambung makanan ditampung, disimpan, dan dicampur dengan asam lambung, lendir dan pepsin. Mukosa lambung banyak mengandung kelenjar pencernaan. Kelenjar pada bagian pilorika dan kardiaka menghasilkan lendir. Kelenjar pada fundus terdapat sel parietal (oxyntic cell) menghasilkan HCl, dan chief cell menghasilkan pepsinogen. Proses digesti di lambung meliputi: Pencernaan pada lambung sebatas pada protein, sangat sedikit lemak, dan karbohidrat. Absorpsi zat-

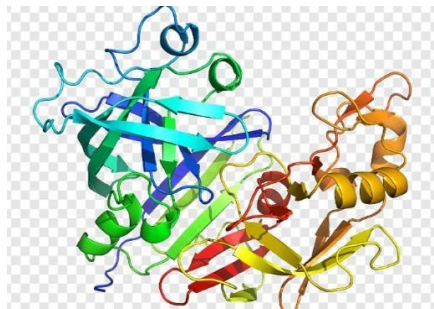
zat tertentu seperti; alkohol, obat-obatan. Makanan setelah melewati lambung menjadi dalam bentuk bubur makanan (chyme). Dengan mekanisme dorongan dari otot lambung chyme menuju ke usus dua belas jari (duodenum). Lambung adalah kelanjutan dari esophagus, berbentuk seperti kantung. Lambung dapat menampung makanan 1 liter hingga mencapai 2 liter. Dinding lambung disusun oleh otot-otot polos yang berfungsi menggerus makanan secara mekanik melalui kontraksi otot-otot tersebut. Ada 3 jenis otot polos yang menyusun lambung, yaitu otot memanjang, otot melingkar, dan otot menyerong. Selain pencernaan mekanik, pada lambung terjadi pencernaan kimiawi dengan bantuan senyawa kimia yang dihasilkan lambung. Senyawa kimiawi yang dihasilkan lambung adalah :

- Asam HCl, mengaktifkan pepsinogen menjadi pepsin. Sebagai disinfektan, serta merangsang pengeluaran hormon sekretin dan kolesistokinin pada usus halus.
- Lipase , Memecah lemak menjadi asam lemak dan gliserol. Namun lipase yang dihasilkan sangat sedikit.



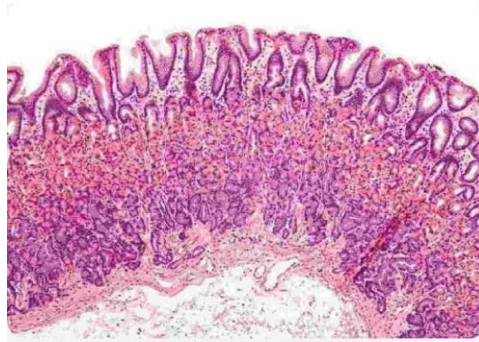
Gambar 218 Lipase

- Renin , Mengendapkan protein pada susu (kasein) dari air susu (ASI). Hanya dimiliki oleh bayi.



Gambar 219 Renin

- Mukus , Melindungi dinding lambung dari kerusakan akibat asam HCl.



Gambar 220 Mukus

Hasil penggerusan makanan di lambung secara mekanik dan kimiawi akan menjadikan makanan menjadi bubur. Adapun fungsi lambung adalah sebagai berikut.

- a. Merangsang keluarnya sekretin
- b. Mengaktifkan Pepsinogen menjadi Pepsin untuk memecah protein.
- c. Desinfektan
- d. Merangsang keluarnya hormon Kolesistokinin yang berfungsi merangsang empedu mengeluarkan getahnya.

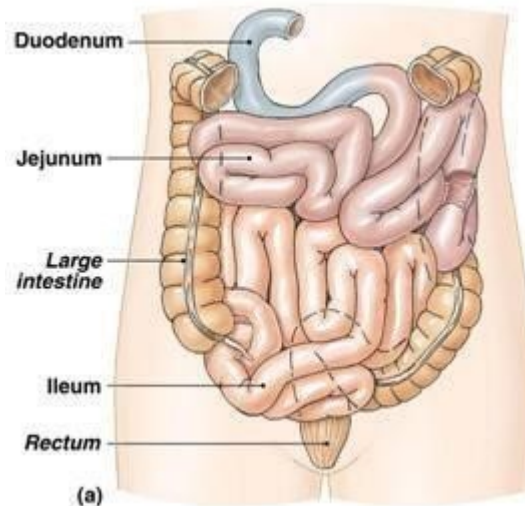
Dinding lambung juga menghasilkan hormon gastrin yang langsung diserap pembuluh darah. Hormon gastrin berfungsi untuk merangsang pengeluaran getah lambung. Makanan hasil dari pencernaan di rongga mulut disebut bolus. Bolus kemudian dicerna lagi di lambung selama kurang lebih 10 menit. Seluruh makanan dalam lambung kemudian meninggalkan lambung setelah kurang lebih 6 jam terisi makanan. Makanan dalam lambung teraduk dan bercampur dengan getah lambung sehingga berbentuk seperti bubur yang disebut chymus (bubur kim). Pada bagian ujung pylorus, terdapat otot sfingter yang berfungsi untuk mengatur chymus turun ke usus halus. Turunnya chymus dari lambung melalui pilorus dibantu oleh gerak peristaltik. Gerak peristaltik merupakan kontraksi otot-otot lambung di sekitar chyme yang dapat menyebabkan chyme terdorong menuju usus halus.

Dengan demikian, di lambung terjadi pula pencernaan makanan secara mekanis oleh gerak peristaltik. Getah lambung (sucus gastrikus) dihasilkan 2-3 liter/hari dengan pH 1,0– 1,5 sehingga mampu membunuh kuman-kuman dalam

makanan. Pengeluaran getah lambung sangat dipengaruhi oleh banyaknya makanan yang masuk ke lambung. Jika makanan yang masuk sedikit, tetapi sekresi HCl (asam klorida) berlebihan, maka dinding lambung akan rusak dan menimbulkan radang (ulkus). Macam-macam getah lambung adalah sebagai berikut: HCl dapat mengaktifkan pepsinogen menjadi pepsin untuk memecah protein menjadi pepton. Renin terdapat pada anak hewan yang juga terdapat pada tubuh manusia, berfungsi untuk menggumpalkan susu. Lipase lambung untuk menghidrolisis lemak

E. Usus Halus

Usus halus merupakan kelanjutan dari lambung. Usus halus memiliki panjang sekitar 6-8 meter. Usus halus terbagi menjadi 3 bagian yaitu duodenum (\pm 25 cm), jejunum (\pm 2,5 m), serta ileum (\pm 3,6 m). Pada usus halus hanya terjadi pencernaan secara kimiawi saja, dengan bantuan senyawa kimia yang dihasilkan oleh usus halus serta senyawa kimia dari kelenjar pankreas yang dilepaskan ke usus halus.



Gambar 221 Usus Halus

Senyawa yang dihasilkan oleh usus halus adalah :

- Disakaridase menguraikan disakarida menjadi monosakarida
- Erepsinogen erepsin yang belum aktif yang akan diubah menjadi erepsin. Erepsin mengubah pepton menjadi asam amino.

- Hormon sekretin merangsang kelenjar pancreas mengeluarkan senyawa kimia yang dihasilkan ke usus halus
- Hormon CCK (Kolesistokinin) merangsang hati untuk mengeluarkan cairan empedu ke dalam usus halus.
-

Selain itu, senyawa kimia yang dihasilkan kelenjar pankreas adalah :

- Bikarbonat menetralkan suasana asam dari makanan yang berasal dari lambung
- Enterokinase mengaktifkan erepsinogen menjadi erepsin serta mengaktifkan tripsinogen menjadi tripsin. Tripsin mengubah pepton menjadi asam amino.
- Amilase mengubah amilum menjadi disakarida, Lipase Mencerna lemak menjadi asam lemak dan gliserol.
- Kimotripsin mengubah peptone menjadi asam amino
- Nuklease menguraikan nukleotida menjadi nukleosida dan gugus pospat
- Hormon insulin menurunkan kadar gula dalam darah sampai menjadi kadar normal
- Hormon glukagon menaikkan kadar gula darah sampai menjadi kadar normal

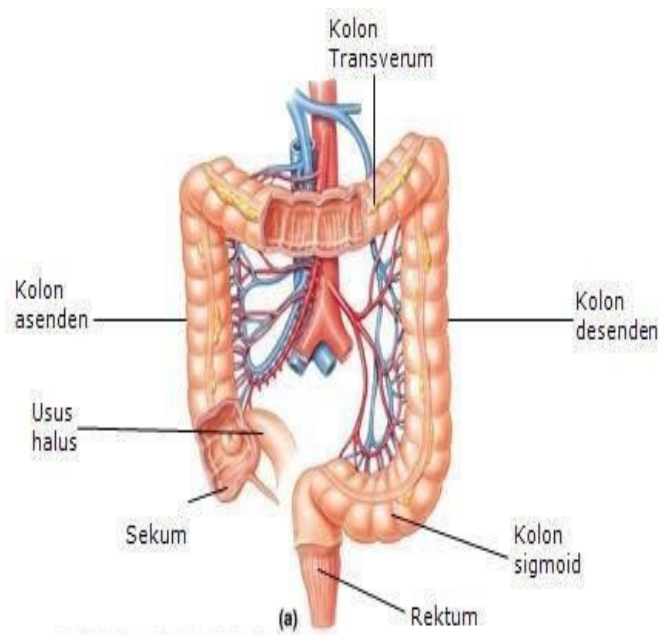
Pencernaan makanan secara kimiawi pada usus halus terjadi pada suasana basa.

Prosesnya sebagai berikut :

- a. Makanan yang berasal dari lambung dan bersuasana asam akan dinetralkan oleh bikarbonat dari pancreas.
- b. Makanan yang kini berada di usus halus kemudian dicerna sesuai kandungan zatnya. Makanan dari kelompok karbohidrat akan dicerna oleh amylase pancreas menjadi disakarida. Disakarida kemudian diuraikan oleh disakaridase menjadi monosakarida, yaitu glukosa. Glukaosa hasil pencernaan kemudian diserap usus halus, dan diedarkan ke seluruh tubuh oleh peredaran darah.
- c. Makanan dari kelompok protein setelah dilambung dicerna menjadi pepton, maka pepton akan diuraikan oleh enzim tripsin, kimotripsin, dan erepsin menjadi asam amino. Asam amino kemudian diserap usus dan diedarkan ke seluruh tubuh oleh peredaran darah.

- d Makanan dari kelompok lemak, pertama-tama akan dilarutkan (diemulsifikasi) oleh cairan empedu yang dihasilkan hati menjadi butiran-butiran lemak (droplet lemak). Droplet lemak kemudian diuraikan oleh enzim lipase menjadi asam lemak dan gliserol. Asam lemak dan gliserol kemudian diserap usus dan diedarkan menuju jantung oleh pembuluh limfe.

F. Usus Besar (Kolon)



Gambar 222 Usus Besar

Merupakan usus yang memiliki diameter lebih besar dari usus halus. Memiliki panjang 1,5 meter, dan berbentuk seperti huruf U terbalik. Usus besar dibagi menjadi 3 daerah, yaitu : Kolon asenden, Kolon Transversum, dan Kolon desenden.

Fungsi kolon adalah :

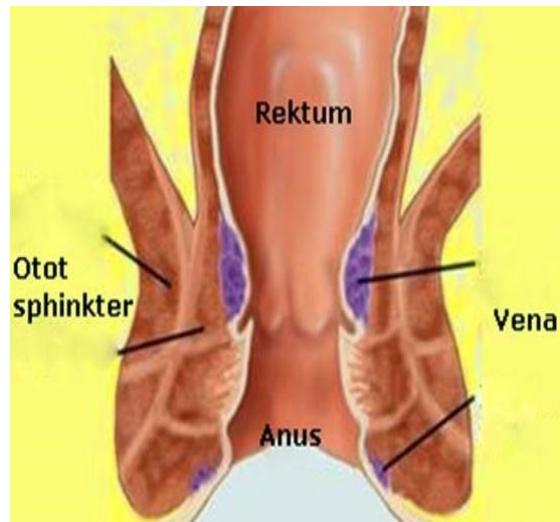
- Menyerap air selama proses pencernaan.
- Tempat dihasilkannya vitamin K, dan vitamin H (Biotin) sebagai hasil simbiosis dengan bakteri usus, misalnya E.coli.
- Membentuk massa feses mendorong sisa makanan hasil pencernaan (feses) keluar dari tubuh. Pencernaan zat makanan untuk kebutuhan absorpsi sudah tidak ada lagi dalam usus besar. Yang ada hanya penyerapan air dan elektrolit untuk memadatkan chymus yang masih dalam bentuk cair. Chymus dalam usus besar

berupa bahan-bahan yang tidak dapat diserap di usus halus misalnya selulosa dari tumbuhan yang nantinya akan memberikan bentuk feces dan dibuang melalui anus.

Dalam usus besar terdapat bakteri yang dapat mencernakan sebagian kecil selulosa untuk nutrisi bakteri itu sendiri. Aktivitas bakteri ini membentuk beberapa vitamin K, B12, tiamin, riboflavin dan gas-gas karbondioksida, hidrogen dan metana. Vitamin K sangat penting dalam proses pembekuan darah dan hanya ada dalam jumlah yang sedikit dalam makanan kita. Chymus makin ke arah anus makin padat dan dikeluarkan sebagai feces melalui proses defekasi (buang air besar).

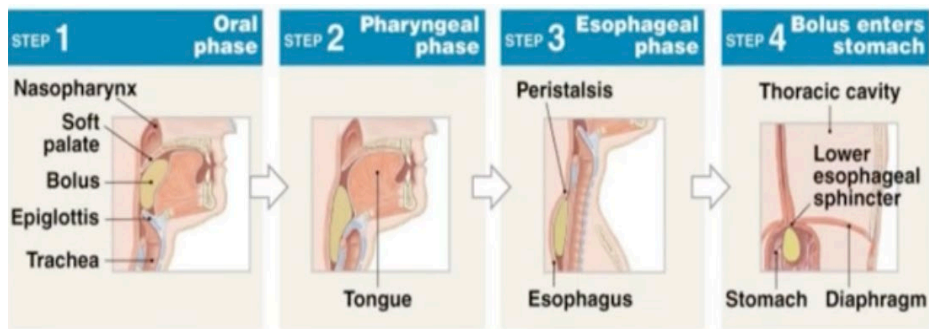
G. Rektum dan Anus

Rektum adalah organ terakhir dari usus besar pada beberapa jenis mamalia yang berakhir di anus. Organ ini berfungsi sebagai tempat penyimpanan sementara feces. Mengembangnya dinding rektum karena penumpukan material di dalam rektum akan memicu sistem saraf yang menimbulkan keinginan untuk melakukan defekasi. Jika defekasi tidak terjadi, sering kali material akan dikembalikan ke usus besar, di mana penyerapan air akan kembali dilakukan. Jika defekasi tidak terjadi untuk periode yang lama, konstipasi dan pengerasan feces akan terjadi. Apabila feces sudah siap dibuang maka otot spinkter rectum mengatur pembukaan dan penutupan anus. Otot spinkter yang menyusun rektum ada 2, yaitu otot polos dan otot lurik. Dalam anatomi, anus adalah sebuah bukaan dari rektum ke lingkungan luar tubuh. Pembukaan dan penutupan anus diatur oleh otot sphinkter. Feses dibuang dari tubuh melalui proses defekasi yang merupakan fungsi utama anus.



Gambar 223 Rektum

Materi Pencernaan Makanan dapat di lihat pada video berikut ini.



Gambar 224 Pencernaan Makanan
Sumber: Sukaryawan & Sari 2021

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke dua belas biokimia 1 pada pokok bahasan pencernaan makanan yang telah disajikan, kemudian bahaslah mengapa manusia membutuhkan makanan? Bagaimana proses pencernaan makanan tersebut?

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, setelah saudara diskusikan mengenai proses pencernaan makanan, Bagaimanakah reaksi enzimatik berlangsung pada proses pencernaan makanan? Apakah proses tersebut keseluruhannya merupakan reaksi enzimatik? Kerjakanlah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan.

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang proses pencernaan karbohidrat, protein dan lemak pada manusia. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang proses pencernaan karbohidrat, protein dan lemak pada manusia. Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

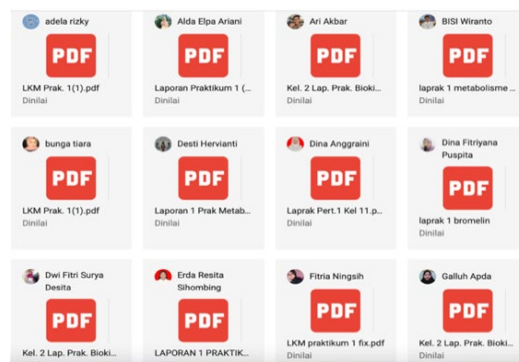
4. APLIKASI

Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang proses pencernaan karbohidrat, protein dan lemak pada manusia. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di upload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal-hal berikut ini.

- a. Bahaslah reaksi enzimatik dan non enzimatik yang terjadi proses pencernaan karbohidrat, protein dan lemak pada manusia?
- b. Buatlah tabel enzim-enzim apa saja yang berperan dalam proses pencernaan karbohidrat, protein dan lemak yang memuat substrat, nama enzim dan produk reaksinya.
- c. Bahaslah senyawa-senyawa yang terbentuk dari hasil akhir proses pencernaan makanan yang diserap oleh usus halus, kemudian jelaskan proses selanjutnya senyawa-senyawa tersebut?

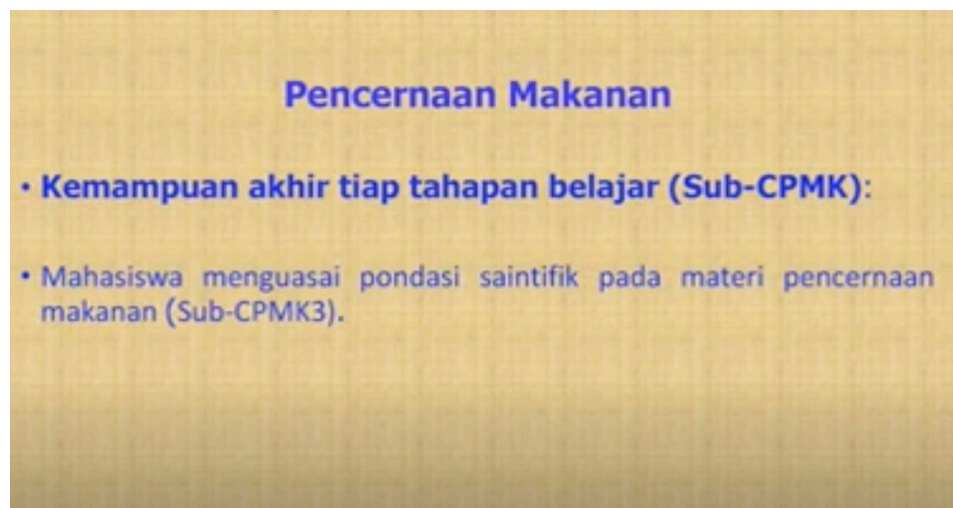
5. REFLEKSI

Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 12 pencernaan makanan". Selanjutnya laporan tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id>. Laporan 12 pencernaan makanan memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka. Contoh submit laporan 12 Pencernaan makanan



Gambar 225 Submit Laporan 12 Pencernaan makanan

Materi perkuliahan pokok pencernaan makanan dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.

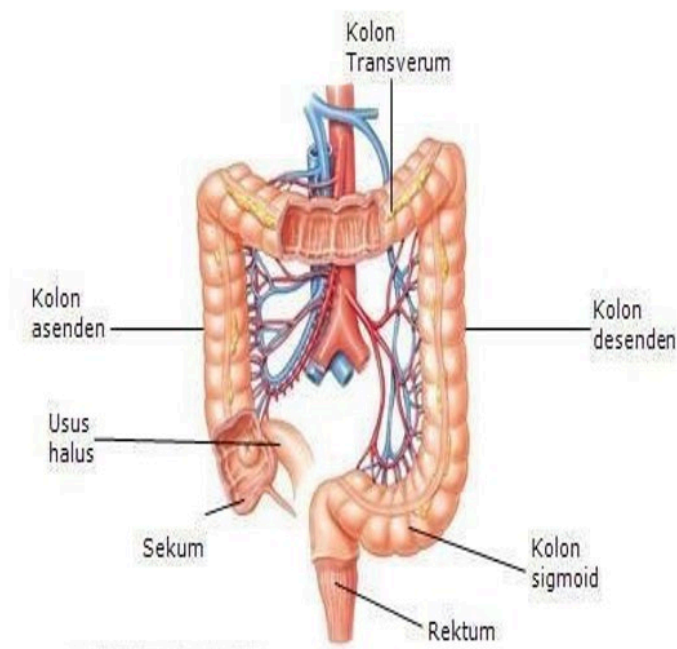


Gambar 226 Paparan materi Pencernaan Makanan

Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di submit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

1. Pada manusia, makanan dicerna oleh alat-alat pencernaan yang dimulai dari mulut dan berakhir di usus. Hasil-hasil pencernaan kemudian diserap, sedangkan sisa-sisa pencernaan dibuang melalui alat-alat pengeluaran khusus. Tuliskan dan jelaskan mekanisme pencernaan yang terjadi di mulut, lambung dan usus.
2. Proses pencernaan makanan banyak melibatkan enzim-enzim seperti enzim amilase, lipase, kimotripsin, tripsin. Jelaskan fungsi enzim-enzim tersebut dalam proses pencernaan makanan.
3. Usus besar Merupakan usus yang memiliki diameter lebih besar dari usus halus. Memiliki panjang 1,5 meter, dan berbentuk seperti huruf U terbalik. Usus besar dibagi menjadi 3 daerah, yaitu : Kolon asenden, Kolon Transversum, dan Kolon desenden. Jelaskanlah fungsi bagian masing-masing seperti yang tertera pada gambar dibawah ini.



DAFTAR PUSTAKA

1. Buckle, K.A, R.A Edwards, G.H. Fleet, and M. Wootton. 2007. Ilmu Pangan (Food Science). Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press).
2. Genomis Lab. 2013. *How to estimate carbohydrate by anthrone method*. <https://youtu.be/VzYDk4t97Ok>. di akses pada tanggal 3 November 2020.
3. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
4. Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
5. Methew, Holde, V., Ahern. 2000. *Biochemistry*. Sanfrancisco: Addison Wesley P.C
6. Sukaryawan, M. 2004. *Biokimia*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
7. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
8. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
9. Thenawidjaja, M. 1990. *Dasar-Dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
10. Sabirin Matsjeh, dkk. 1994. *Kimia Organik II*. Yogyakarta : Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.
11. Stryer L. 1996. *Biokimia, Edisi IV, Penerjemah: Sadikin dkk (Tim Penerjemah Bagian Biokimia FKUI)*, Jakarta: EGC.
12. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
13. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
14. Winarno, F.G. 2004. *Kimia Pangan dan Gizi*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta

BAB 10 BIOENERGITIKA

1. ORIENTASI

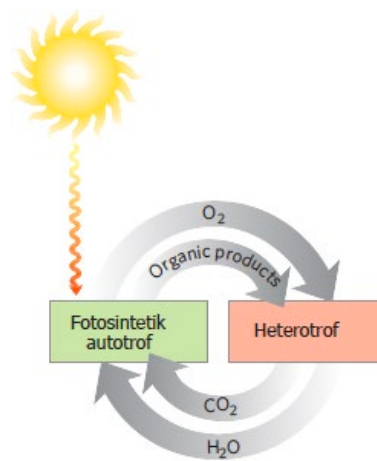
Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa menguasai pondasi saintifik materi biokimia (CPMK3), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah mahasiswa menguasai pondasi saintifik materi Bioenergitika (Sub-CPMK3). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

Metabolisme adalah aktivitas seluler yang sangat terkoordinasi di mana banyak sistem multi enzim (jalur metabolisme) bekerja sama untuk (1) memperoleh energi kimia dengan menangkap energi matahari atau menurunkan nutrisi kaya energi dari lingkungan; (2) mengubah molekul nutrisi menjadi molekul karakteristik sel itu sendiri, termasuk prekursor makromolekul; (3) mempolimerisasi prekursor monomer menjadi makromolekul: protein, asam nukleat, dan polisakarida; dan (4) mensintesis dan mendegradasi biomolekul yang diperlukan untuk fungsi seluler khusus, seperti lipid membran, pembawa pesan intraseluler, dan pigmen.

Meskipun metabolisme mencakup ratusan reaksi katalis enzim yang berbeda, prioritas jalur metabolisme pusat, yang jumlahnya sedikit dan sangat mirip dalam semua bentuk kehidupan. Organisme hidup dapat dibagi menjadi dua kelompok besar menurut bentuk kimia di mana mereka memperoleh karbon dari lingkungan. Autotrof (seperti bakteri fotosintetik, ganggang hijau, dan tumbuhan berpembuluh) dapat menggunakan karbon dioksida dari atmosfer sebagai satu-satunya sumber karbon mereka, untuk membangun semua biomolekul yang mengandung karbon. Beberapa organisme autotrofik, seperti cyanobacteria, juga dapat menggunakan nitrogen atmosfer untuk menghasilkan semua komponen nitrogennya. Heterotrof tidak dapat menggunakan karbon dioksida atmosfer dan harus memperoleh karbon dari lingkungannya dalam bentuk molekul organik

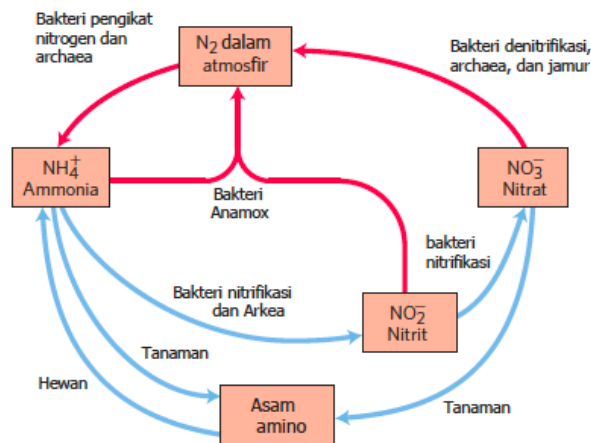
yang relatif kompleks seperti glukosa. Hewan multiseluler dan sebagian besar mikroorganisme adalah heterotrofik. Sel dan organisme autotrofik relatif mandiri, sedangkan sel dan organisme heterotrofik, dengan kebutuhan karbonnya dalam bentuk yang lebih kompleks, harus hidup dari produk organisme lain.

Banyak organisme autotrofik yang berfotosintesis dan memperoleh energinya dari sinar matahari, sedangkan organisme heterotrof memperoleh energinya dari degradasi nutrisi organik yang dihasilkan oleh autotrof. Di biosfer kita, autotrof dan heterotrof hidup bersama dalam siklus yang luas dan saling bergantung di mana organisme autotrofik menggunakan karbon dioksida atmosfer untuk membangun biomolekul organik mereka, beberapa di antaranya menghasilkan oksigen dari air dalam prosesnya. Heterotrof pada gilirannya menggunakan produk organik autotrof sebagai nutrisi dan mengembalikan karbon dioksida ke atmosfer. Beberapa reaksi oksidasi yang menghasilkan karbon dioksida juga mengkonsumsi oksigen, mengubahnya menjadi air. Jadi karbon, oksigen, dan air secara konstan berputar antara dunia heterotrofik dan autotrofik, dengan energi matahari sebagai kekuatan pendorong untuk proses global ini.



Gambar 227 Siklus karbon dioksida dan oksigen

Siklus karbon dioksida dan oksigen antara domain autotrofik (fotosintetik) dan heterotrofik di biosfer. Aliran massa melalui siklus ini sangat besar; sekitar 4×10^{11} metrik ton karbon diserahkan di biosfer setiap tahun.



Gambar 228 Siklus nitrogen di biosfer.
Gas nitrogen (N_2) membentuk 80% dari atmosfer bumi.

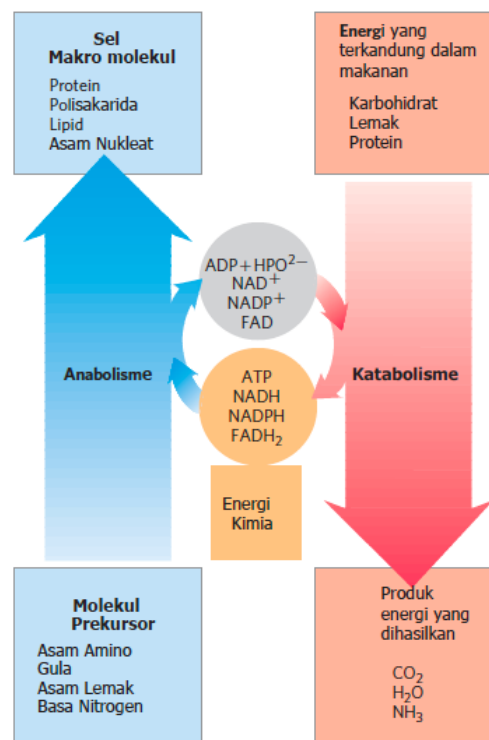
Dalam proses metabolisme, dan dalam semua transformasi energi, ada kehilangan energi yang berguna (energi bebas) dan peningkatan jumlah energi yang tidak dapat digunakan (panas dan entropi). Berbeda dengan siklus materi, oleh karena itu, energi mengalir satu arah melalui biosfer; organisme tidak dapat meregenerasi energi yang berguna dari energi yang hilang sebagai panas dan entropi. Karbon, oksigen, dan nitrogen didaur ulang secara terus-menerus, tetapi energi terus-menerus diubah menjadi bentuk yang tidak dapat dirgenerasi seperti panas.

Metabolisme, jumlah semua transformasi kimia yang terjadi dalam sel atau organisme, terjadi melalui serangkaian reaksi yang dikatalisis enzim yang membentuk jalur metabolisme. Setiap langkah berurutan dalam jalur metabolisme menghasilkan perubahan kimia kecil yang spesifik, biasanya penghilangan, pemindahan, atau penambahan atom atau gugus fungsi tertentu. Prekursor diubah menjadi produk melalui serangkaian zat antara metabolisme yang disebut metabolit. Istilah metabolisme perantara sering diterapkan pada aktivitas gabungan dari semua jalur metabolisme yang mengubah prekursor, metabolit, dan produk dengan berat molekul rendah (umumnya, M_r , 1.000).

Katabolisme adalah fase degradasi metabolisme di mana molekul nutrisi organik (karbohidrat, lemak, dan protein) diubah menjadi produk akhir yang lebih kecil dan lebih sederhana (seperti asam laktat, CO_2 , dan NH_3). Jalur katabolik

melepaskan energi, beberapa di antaranya disimpan dalam pembentukan ATP dan pembawa elektron tereduksi (NADH, NADPH, dan FADH₂); sisanya hilang sebagai panas. Dalam anabolisme, juga disebut biosintesis, prekursor kecil dan sederhana dibangun menjadi molekul yang lebih besar dan lebih kompleks, termasuk lipid, polisakarida, protein, dan asam nukleat. Reaksi anabolik memerlukan energi, umumnya berupa potensial transfer gugus fosforil ATP dan daya pereduksi NADH, NADPH, dan FADH₂.

Beberapa jalur metabolisme linier, dan beberapa bercabang, menghasilkan beberapa produk akhir yang berguna dari prekursor tunggal atau mengubah beberapa bahan awal menjadi satu produk. Secara umum, jalur katabolik bersifat konvergen dan jalur anabolik divergen. Beberapa jalur bersifat siklik: satu komponen awal dari jalur tersebut diregenerasi dalam serangkaian reaksi yang mengubah komponen awal lainnya menjadi produk.



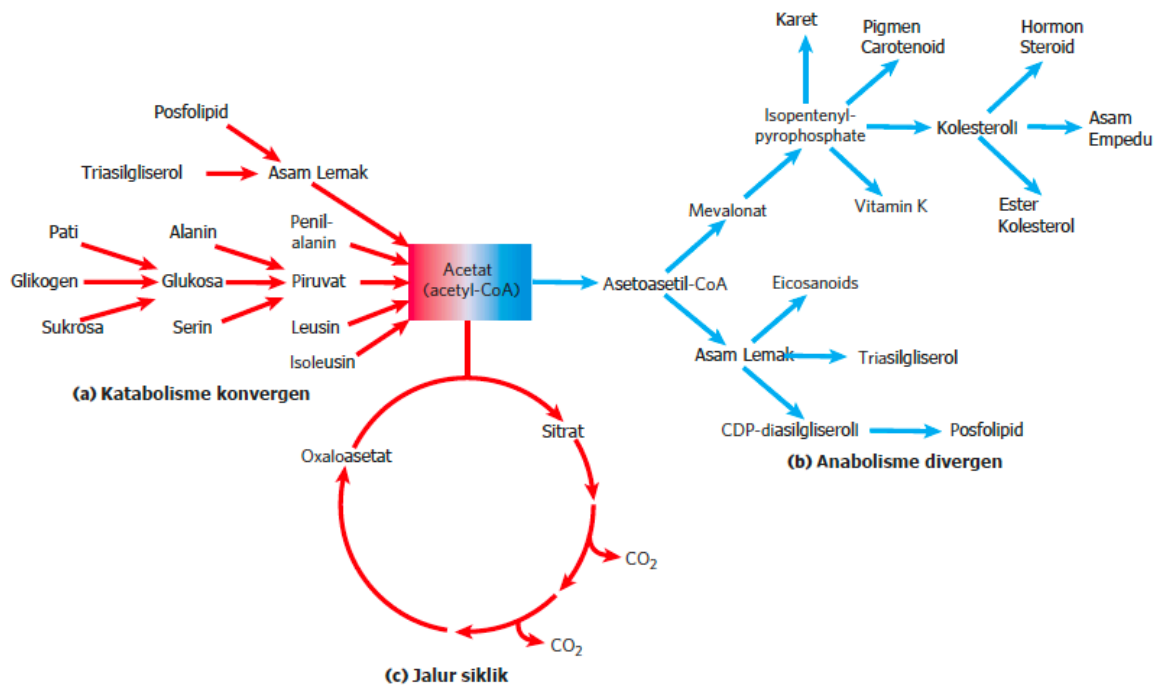
Gambar 229 Hubungan energi antara jalur katabolik dan anabolik. Jalur katabolik memberikan energi kimia dalam bentuk ATP, NADH, NADPH, dan FADH₂. Pembawa energi ini digunakan dalam jalur anabolik untuk mengubah molekul prekursor kecil menjadi makromolekul seluler.

Sebagian besar sel memiliki enzim untuk melakukan degradasi dan sintesis kategori penting biomolekul asam lemak, misalnya. Namun, sintesis dan degradasi asam lemak secara simultan akan sia-sia, dan ini dicegah dengan mengatur urutan reaksi anabolik dan katabolik secara timbal balik: ketika satu urutan aktif, urutan lainnya ditekan. Regulasi tersebut tidak dapat terjadi jika jalur anabolik dan katabolik dikatalisis oleh set enzim yang persis sama, beroperasi dalam satu arah untuk anabolisme, arah yang berlawanan untuk katabolisme: penghambatan enzim yang terlibat dalam katabolisme juga akan menghambat urutan reaksi dalam arah anabolik. Jalur katabolik dan anabolik yang menghubungkan dua titik akhir yang sama (glukosa \rightarrow piruvat, dan piruvat \rightarrow glukosa, misalnya) dapat menggunakan banyak enzim yang sama, tetapi selalu setidaknya satu langkah dikatalisis oleh enzim yang berbeda dalam proses katabolik dan anabolik, arah, dan enzim ini adalah situs regulasi terpisah.

Selain itu, untuk jalur anabolik dan katabolik pada dasarnya ireversibel, reaksi unik untuk setiap arah harus mencakup setidaknya satu yang secara termodinamika sangat menguntungkan dengan kata lain, reaksi baliknya sangat tidak menguntungkan. Sebagai kontribusi lebih lanjut untuk pengaturan terpisah dari urutan reaksi katabolik dan anabolik, jalur katabolik dan anabolik berpasangan biasanya terjadi di kompartemen seluler yang berbeda: misalnya, katabolisme asam lemak di mitokondria, sintesis asam lemak di sitosol. Konsentrasi zat antara, enzim, dan regulator dapat dipertahankan pada tingkat yang berbeda dalam kompartemen yang berbeda ini. Karena jalur metabolisme tunduk pada kontrol kinetik oleh konsentrasi substrat, kumpulan zat antara anabolik dan katabolik yang terpisah juga berkontribusi pada kontrol laju metabolisme. Perangkat yang memisahkan proses anabolik dan katabolik akan menjadi perhatian khusus dalam diskusi kita tentang metabolisme.

Jalur metabolisme diatur pada beberapa tingkatan, dari dalam sel dan dari luar. Regulasi yang paling segera adalah dengan ketersediaan substrat; ketika konsentrasi intraseluler substrat enzim dekat atau di bawah K_m (seperti yang biasa terjadi), laju reaksi sangat bergantung pada konsentrasi substrat. Jenis kontrol cepat kedua dari dalam adalah regulasi alosterik oleh zat antara metabolik atau koenzim asam amino atau ATP, misalnya yang menandakan keadaan metabolisme internal sel. Ketika sel

mengandung sejumlah, katakanlah, aspartat cukup untuk kebutuhan mendesaknya atau ketika tingkat seluler ATP menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar lebih lanjut tidak diperlukan pada saat ini, sinyal-sinyal ini secara alosterik menghambat aktivitas satu atau lebih enzim dalam jalur yang relevan. Pada organisme multiseluler, aktivitas metabolisme jaringan yang berbeda diatur dan diintegrasikan oleh faktor pertumbuhan dan hormon yang bekerja dari luar sel.



Gambar 230 Tiga jenis jalur metabolisme nonlinier
Sumber: Nelson & Cox, 2013.

(a) Konvergen, katabolik, (b) divergen, anabolik, dan (c) jalur siklik. Dalam (c), salah satu bahan awal (oksaloasetat dalam hal ini) diregenerasi dan masuk kembali ke jalur. Asetat, zat antara metabolisme utama, adalah produk pemecahan berbagai bahan bakar (a), berfungsi sebagai prekursor untuk berbagai produk (b), dan dikonsumsi dalam jalur katabolik yang dikenal sebagai siklus asam sitrat (c).

Dalam beberapa kasus, regulasi ini terjadi hampir seketika (kadang-kadang dalam waktu kurang dari satu milidetik) melalui perubahan tingkat pembawa pesan intraseluler yang memodifikasi aktivitas molekul enzim yang ada dengan mekanisme alosterik atau dengan modifikasi kovalen seperti fosforilasi. Dalam kasus lain, sinyal ekstraseluler mengubah konsentrasi seluler suatu enzim dengan mengubah laju sintesis atau degradasinya, sehingga efeknya terlihat hanya setelah beberapa menit atau jam.

Sel dan organisme hidup harus melakukan aktivitas untuk tetap hidup, tumbuh, dan bereproduksi. Kemampuan untuk memanfaatkan energi dan menyalurkannya ke dalam aktivitas biologi adalah sifat dasar semua organisme hidup. Organisme modern melakukan berbagai transduksi energi yang luar biasa, konversi satu bentuk energi ke bentuk energi lainnya. Organisme menggunakan energi kimia dalam bahan bakar untuk menghasilkan sintesis kompleks, molekul makro yang sangat teratur dari prekursor sederhana. Organisme juga mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik, menjadi gerakan dan panas, dan, dalam beberapa organisme seperti kunang-kunang dan beberapa ikan laut dalam, menjadi cahaya. Organisme fotosintetik mentransduksi energi cahaya menjadi semua bentuk energi.

Mekanisme kimia yang mendasari transduksi energi biologi telah menantang para ahli biologi selama berabad-abad. Antoine Lavoisier, menyadari bahwa hewan entah bagaimana mengubah bahan bakar kimia (makanan) menjadi panas dan bahwa proses respirasi ini penting bagi kehidupan. Dia mengamati bahwa ... "secara umum, respirasi tidak lain adalah pembakaran lambat karbon dan hidrogen, yang sepenuhnya mirip dengan apa yang terjadi pada lampu atau lilin yang menyala..."

Pada abad ini, studi biokimia telah mengungkapkan banyak bahan kimia yang mendasari "obor kehidupan" itu. Transduksi energi biologi mematuhi hukum fisika yang sama yang mengatur semua proses alam lainnya. Oleh karena itu, penting bagi seorang mahasiswa biokimia untuk memahami hukum-hukum ini dan bagaimana penerapannya pada aliran energi di biosfer. Dalam bab ini pertama-tama kita meninjau hukum termodinamika dan hubungan kuantitatif antara energi bebas, entalpi, dan entropi. Selanjutnya menjelaskan peran khusus ATP dalam pertukaran energi makhluk hidup. Akhirnya, mempertimbangkan pentingnya reaksi oksidasi-reduksi dalam sel hidup, energi dari reaksi transfer elektron, dan pembawa elektron yang biasa digunakan sebagai kofaktor dari enzim yang mengkatalisis reaksi ini.

A. Bioenergetika dan Termodinamika.

Bioenergetika adalah studi kuantitatif transduksi energi yang terjadi pada sel hidup dan sifat serta fungsi proses kimia yang mendasari transduksi ini. Meskipun banyak dari prinsip-prinsip termodinamika telah diperkenalkan dan mungkin familiar bagi anda, tinjauan aspek kuantitatif dari prinsip-prinsip ini perlu dibahas.

Transformasi energi biologis patuhi hukum termodinamika, banyak pengamatan kuantitatif yang dilakukan oleh fisikawan dan kimiawan tentang interkonversi berbagai bentuk energi, pada abad kesembilan belas, mengarah pada perumusan dua hukum dasar termodinamika. Hukum pertama adalah prinsip kekekalan energi: untuk setiap perubahan fisik atau kimia, jumlah total energi di alam semesta tetap konstan; energi dapat berubah bentuk atau dapat dipindahkan dari satu bentuk ke bentuk lain, tetapi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Hukum kedua termodinamika, mengatakan bahwa alam semesta selalu cenderung ke arah peningkatan ketidakteraturan: dalam semua proses alam, entropi alam semesta meningkat. Organisme hidup terdiri dari kumpulan molekul yang jauh lebih terorganisir daripada bahan sekitarnya dari mana mereka dibangun, dan organisme mempertahankan dan menghasilkan ketertiban, tampaknya tidak menyalahi hukum kedua termodinamika. Tetapi organisme hidup tidak melanggar hukum kedua; mereka beroperasi secara ketat di dalamnya. Untuk membahas penerapan hukum kedua pada sistem biologi, pertama-tama kita harus mendefinisikan sistem tersebut dan lingkungannya. Sistem pereaksi adalah kumpulan materi yang mengalami proses kimia atau fisika tertentu; itu mungkin organisme, sel, atau dua senyawa yang bereaksi. Sistem yang bereaksi dan lingkungannya secara bersama-sama membentuk alam semesta. Di laboratorium, beberapa proses kimia atau fisika dapat dilakukan dalam sistem terisolasi atau tertutup, di mana tidak ada bahan atau energi yang dipertukarkan dengan lingkungan. Sel dan organisme hidup, bagaimanapun adalah sistem terbuka, bertukar materi dan energi dengan lingkungan mereka; sistem kehidupan tidak pernah berada dalam keseimbangan dengan lingkungannya, dan transaksi konstan antara sistem dan lingkungan menjelaskan bagaimana organisme dapat menciptakan keteraturan di dalam dirinya sendiri.

B. Energi Bebas

Energi bebas Gibbs, G , menyatakan jumlah energi yang mampu melakukan kerja selama reaksi pada suhu dan tekanan konstan. Ketika reaksi berlangsung dengan pelepasan energi bebas (yaitu, ketika sistem berubah sehingga memiliki energi bebas lebih sedikit), perubahan energi bebas, ΔG , bernilai negatif dan reaksi dikatakan eksergonik. Dalam reaksi endergonik, sistem memperoleh energi bebas dan ΔG positif.

Entalpi H , adalah kandungan panas dari sistem yang bereaksi. Ini mencerminkan jumlah dan jenis ikatan kimia dalam reaktan dan produk. Ketika reaksi kimia melepaskan panas, itu adalah dikatakan eksotermik; kandungan panas produk lebih kecil daripada reaktan dan ΔH memiliki, menurut konvensi, nilai negatif. Sistem pereaksi yang mengambil panas dari lingkungannya adalah sistem endotermik dan memiliki nilai ΔH positif.

Entropi S , adalah ekspresi kuantitatif untuk ketidakteraturan dalam suatu sistem. Ketika produk reaksi kurang kompleks dan lebih tidak teratur daripada reaktan, reaksi dikatakan berjalan dengan kenaikan entropi. Satuan ΔG dan ΔH adalah joule/mol atau kalori/mol (ingat bahwa 1 kal 4,184 J); satuan entropi adalah joule/mol Kelvin (J/mol K) (Tabel 13-1). Di bawah kondisi yang ada dalam sistem biologi (termasuk suhu dan tekanan konstan), perubahan energi bebas, entalpi, dan entropi terkait satu sama lain secara kuantitatif dengan persamaan:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Beberapa Konstanta Fisik dan Satuan yang Digunakan dalam Termodinamika

Konstanta Boltzmann, k $1,381 \cdot 10^{23}$ J/K

Bilangan Avogadro, N $6,022 \cdot 10^{23}$ mol⁻¹

Konstanta Faraday, 96,480 J/V mol

Konstanta gas, R 8,315 J/mol K (1.987 cal/mol K)

Satuan G dan H adalah J/mol (atau kal/mol)

Satuan S adalah J/mol K (atau kal/mol K)

1 kal 4,184 J

25 C = 298 K

Pada 25 C, $RT = 2,479$ kJ/mol

= 0.592 kcal/mol)

di mana ΔG adalah perubahan energi bebas Gibbs dari sistem yang bereaksi, ΔH adalah perubahan entalpi sistem, T adalah suhu mutlak, dan ΔS adalah perubahan entropi sistem. Dengan konvensi, ΔS memiliki tanda positif ketika entropi meningkat dan ΔH seperti disebutkan di atas, memiliki tanda negatif ketika panas dilepaskan oleh sistem ke sekelilingnya. Salah satu dari kondisi ini, yang merupakan tipikal dari proses yang menguntungkan, cenderung membuat ΔG negatif. Faktanya, ΔG dari sistem yang bereaksi spontan selalu negatif.

Hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa entropi alam semesta meningkat selama semua proses kimia dan fisika, tetapi tidak mengharuskan peningkatan entropi terjadi dalam sistem reaksi itu sendiri. Urutan yang dihasilkan di dalam sel saat mereka tumbuh dan membelah lebih dari dikompensasi oleh gangguan yang mereka ciptakan di sekitarnya selama pertumbuhan dan pembelahan. Singkatnya, organisme hidup mempertahankan keteraturan internalnya dengan mengambil energi bebas dari lingkungan dalam bentuk nutrisi atau cahaya matahari, dan mengembalikan ke lingkungan dalam jumlah energi yang sama seperti panas dan entropi.

C. Sel Membutuhkan Sumber Energi

Sel adalah sistem isothermal mereka berfungsi pada suhu konstan (mereka juga berfungsi pada tekanan konstan). Aliran panas bukan merupakan sumber energi bagi sel, karena panas hanya dapat melakukan kerja saat melewati suatu zona atau objek yang bersuhu lebih rendah. Energi yang dapat dan harus digunakan sel adalah energi bebas, yang dijelaskan oleh fungsi energi bebas Gibbs G , yang memungkinkan prediksi arah reaksi kimia, posisi kesetimbangan yang tepat, dan jumlah kerja yang secara teori dapat mereka lakukan pada suhu dan tekanan konstan. Sel heterotrofik memperoleh energi bebas dari molekul nutrisi, dan sel fotosintesis memperolehnya dari radiasi matahari yang diserap. Kedua jenis sel mengubah energi bebas ini menjadi ATP dan senyawa kaya energi lainnya yang mampu menyediakan energi untuk kerja biologi pada suhu konstan.

Perubahan Energi Bebas Standar Berhubungan Langsung ke Konstanta Kestimbangan. Komposisi sistem pereaksi (campuran reaktan kimia dan produk) cenderung terus berubah sampai tercapai kesetimbangan. Pada konsentrasi kesetimbangan reaktan dan produk, laju reaksi maju dan reaksi balik sama persis dan tidak ada perubahan bersih lebih lanjut yang terjadi dalam sistem. Konsentrasi reaktan dan produk pada kesetimbangan menentukan konstanta kesetimbangan, K_{eq} Dalam reaksi umum $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$, di mana a , b , c , dan d adalah jumlah molekul A, B, C, dan D yang berpartisipasi, konstanta kesetimbangan diberikan oleh $K_{eq} = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$ di mana $[A]$, $[B]$, $[C]$, dan $[D]$ adalah konsentrasi molar komponen reaksi pada titik kesetimbangan.

Ketika sistem yang bereaksi tidak berada dalam kesetimbangan, kecenderungan untuk bergerak menuju kesetimbangan merupakan gaya penggerak, yang besarnya dapat dinyatakan sebagai perubahan energi bebas untuk reaksi, ΔG . Dalam kondisi standar (298 K 25 C), ketika reaktan dan produk awalnya pada konsentrasi 1 M atau, untuk gas, pada tekanan parsial 101,3 kilopascal (kPa), atau 1 atm, gaya yang mendorong sistem menuju kesetimbangan didefinisikan sebagai perubahan energi bebas standar, ΔG° . Dengan definisi ini, keadaan standar untuk reaksi yang melibatkan ion hidrogen adalah $[H^+] 1 M$, atau pH 0. Namun, sebagian besar reaksi biokimia terjadi dalam larutan berair di dekat pH 7; pH dan konsentrasi air (55,5 M) pada dasarnya konstan. Untuk memudahkan perhitungan, ahli biokimia mendefinisikan keadaan standar yang berbeda, di mana konsentrasi H^+ adalah $10^{-7} M$ (pH 7) dan air adalah 55,5 M; untuk reaksi yang melibatkan Mg^{2+} (termasuk sebagian besar di mana ATP adalah reaktan), konsentrasinya dalam larutan biasanya dianggap konstan pada 1 mM. Konstanta fisika yang didasarkan pada keadaan standar biokimia ini disebut konstanta transformasi standar dan ditulis (seperti ΔG° dan K_{eq}) untuk membedakannya dari konstanta tak tertransformasi yang digunakan oleh ahli kimia dan fisikawan. Penggunaan $\Delta G^{\circ'}$ yang direkomendasikan oleh komite kimia dan ahli biokimia internasional, dimaksudkan untuk menekankan bahwa energi bebas yang diubah G' adalah kriteria untuk kesetimbangan.) Dengan konvensi,

ketika H_2O , H^+ , dan/atau Mg^{2+} adalah reaktan atau produk, konsentrasinya dimasukkan ke dalam konstanta K_{eq} dan ΔG° .

Sama seperti K_{eq} adalah karakteristik konstanta fisik untuk setiap reaksi, demikian juga ΔG° adalah konstanta, hubungan sederhana antara K_{eq} dan ΔG° :
 $\Delta G^\circ = -RT \ln K_{\text{eq}}$.

Sebagai contoh, mari kita membuat perhitungan sederhana dari perubahan energi bebas standar dari reaksi yang dikatalisis oleh enzim phosphoglucomutase: Glukosa 1-fosfat membentuk glukosa 6-fosfat. Analisis kimia menunjukkan bahwa katakanlah, 20 mM glukosa 1-fosfat (tanpa glukosa 6-fosfat) atau dengan 20 mM glukosa 6-fosfat (tanpa glukosa 1-fosfat), campuran kesetimbangan akhir pada 25 C dan pH 7,0 akan sama: 1 mM glukosa 1-fosfat dan 19 mM glukosa 6-fosfat. (Ingat bahwa enzim tidak mempengaruhi titik kesetimbangan reaksi; mereka hanya mempercepat pencapaiannya.) Dari data ini kita dapat menghitung konstanta kesetimbangan:

$$K'_{\text{eq}} = \frac{[\text{glucose 6-phosphate}]}{[\text{glucose 1-phosphate}]} = \frac{19 \text{ mM}}{1 \text{ mM}} = 19$$

Dari nilai K'_{eq} kita dapat menghitung standar perubahan energi bebas:

$$\begin{aligned}\Delta G^\circ &= -RT \ln K'_{\text{eq}} \\ &= -(8.315 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(298 \text{ K})(\ln 19) \\ &= -7.3 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

Karena perubahan energi bebas standar adalah negatif, ketika reaksi dimulai dengan 1,0 M glukosa 1-fosfat dan 1,0 M glukosa 6-fosfat, konversi glukosa 1-fosfat menjadi glukosa 6-fosfat berlangsung dengan kehilangan (pelepasan) dari energi bebas. Untuk reaksi sebaliknya (konversi glukosa 6-fosfat menjadi glukosa 1-fosfat), ΔG° memiliki besar yang sama tetapi tanda berlawanan. Perhatikan bahwa hidrolisis ester sederhana, amida, peptida, dan glikosida, serta penataan ulang dan eliminasi, dilanjutkan dengan perubahan energi bebas standar yang relatif kecil, sedangkan hidrolisis anhidrida asam disertai dengan penurunan energi bebas standar yang relatif besar.

Oksidasi lengkap senyawa organik seperti glukosa atau palmitat menjadi CO_2 dan H_2O , yang dalam sel memerlukan banyak langkah, menghasilkan penurunan yang sangat besar dalam energi bebas standar. Namun, energi bebas standar menunjukkan berapa banyak energi bebas yang tersedia dari reaksi dalam kondisi standar. Perubahan energi bebas sebenarnya tergantung pada reaktan dan konsentrasi produk. Kita harus berhati-hati untuk membedakan antara dua besaran yang berbeda: perubahan energi bebas ΔG , dan perubahan energi bebas standar, ΔG° . Setiap reaksi kimia memiliki perubahan energi bebas standar yang khas, yang mungkin positif, negatif, atau nol, tergantung pada konstanta kesetimbangan reaksi. Perubahan energi bebas standar memberi tahu kita ke arah mana dan seberapa jauh reaksi tertentu harus berjalan untuk mencapai kesetimbangan ketika konsentrasi awal masing-masing komponen adalah 1,0 M, pH 7,0, suhu 25 C, dan tekanan 101,3 kPa .

Jadi ΔG° adalah konstanta: ia memiliki nilai karakteristik yang tidak berubah untuk reaksi tertentu. Tetapi perubahan energi bebas yang sebenarnya ΔG , adalah fungsi dari konsentrasi reaktan dan produk dan suhu selama reaksi, yang tidak selalu sesuai dengan kondisi standar seperti yang didefinisikan di atas. Selain itu, ΔG dari setiap reaksi yang berjalan secara spontan menuju kesetimbangannya selalu negatif, menjadi kurang negatif selama reaksi berlangsung, dan nol pada titik kesetimbangan, yang menunjukkan bahwa tidak ada lagi kerja yang dapat dilakukan oleh reaksi.

Studi kuantitatif transduksi energi seluler dan reaksi kimia yang mendasari transduksi ini. Jelas, transduksi energi biologi mematuhi hukum Termodinamika.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

G: energi bebas Gibbs pada suhu dan tekanan konstan, satuannya adalah Joule per mol.

H: Entalpi, satuannya adalah Joule per mol.

T : Suhu, satuan dalam Kelvin.

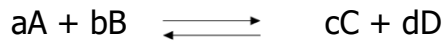
S: Entropi satuannya adalah Joule per mol kali suhu dalam Kelvin.

ΔG : Energi Bebas pada suhu dan tekanan konstan (Joule per mol)

- Jika $\Delta G < 0$ maka reaksi berlangsung spontan.
- Nilai ΔG berhubungan langsung dengan konstanta kesetimbangan

$$\Delta G = -RT \ln K_{eq}$$

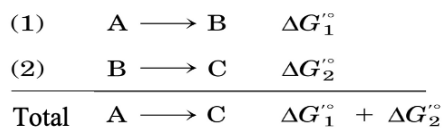
Energi bebas sebenarnya tergantung pada konsentrasi reaktan dan produk



$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$$

Energi bebas bersifat aditif, sehingga reaksi yang menguntungkan ($\Delta G_1 < 0$) mendorong reaksi yang tidak menguntungkan ($\Delta G_2 > 0$),

Jika: $\Delta G_1 + \Delta G_2 < 0$

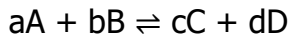


Tabel 42 Perubahan Energi Bebas Standar Beberapa Reaksi Kimia pada pH 7,0 dan 25 °C (298 K)

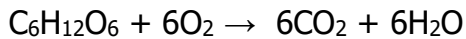
Jenis Reaksi	ΔG^0	
	(kJ/mol)	(kcal/mol)
Reaksi Hidrolisis		
Anhidrida Asam		
Anhidrida asetat + H ₂ O → 2 asetat	-91.1	-21.8
ATP + H ₂ O → ADP + P _i	-30.5	-7.3
ATP + H ₂ O → AMP + PP _i	-45.6	-10.9
PP _i + H ₂ O → 2P _i	-19.2	-4.6
UDP-glukosa + H ₂ O → UMP + glukosa 1-fosfat	-43.0	-10.3
Ester		
Etil asetat + H ₂ O → etanol + asetat	-19.6	-4.7
Glukosa 6-fosfat + H ₂ O → glukosa + P _i	-13.8	-3.3
Amida dan Peptida		
Glutamina + H ₂ O → glutamat + NH ₄ ⁺	-14.2	-3.4
Glisilglisin + H ₂ O → 2 glisin	-9.2	-2.2
Glikosida		
Maltosa + H ₂ O → 2 glukosa	-15.5	-3.7
Laktosa + H ₂ O → glukosa + galaktosa	-15.9	-3.8
Penataan ulang		
Glukosa 1-fosfat → glukosa 6-fosfat	-7.3	-1.7
Fruktosa 6-fosfat → glukosa 6-fosfat	-1.7	-0.4
Penghapusan oleh air		
Malat → fumarat + H ₂ O	3.1	0.8
Oksidasi dengan molekul oksigen		
Glukosa + 6O ₂ → 6CO ₂ + 6 H ₂ O	-2,840	-686
Palmitat + 23O ₂ → 16CO ₂ + 16H ₂ O	-9,770	-2,338

D. Entropi

Entropi, S , adalah ekspresi kuantitatif untuk ketidakteraturan dalam suatu sistem. Ketika produk reaksi kurang kompleks dan lebih tidak teratur daripada reaktan, reaksi dikatakan berjalan dengan kenaikan entropi. Menurut Boltzmann: $S = k \ln W$ dimana W adalah jumlah keadaan dalam system, jadi setiap reaksi seperti

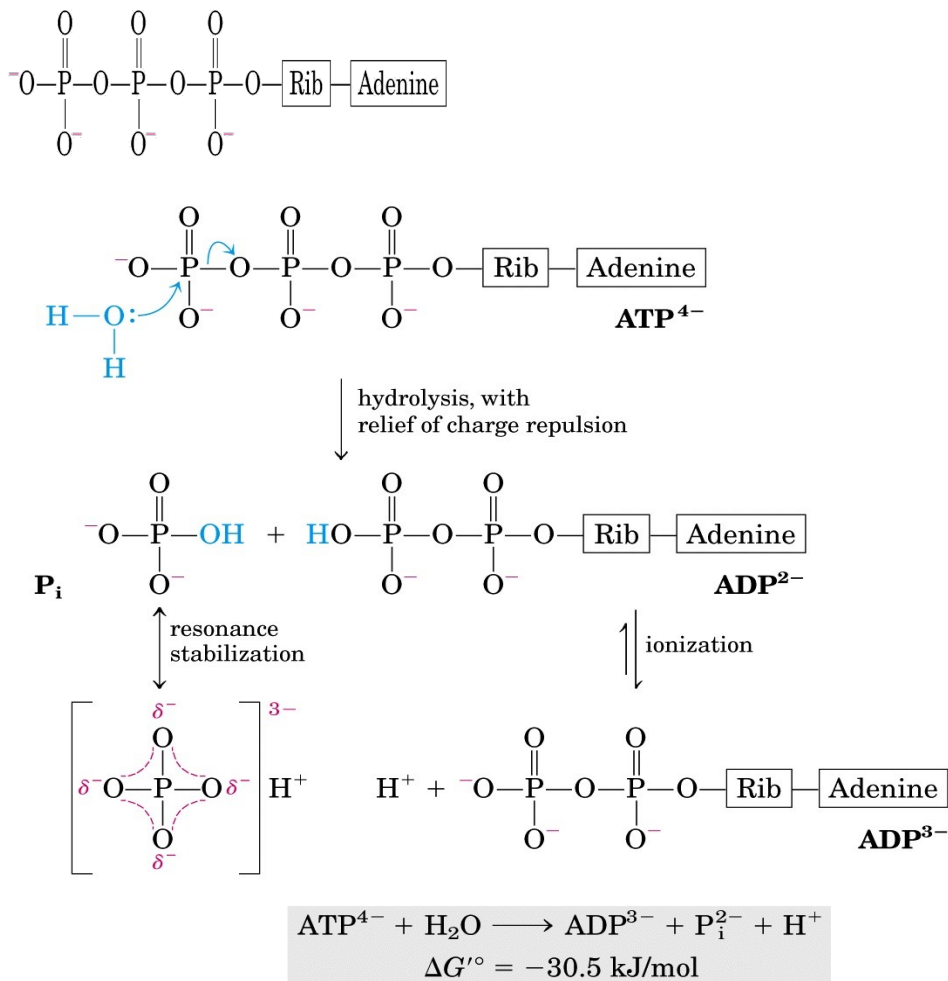


dimana $a+b < c+d$, dapat dikatakan didorong oleh entropi.



Gugus fosforil dan ATP

- ATP: Adenosin trifosfat, ribonukleotida, adalah sumber energi sel.



Mengapa hidrolisis ATP sangat eksergonik?

- Memperkecil tolakan elektrostatis antara muatan negatif fosfat.
- Fosfat anorganik dapat distabilkan dengan hibrida resonansi.
- ADP²⁻ dapat terionisasi.
- Produk lebih larut daripada reaktan.



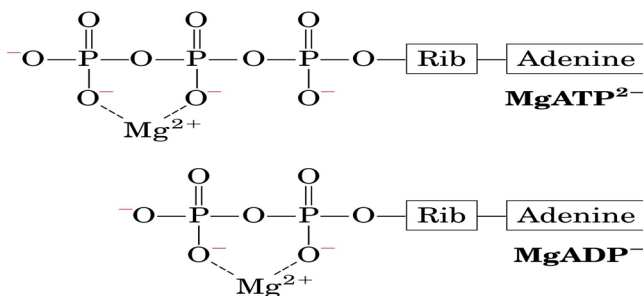
Di bawah kondisi standar:

$$\Delta G^{\circ} = -30.5 \text{ kJ/mol}$$

Tetapi di dalam sel potensial fosforilasi ΔG_p adalah:

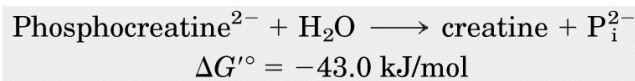
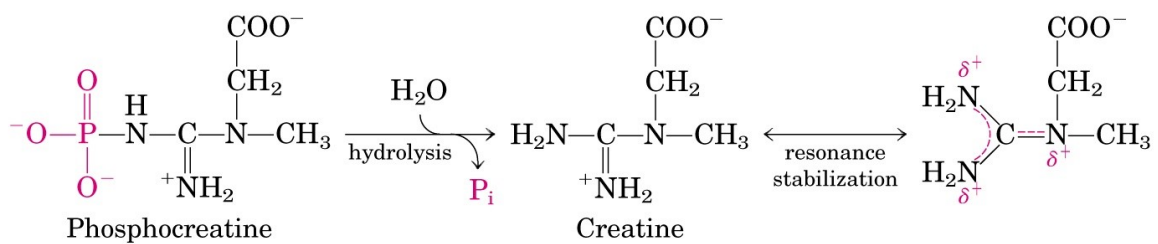
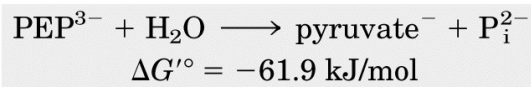
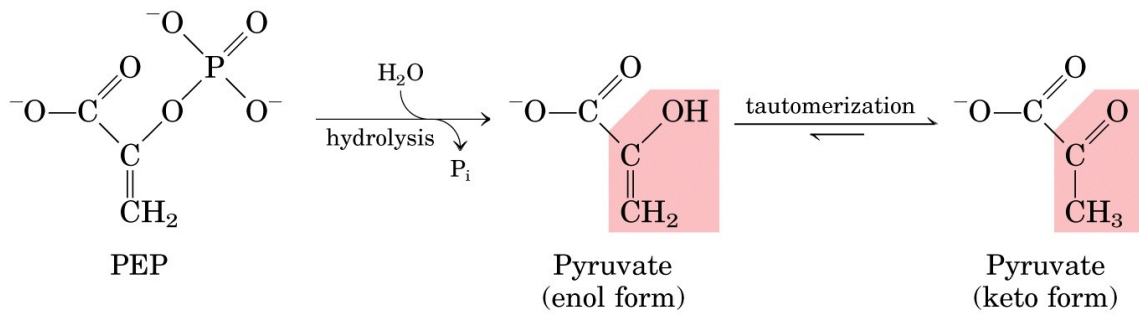
$$\Delta G_p = \Delta G^{\circ} + \frac{RT \ln \frac{[\text{ADP}][\text{P}_i]}{[\text{ATP}]}}$$

$$= -51.8 \text{ kJ/mol}$$

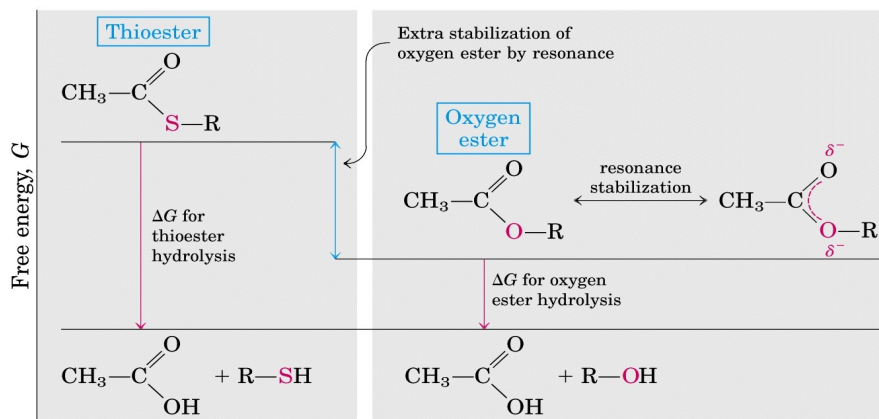


Tabel 43 Senyawa Fosfat Energi Tinggi

Senyawa Fosfat Energi Tinggi	ΔG°	
	(kJ/mol)	(kkal/mol)
Fosfoenolpiruvat	-61.9	-14.8
1,3-bifosfoglisarat (\rightarrow 3-fosfoglisarat + Pi)	-49.3	-11.8
Fosfokreatin	-43.0	-10.3
ADP (\rightarrow AMP + Pi)	-32.8	-7.8
ATP (\rightarrow ADP + Pi)	-30.5	-7.3
ATP (\rightarrow AMP + Ppi)	-45.6	-10.9
AMP (\rightarrow adenosin + Pi)	-14.2	-3.4
Ppi (\rightarrow 2Pi)	-19.2	-4.0
Glukosa 1- fosfat	- 20.9	-5.0
Fruktosa 6-fosfat	-15.9	-3.8
Glukosa 6-fosfat	-13.8	-3.3
Gliserol 1-fosfat	-9.2	-2.2
Asetil-Co A	-31.4	-7.5

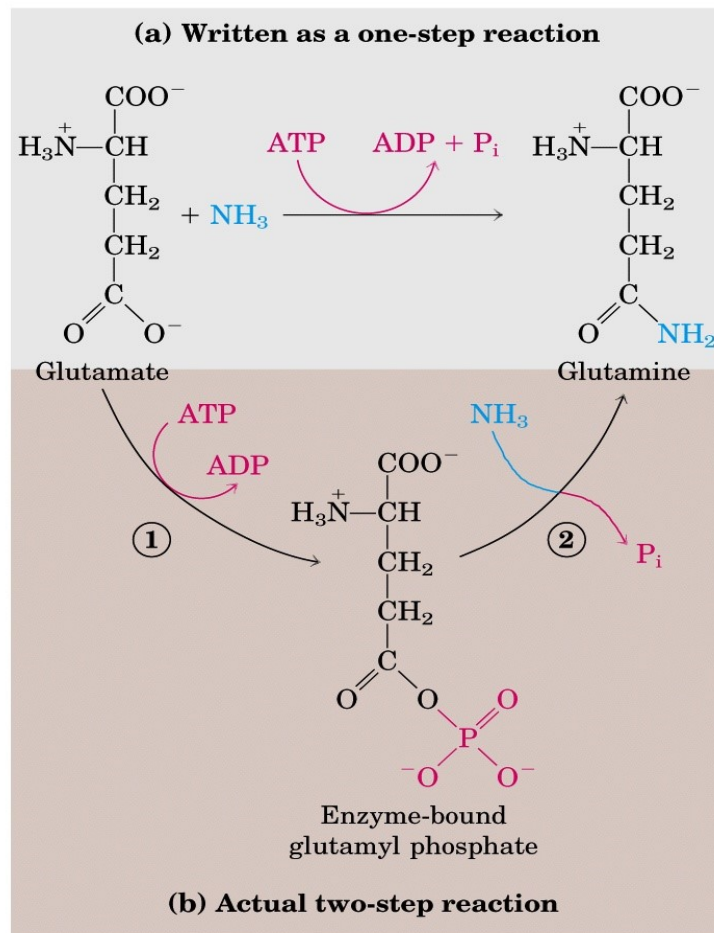


Hidrolisis tioester juga sangat eksergonik

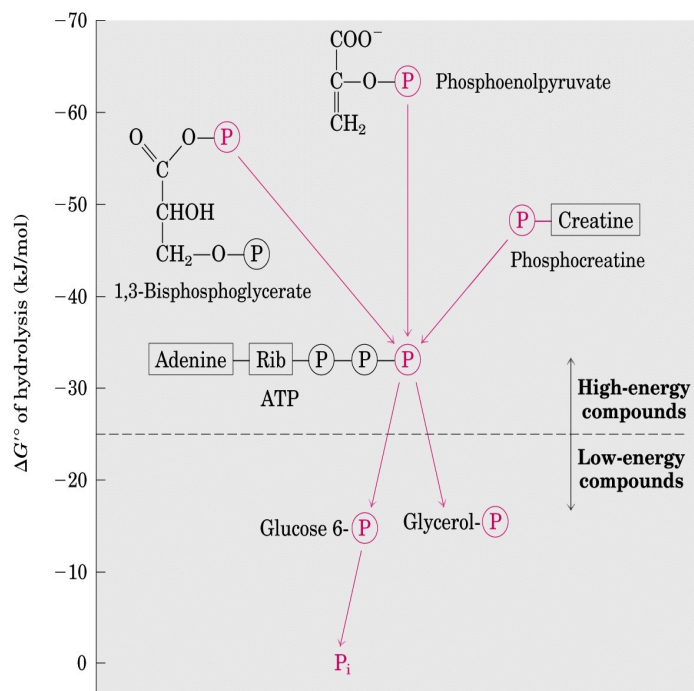


Memfaatkan ATP

- Karena hidrolisis ATP sangat menguntungkan (yaitu $G \ll 0$) ATP dapat mendorong reaksi yang tidak menguntungkan, tetapi bagaimana caranya?
- ATP melakukannya bukan dengan "memanfaatkan" energi hidrolisis, melainkan melalui penggabungan transfer kelompok.



Gambar 231 Hidrolisis ATP dalam dua langkah

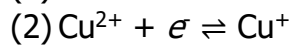
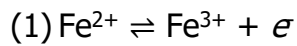
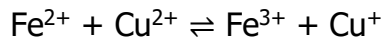


Gambar 232 Peringkat senyawa berenergi tinggi.

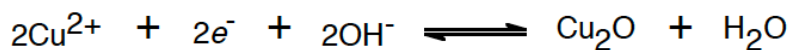
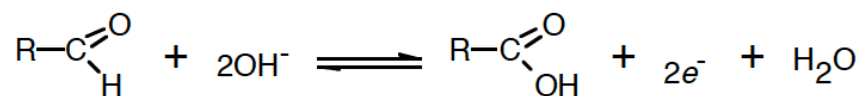
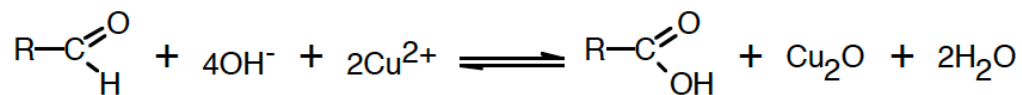
Oksidasi-Reduksi Biologis

Aliran elektron dapat melakukan kerja, Elektron mengalir dari zat pereduksi ke zat pengoksidasi karena afinitas elektronnya berbeda. Perbedaan afinitas ini disebut gaya gerak listrik (ggl). Zat pereduksi mengalami oksidasi dan zat yang teroksidasi mengalami reduksi.

Reaksi redoks dapat digambarkan sebagai Setengah-reaksi:



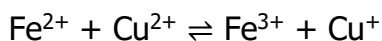
Reaksi redoks dalam biokimia



Deret keelektronegatifan: $\text{O} > \text{N} > \text{S} > \text{C} > \text{H}$

Methane	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \vdots \\ \text{H} : \text{C} : \text{H} \\ \vdots \\ \text{H} \end{array}$	8	Acetaldehyde (aldehyde)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \vdots \quad \vdots \\ \text{H} : \text{C} : \text{C} : \text{O} \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ \text{H} \quad \text{O} \end{array}$	3
Ethane (alkane)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \vdots \quad \vdots \\ \text{H} : \text{C} : \text{C} : \text{H} \\ \vdots \quad \vdots \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	7	Acetone (ketone)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{O} \quad \text{H} \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ \text{H} : \text{C} : \text{C} : \text{C} : \text{H} \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	2
Ethene (alkene)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \quad \text{H} \\ \vdots \quad \quad \vdots \\ \text{H} : \text{C} : : \text{C} : \text{H} \\ \vdots \quad \quad \vdots \\ \text{H} \quad \quad \text{H} \end{array}$	6	Formic acid (carboxylic acid)	$\begin{array}{c} \quad \quad \text{O} \\ \quad \quad \vdots \\ \text{H} : \text{C} : \text{O} \\ \quad \quad \vdots \\ \quad \quad \text{O} \\ \quad \quad \vdots \\ \quad \quad \text{H} \end{array}$	2
Ethanol (alcohol)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \vdots \quad \vdots \\ \text{H} : \text{C} : \text{C} : \text{O} : \text{H} \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	5	Carbon monoxide	$: \text{C} : : \text{O} :$	2
Acetylene (alkyne)	$\text{H} : \text{C} : : : \text{C} : \text{H}$	5	Acetic acid (carboxylic acid)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \quad \text{O} \\ \vdots \quad \quad \vdots \\ \text{H} : \text{C} : \text{C} : \text{O} \\ \vdots \quad \quad \vdots \quad \vdots \\ \text{H} \quad \quad \text{O} \\ \quad \quad \vdots \\ \quad \quad \text{H} \end{array}$	1
Formaldehyde	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \vdots \\ \text{H} : \text{C} : \text{O} \\ \vdots \\ \text{H} \end{array}$	4	Carbon dioxide	$\text{O} : : \text{C} : : \text{O}$	0

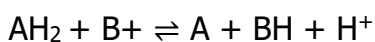
Karbon kurang elektronegatif daripada semua atom yang terikat padanya, kecuali hidrogen. Dengan demikian semua atom yang mengikat karbon mengoksidasinya kecuali hidrogen. Dengan demikian menghilangkan hidrogen dan mengganti ikatan itu dengan atom lain (termasuk karbon) adalah sinonim dengan oksidasi. Mode transfer electron langsung sebagai elektron:



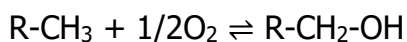
Sebagai atom hidrogen:

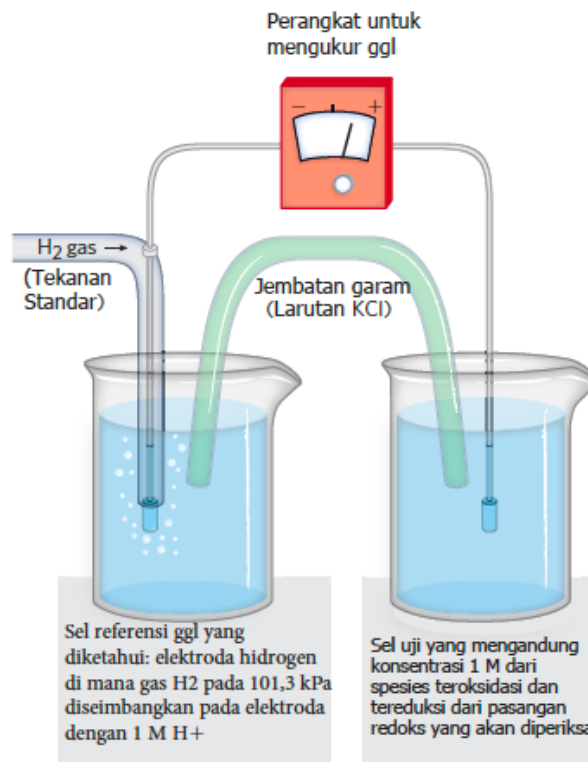


Sebagai ion hidrida (H^-):



Kombinasi langsung dengan oksigen:





Gambar 233 Pengukuran potensial reduksi standar (E°) dari pasangan redoks.
 Sumber: Nelson & Cox, 2013

Pengukuran potensial reduksi standar (E°) dari pasangan redoks. Elektron mengalir dari elektroda uji ke elektroda referensi, atau sebaliknya. Setengah sel referensi utama adalah elektroda hidrogen, seperti yang ditunjukkan di sini, pada pH 0. Gaya gerak listrik (ggl) elektroda ini ditetapkan 0,00V. Pada pH 7 dalam sel uji (dan 25°C), E° untuk hidrogen elektroda adalah 20.414 V. Arah aliran elektron tergantung pada "tekanan" elektron relatif atau potensial dari dua sel. Sebuah jembatan garam yang mengandung larutan KCl jenuh menyediakan jalur untuk gerakan counter ion antara sel uji dan sel referensi. Dari ggl yang diamati dan ggl yang diketahui dari sel referensi, peneliti dapat menemukan ggl sel uji yang mengandung pasangan redoks. Sel yang memperoleh elektron, menurut kesepakatan, memiliki potensial reduksi yang lebih positif.

$$E = E^0 + \frac{RT}{n\mathfrak{S}} \ln \frac{[\text{electron acceptor}]}{[\text{electron donor}]}$$

$$= E^0 + \frac{0.026V}{n} \ln \frac{[\text{electron acceptor}]}{[\text{electron donor}]}$$

$$\Delta G = -n\mathfrak{S}\Delta E, \text{ or } \Delta G^0 = -n\mathfrak{S}\Delta E^0$$

$$\mathfrak{S} = 96,480 \text{ J/V} \cdot \text{mol}$$

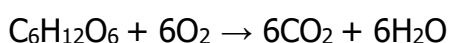
$$R = 8.315 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

Tabel 44 Potensial Reduksi Standar dari Beberapa Setengah-Reaksi Biologi yang penting, pada pH 7.0 dan Suhu 25°C (298 K)

Setengah-Reaksi	E° (V)
$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	0.816
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	0.771
$\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$	0.421
Sitokrom f (Fe^{3+}) + $\text{e}^- \rightarrow$ sitokrom f (Fe^{2+})	0.365
$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ (ferisianida) + $\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	0.36
Sitokrom a ₃ (Fe^{3+}) + $\text{e}^- \rightarrow$ sitokrom a ₃ (Fe^{2+})	0.35
$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0.295
Sitokrom a (Fe^{3+}) + $\text{e}^- \rightarrow$ sitokrom a (Fe^{2+})	0.29
Sitokrom c (Fe^{3+}) + $\text{e}^- \rightarrow$ sitokrom c (Fe^{2+})	0.254
Sitokrom c ₁ (Fe^{3+}) + $\text{e}^- \rightarrow$ sitokrom c ₁ (Fe^{2+})	0.22
Sitokrom b (Fe^{3+}) + $\text{e}^- \rightarrow$ sitokrom b (Fe^{2+})	0.077
Ubikuinon + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$ ubikuinol + H_2	0.045
Fumarat ²⁻ + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$ Suksinat ²⁻	0.031
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ (pada keadaan standar, pH 0)	0.000
Krotonil-CoA + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$ butiril-CoA	-0.015
Oksaloasetat ²⁻ + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$ Malat ²⁻	-0.166
Piruvat ⁻ + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$ Laktat ⁻	-0.185
Asetaldehid + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$ etanol	-0.197
$\text{FAD} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{FADH}_2$	-0.219*
Glutation + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$ 2 glutation tereduksi	-0.23
$\text{S} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{S}$	-0.243
Asam lipoat + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$ Asam dihidrolipoat	-0.29
$\text{NAD}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NADH}$	-0.320
$\text{NADP}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NADPH}$	-0.324
Asetoasetat + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$ β-hidroksibutarat	-0.346
α-ketoglutarat + $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow$ isositrat	-0.38
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ (pada pH 7)	-0.414
Feredoksin (Fe^{3+}) + $\text{e}^- \rightarrow$ Feredoksin (Fe^{2+})	-0.432

Oksidasi glukosa sangat eksergonik

Oksidasi glukosa yang lengkap adalah yang utama sumber energi.

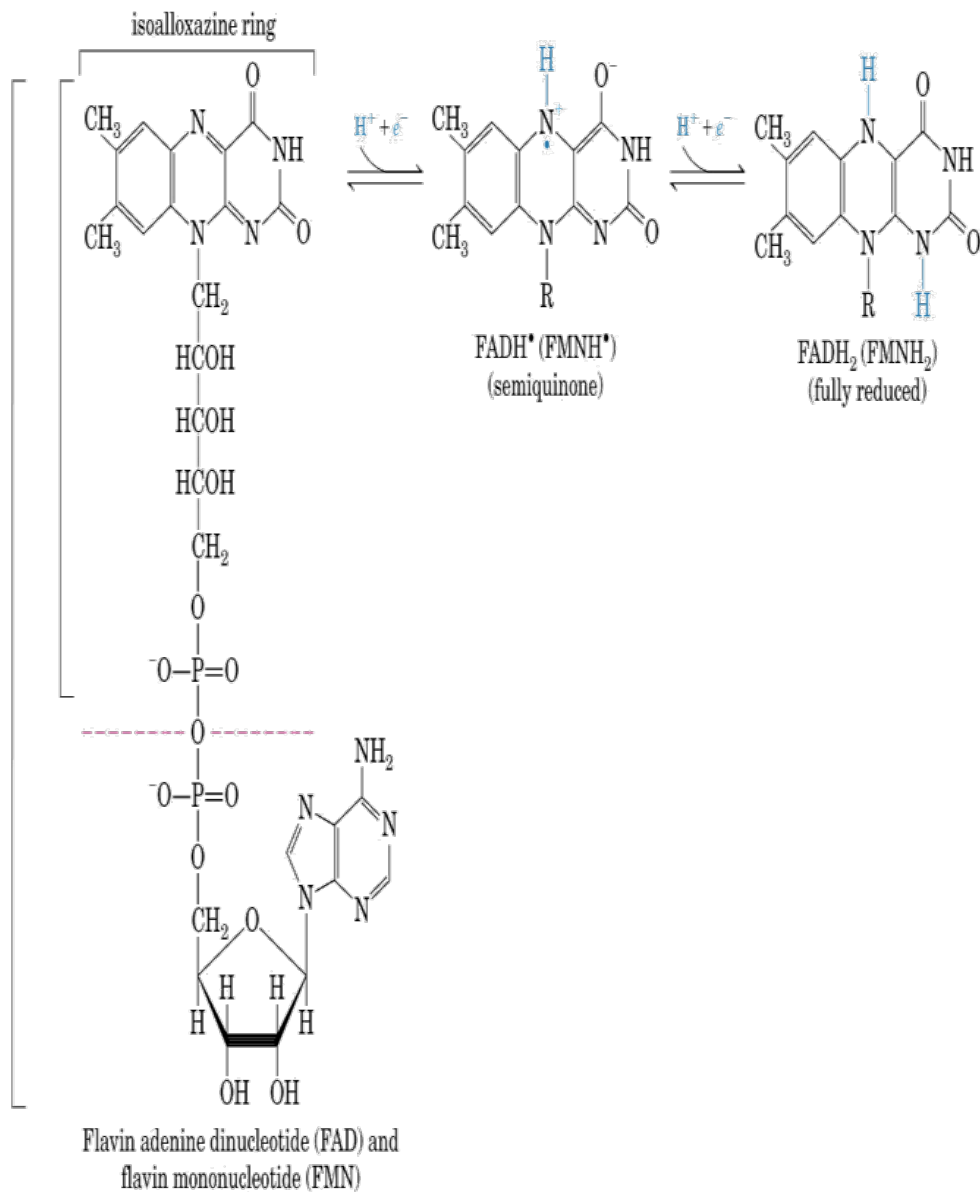


Prosesnya melibatkan banyak langkah yang masing-masing dikatalisasi

Enzim	Koenzim	Spesifisitas Stereokimia untuk cincin Nikotinamida (A atau B)
Isositrat dehidrogenase	NAD ⁺	A
α-Ketoglutarat dehidrogenase	NAD ⁺	B
Glukosa 6-fosfat dehidrogenase	NADP ⁺	B
Malat dehidrogenase	NAD ⁺	A
Glutamat dehidrogenase	NAD ⁺ atau NADP ⁺	B
Gliseraldehida 3-fosfat dehidrogenase	NAD ⁺	B
Laktat dehidrogenase	NAD ⁺	A
Alkohol dehidrogenase	NAD ⁺	A

FMN, FAD dan flavoprotein

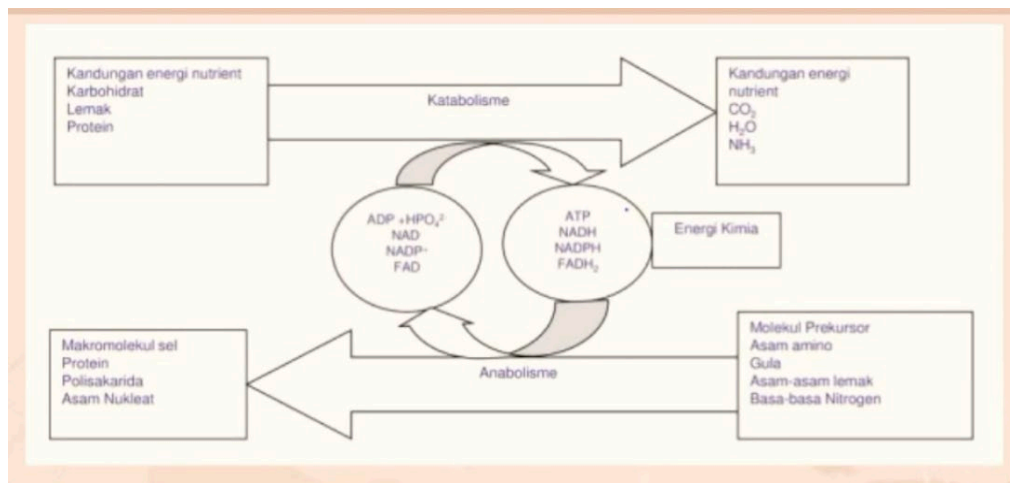
Flavoprotein adalah enzim yang menggunakan FMN⁺ atau FAD⁺ sebagai kofaktor dalam reaksi redoks. Kofaktor berasal dari riboflavin (vitamin B2), FAD dan FMN dapat menerima 1 atau 2 hidrogen, dengan demikian menerima 1 atau 2 elektron, dan oleh karena itu lebih fleksibel daripada NAD⁺ atau NADP⁺. Bentuk tereduksi penuh ditulis sebagai FADH₂ dan FMNH₂.



Tabel 46 Beberapa Enzim (Flavoprotein) yang Menggunakan Koenzim Nukleotida Flavin

Enzim	Nikleotida Flavin
Asam lemak -CoA dehidrogenase	FAD
Dihidrodipoil dehidrogenase	FAD
Suksinat dehidrogenase	FAD
Gliserol 3-fosfat dehidrogenase	FAD
Tioredoxin reductase	FAD
NADH dehidrogenase (Kompleks I)	FMN
Glikolat dehidrogenase	FMN

Materi Lipid dapat di lihat pada video berikut ini.



Gambar 234 Bioenergetika
Sumber: Sukaryawan & Sari 2021

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke tiga belas biokimia 1 pada pokok bahasan Bioenergetika yang telah disajikan, amatilah beberapa makhluk hidup disekitar daerah saudara? bagaimana makhluk hidup tersebut tumbuh dan berkembang?

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, kemudian amatilah disekitar saudara, beberapa makhluk hidup baik hewan maupun tumbuhan dapat tumbuh dan berkembang? Bagaimana makhluk hidup tersebut mendapatkan energi? Bahaslah dengan kelompok saudara, kerjakanlah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan.

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang makhluk hidup memanfaatkan energi. Bahaslah naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang makhluk hidup memanfaatkan energi. Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

4. APLIKASI

Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang makhluk hidup memanfaatkan energi. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di upload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal-hal berikut ini.

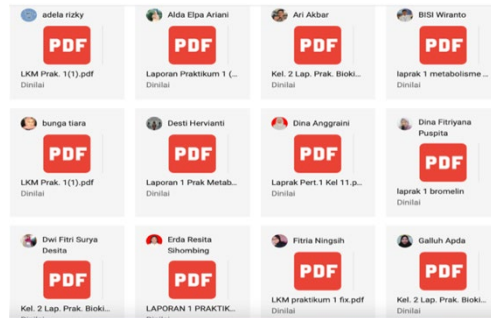
- a. Bagaimana tumbuh-tumbuhan dapat memperoleh energi?
- b. Bagaimana hewan dapat memperoleh energi?
- c. Bagaimana hukum kekekalan energi berlaku pada makhluk hidup?
- d. Bahaslah dan gambarkan strukturnya energi yang berperan dalam metabolisme makhluk hidup?
- e. Bahaslah dalam kelompok saudara senyawa kimia yang berenergi tinggi pada makhluk hidup?

Bahaslah dalam kelompok saudara, jika orang dewasa normal dengan berat badan 68 kg, memerlukan input kalori sebesar 2000 kkal dari makanan dalam waktu 24 jam. Makanan ini mengalami metabolisme dan energi bebas yang dihasilkan dipergunakan untuk sintesis ATP, yang kemudian dimanfaatkan untuk melakukan kerja kimia dan mekanika harian tubuh. Anggaphlah efisiensi pada perubahan energi makanan menjadi ATP mencapai 50%, hitunglah berat ATP yang dipergunakan oleh orang dewasa dalam waktu 24 jam. Berapa persen dari berat badan, berat ATP ini?

5. REFLEKSI

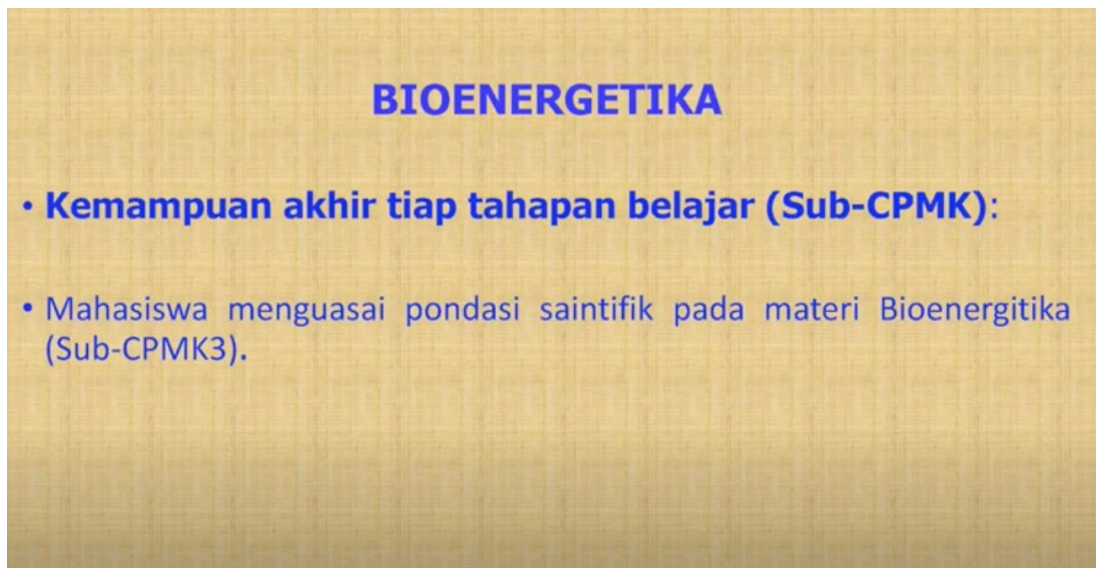
Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 13 Bioenergitika". Selanjutnya laporan Bioenergitika tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id>. Laporan 13 Bioenergitika minimal memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan

ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka. Contoh submit laporan 14 Bioenergetika



Gambar 235 Submit Laporan 14 Bioenergetika

Materi perkuliahan pokok bahasan Bioenergetika dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.

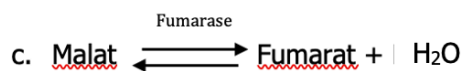
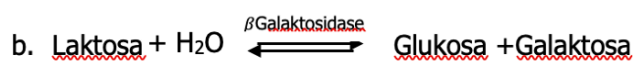
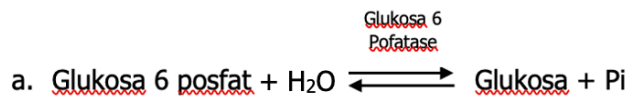


Gambar 236 Paparan materi Bioenergetika

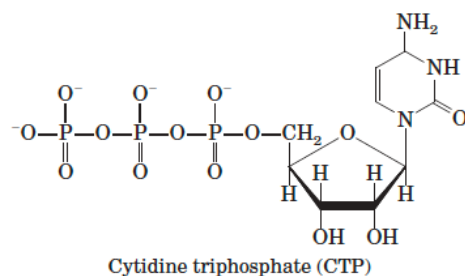
Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di submit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

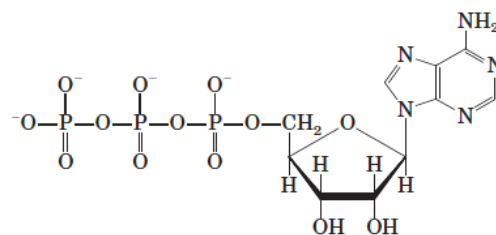
- 1 Hitung konstanta kesetimbangan K_{eq} untuk masing-masing reaksi berikut pada pH 7,0 dan 25°C, dengan menggunakan nilai ΔG°



- 2 Energi Bebas Hidrolisis CTP Bandingkan struktur nukleosida trifosfat CTP dengan struktur ATP.



Cytidine triphosphate (CTP)

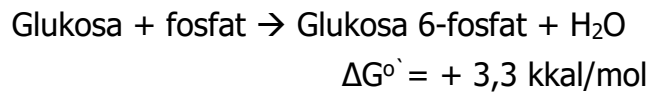


Adenosine triphosphate (ATP)

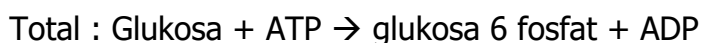
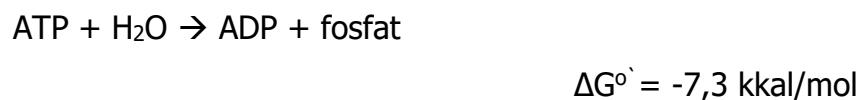
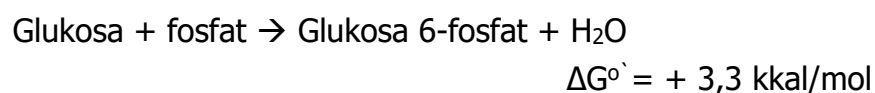
Sekarang prediksi K_{eq} dan ΔG° untuk reaksi berikut:



- 3 Strategi di dalam Mengatasi Reaksi yang sulit Berlangsung Kaitan Kimiawi yang Bergantung pada ATP. Fosforilasi glukosa menjadi glukosa 6-fosfat merupakan tahap awal di dalam katabolisme glukosa. Fosforilasi langsung glukosa oleh fosfat anorganik dijelaskan oleh persamaan:



- a) Hitunglah tetapan kesetimbangan bagi reaksi di atas. Pada sel hati tikus, konsentrasi fisiologi glukosa dan fosfat dipertahankan pada kira-kira $4,8 \text{ mM}$. Berapakah konsentrasi kesetimbangan glukosa 6-fosfat yang diperoleh dengan fosforilasi langsung glukosa oleh fosfat anorganik? Apakah lintas ini menggambarkan lintas metabolik yang beralasan bagi katabolisme glukosa? Jelaskan!
- b) Pada dasarnya, sedikitnya salah satu cara untuk meningkatkan konsentrasi glukosa 6-fosfat adalah dengan menarik kesetimbangan reaksi ke kanan dengan meningkatkan konsentrasi glukosa dan fosfat di dalam sel. Anggaplah, konsentrasi tetap fosfat $4,8 \text{ mM}$, sampai berapakah konsentrasi intraselular glukosa harus ditingkatkan untuk mencapai konsentrasi kesetimbangan glukosa 6-fosfat pada $250 \mu\text{M}$ (konsentrasi fisiologi normal)? Apakah lintas ini merupakan pendekatan yang beralasan secara fisiologi, jika diketahui bahwa kelarutan maksimum glukosa lebih kecil dari 1 M ?
- c) Seperti dijelaskan, fosforilasi glukosa di dalam sel berkaitan dengan hidrolisis ATP; yaitu, sebagian energi bebas hidrolisis ATP dipergunakan untuk mempengaruhi fosforilasi glukosa yang dalam keadaan berdiri sendiri tidak terjadi secara spontan.



Hitunglah ΔG° dan K_{eq} bagi reaksi total. Pada saat fosforilasi glukosa yang bergantung pada ATP berlangsung, berapakah konsentrasi glukosa yang diperlukan untuk mencapai konsentrasi glukosa 6-fosfat di dalam sel sebanyak $250 \mu\text{M}$, jika konsentrasi ATP dan ADP $3,38$ dan $1,32 \text{ mM}$ berturut-turut? Apakah proses (reaksi) bersama ini memberikan lintas yang memungkinkan, sedikitnya dalam prinsip, bagi fosforilasi glukosa seperti yang terjadi di dalam sel? Jelaskan?

- d) Walaupun pengkaitan hidrolisis ATP dan fosforilasi glukosa secara termodinamika merupakan hal yang masuk akal, mekanisme pengkaitan keduanya belum diteliti. Karena pengkaitan ini memerlukan senyawa perantara; salah satu lintas yang mungkin terjadi adalah menggunakan hidrolisis ATP untuk meningkatkan konsentrasi fosfat anorganik di dalam sel, dan oleh karena itu, menarik reaksi fosforilasi glukosa oleh fosfat anorganik ke arah kanan. Apakah lintas ini mungkin terjadi? Jelaskan?
- e) Fosforilasi glukosa yang berkaitan dengan hidrolisis ATP dikatalisa di dalam sel hati oleh enzim glukokinase. Enzim ini mengikat ATP dan glukosa untuk membentuk suatu kompleks enzim-glukosa-ATP, dan gugus fosfat dipindahkan secara langsung dari ATP ke glukosa. Jelaskan manfaat lintas ini!
- 2 Menghitung ΔG° bagi Reaksi-reaksi yang Melibatkan ATP Dari data ini, hitunglah nilai ΔG° bagi reaksi-reaksi
- a) Fosfokeratin + ADP \rightarrow Keratin + ATP
- b) ATP + Fruktosa \rightarrow ADP + Fruktosa 6-fosfat
- 3 Menghitung ΔG° pada Konsentrasi Fisiologi Hitunglah $\Delta G'$ (dan bukan ΔG°) fisiologik bagi reaksi



pada 25°C yang terjadi di dalam sitosol sel otak, dengan konsentrasi fosfokreatin sebesar 4,7 mM, kreatin pada 1,0 mM, ADP pada 0,20 mM dan ATP pada 2,6 mM.

- 4 Energi Bebas Diperlukan Bagi Sintesis ATP pada Kondisi Fisiologi Di dalam sitosol sel hati tikus, nisbah aksi massa adalah

$$Q = \frac{[ATP]}{[ADP][P_i]} = 5,33 \times 10^2$$

Hitunglah energi bebas yang diperlukan untuk melakukan sintesis ATP di dalam sel hati tikus.

DAFTAR PUSTAKA

1. Buckle, K.A, R.A Edwards, G.H. Fleet, and M. Wootton. 2007. Ilmu Pangan (Food Science). Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press).
2. Genomis Lab. 2013. *How to estimate carbohydrate by anthrone method*. <https://youtu.be/VzYDk4t97Ok>. di akses pada tanggal 3 November 2020.
3. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
4. Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
5. Methew, Holde, V., Ahern. 2000. *Biochemistry*. Sanfrancisco: Addison Wesley P.C
6. Sukaryawan, M. 2004. *Biokimia*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
7. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
8. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
9. Thenawidjaja, M. 1990. *Dasar-Dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
10. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
11. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
12. Winarno, F.G. 2004. *Kimia Pangan dan Gizi*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta

BAB 10 PHOTOSINTESIS

1. ORIENTASI

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah yang direncanakan adalah mahasiswa menguasai pondasi saintifik materi biokimia (CPMK3), sedangkan kemampuan akhir pada pokok bahasan ini adalah mahasiswa menguasai pondasi saintifik materi fotosintesis (Sub-CPMK3). Pengalaman belajar yang diperoleh mahasiswa merencanakan, melaksanakan dan melaporkan proyek, presentasi tugas kelompok, mengerjakan lembar kerja mahasiswa, membuat dan mensubmit Laporan di <https://elearning.unsri.ac.id>

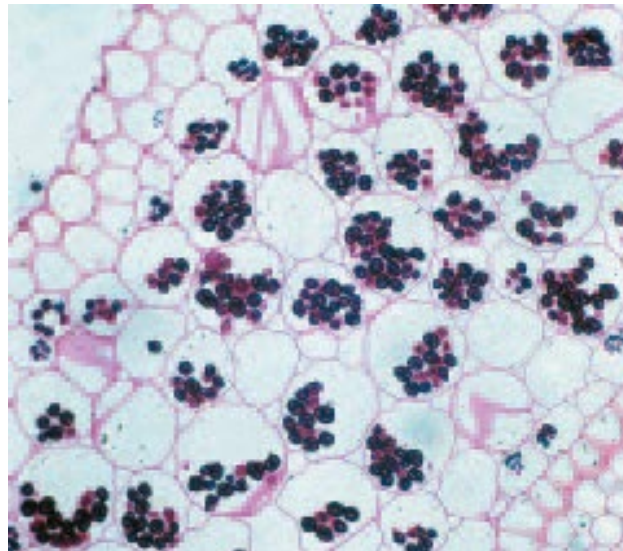
Tanaman dan mikroorganisme fotosintetik, dapat mensintesis karbohidrat dari Karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O). Tumbuhan (dan autotrof lainnya) dapat menggunakan CO_2 sebagai satu-satunya sumber atom karbon yang diperlukan untuk biosintesis selulosa, pati, lipid dan protein, dan banyak komponen organik sel tumbuhan lainnya. Sebaliknya, heterotrof tidak dapat menghasilkan reduksi bersih CO_2 untuk mencapai sintesis glukosa bersih. Tumbuhan hijau mengandung kloroplas merupakan mesin enzimatik unik yang mengkatalisis konversi CO_2 menjadi senyawa organik sederhana (direduksi), sebuah proses yang disebut asimilasi CO_2 . Proses ini juga disebut fiksasi CO_2 atau fiksasi karbon, tetapi istilah ini digunakan kembali untuk reaksi spesifik di mana CO_2 digabungkan (difiksasi) ke dalam senyawa organik tiga karbon, triosa fosfat 3-fosfoglisarat. Fotosintesis merupakan prekursor biomolekul kompleks, termasuk gula, polisakarida, dan metabolit yang lain, yang semuanya disintesis diukur dengan jalur metabolisme mirip dengan jaringan hewan. Pada awal 1950-an oleh Melvin Calvin, Andrew Benson, dan James A. Bassham, dan sering disebut siklus Calvin atau lebih deskriptif, siklus reduksi karbon fotosintesis.

Metabolisme karbohidrat lebih kompleks pada sel tumbuhan daripada sel hewan atau mikroorganisme nonfotosintetik. Selain jalur universal glikolisis dan glukoneogenesis, tanaman memiliki urutan reaksi unik untuk reduksi CO_2 menjadi triosa fosfat dan jalur pentosa fosfat reduktif terkait semuanya harus

diatur secara terkoordinasi untuk memastikan alokasi karbon yang tepat untuk energi produksi dan sintesis pati dan sukrosa. Enzim-enzim yang berperan diatur, seperti reduksi ikatan disulfida oleh elektron yang mengalir dari fotosistem I dan fotosistem 2, perubahan pH dan konsentrasi Mg^{2+} yang dihasilkan dari iluminasi. Selain itu juga memerlukan enzim yang dimodulasi oleh regulasi alosterik konvensional dan modifikasi kovalen (fosforilasi).

Sebagian besar aktivitas biosintetik pada tumbuhan (termasuk asimilasi CO_2) terjadi pada plastida, suatu organel yang bereproduksi sendiri yang dibatasi oleh membran ganda dan mengandung genom kecil yang mengkode beberapa proteinnya. Sebagian besar protein yang ditujukan untuk plastida dikodekan dalam gen, yang ditranskripsi dan diterjemahkan seperti gen lainnya, kemudian protein diimpor ke dalam plastida. Plastida berkembang biak dengan pembelahan biner, mereplikasi genom mereka (molekul DNA melingkar tunggal) menggunakan enzim dan ribosom mereka sendiri untuk mensintesis protein yang dikodekan oleh genom itu. Enzim untuk proses ini terkandung dalam stroma, fase larut yang dibatasi oleh membran kloroplas bagian dalam. Amiloplas adalah plastida tidak berwarna (yaitu, tidak memiliki klorofil dan pigmen lain yang ditemukan dalam kloroplas), tidak memiliki membran internal yang analog dengan membran fotosintesis (tilakoid) kloroplas, dan dalam jaringan tanaman yang kaya pati, plastida ini dikemas dengan butiran pati.

Kloroplas dapat diubah menjadi proplastida dengan hilangnya membran internal dan klorofil, dan proplastida dapat saling dipertukarkan dengan amiloplas. Pada gilirannya, baik amiloplas dan proplastida dapat berkembang menjadi kloroplas. Proporsi relatif dari jenis plastida tergantung pada jenis jaringan tanaman dan intensitas cahaya. Sel-sel daun hijau kaya akan kloroplas, sedangkan amiloplas mendominasi jaringan nonfotosintetik yang menyimpan pati dalam jumlah besar, seperti umbi kentang. Membran dalam dari semua jenis plastida tidak dapat ditembus oleh molekul polar dan bermuatan. Lalu lintas melintasi membran ini dimediasi oleh set transporter tertentu.

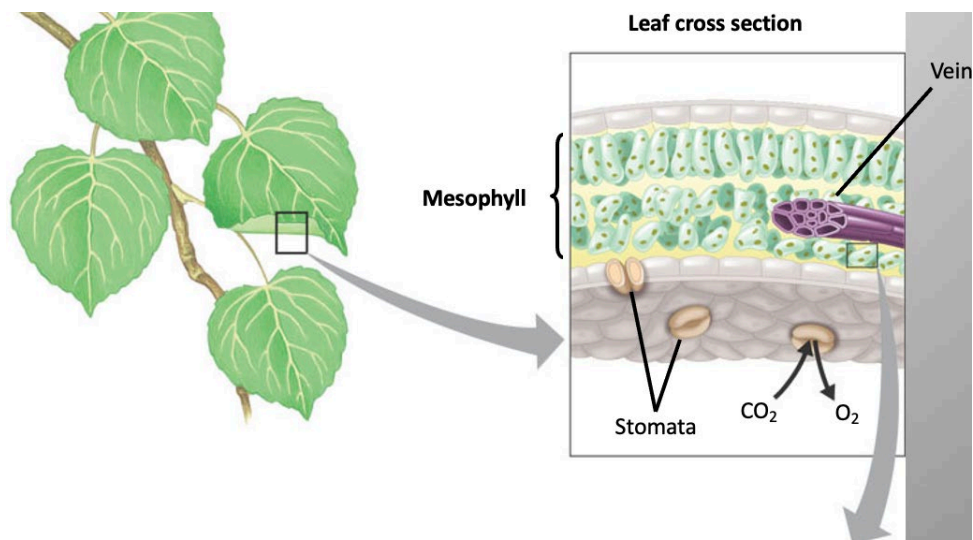


Gambar 237 Amiloplas
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Amiloplas yang diisi dengan pati (butiran gelap) diwarnai dengan yodium di bagian sel akar *Ranunculus* ini. Granula pati di berbagai jaringan berdiameter 1 hingga 100 μ m.

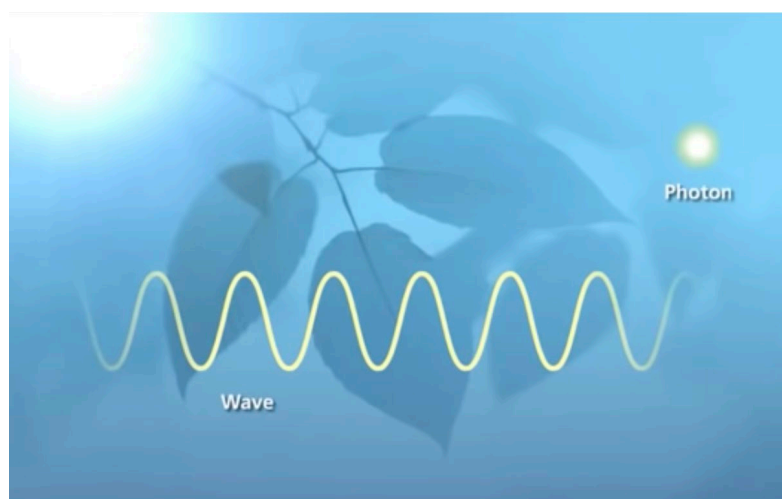
A. Proses Fotosintesis

Fotosintesis adalah proses pemanfaatan energi cahaya yang berasal dari energi matahari oleh kloroplas tumbuhan untuk mengubah menjadi energi kimiawi yang disimpan dalam bentuk gula dan molekul organik lainnya. Tanaman sebagai organisme autotrof membuat molekul organik sendiri dari bahan mentah anorganik yang diperoleh dari lingkungannya. Daun adalah tempat utama terjadinya fotosintesis. Energi yang digunakan untuk fotosintesis berasal dari cahaya matahari yang diserap oleh kloroplas di dalam daun. Bahan yang digunakan untuk fotosintesis adalah air dan karbondioksida. Air (H_2O) sebagai bahan dalam tanah menyebar dari akar melalui xylem. Karbondioksida (CO_2) sebagai bahan di udara masuk melalui stomata. Produk yang dihasilkan dari fotosintesis adalah glukosa ($C_6H_{12}O_6$) merupakan produk fotosintesis berenergi tinggi yang menyebar ke seluruh bagian tanaman lewat floem. Oksigen (O_2) adalah produk fotosintesis yang keluar dari daun melalui stomata.

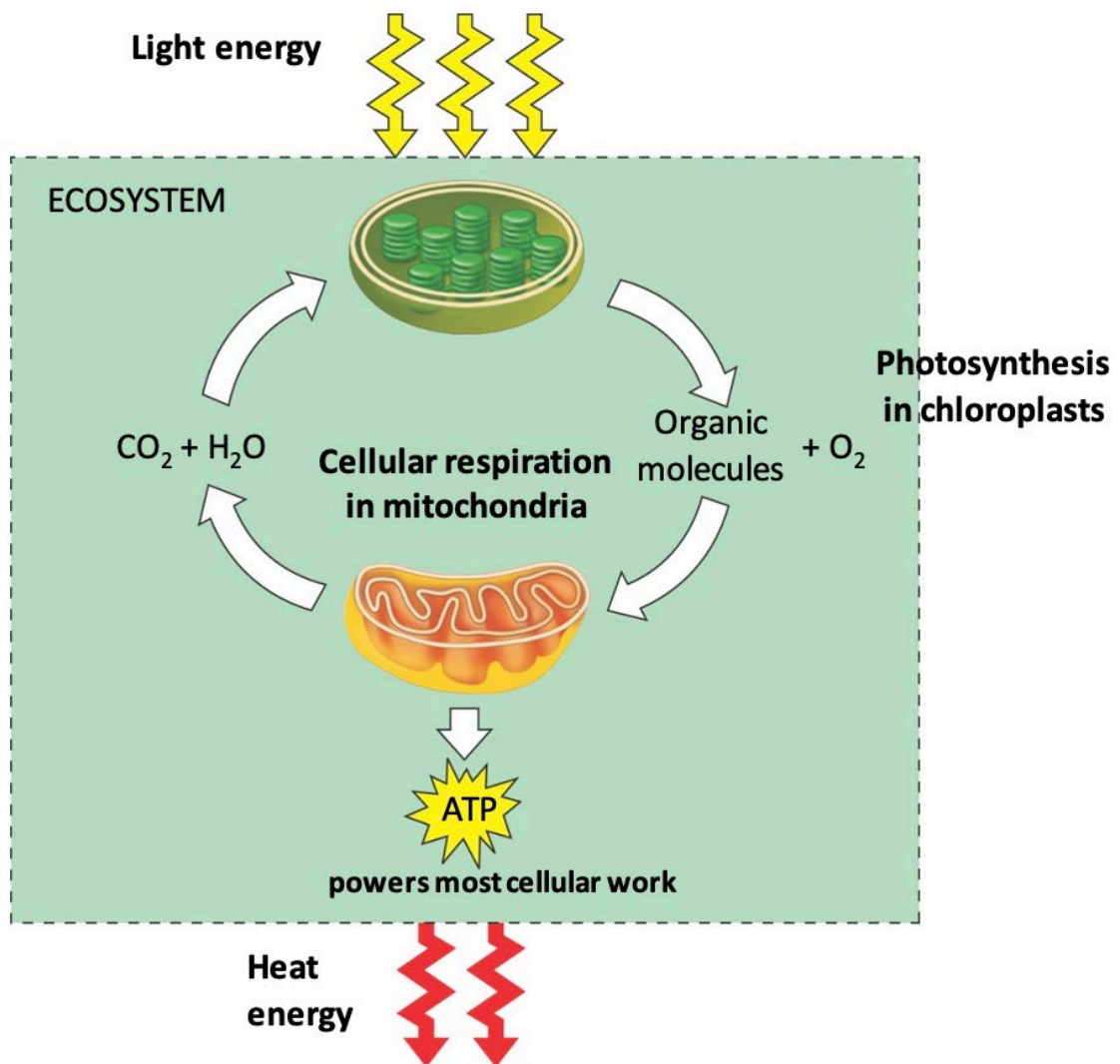


Gambar 238 Stomata

Klorofil adalah pigmen menyerap cahaya yaitu radiasi elektromagnetik pada spektrum cahaya tampak. Energi cahaya yang diserap klorofil inilah yang menggerakkan sintesis molekul dalam kloroplas. Kloroplas ditemukan terutama di dalam sel mesofil yaitu jaringan yang terdapat di bagian dalam daun. Energi mengalir ke dalam suatu ekosistem sebagai cahaya matahari dan meninggalkannya dalam bentuk panas. Untuk lebih memahami materi ini dapat dilihat pada video berikut ini.

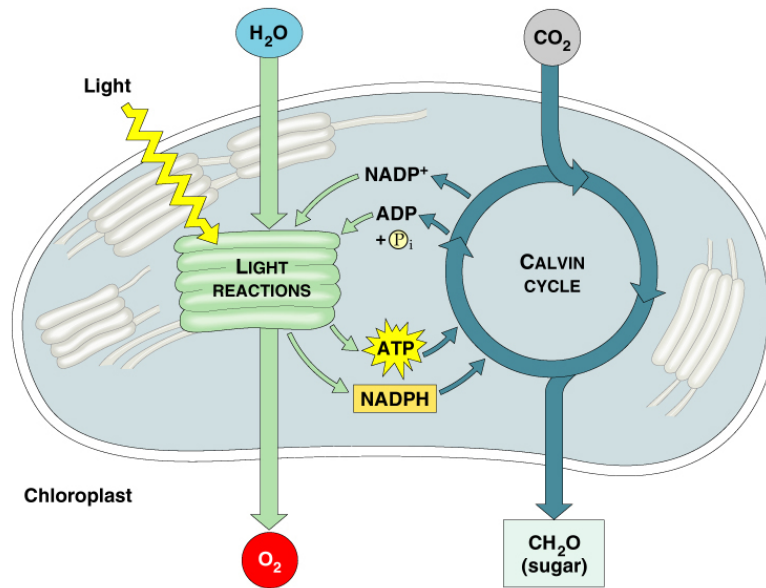


Gambar 239 Fotosintesis
 Sumber: <https://youtu.be/KfvYQgT2M-k>



Gambar 240 Respirasi selular dalam mitokondria

Photosintesis suatu proses dimana organisme yang memiliki kloroplas mengubah energi cahaya matahari menjadi energi kimia, melibatkan 2 lintasan metabolik yaitu reaksi terang: mengubah energi matahari menjadi energi seluler dan reaksi gelap pada siklus Calvin: reduksi CO₂ menjadi CH₂O

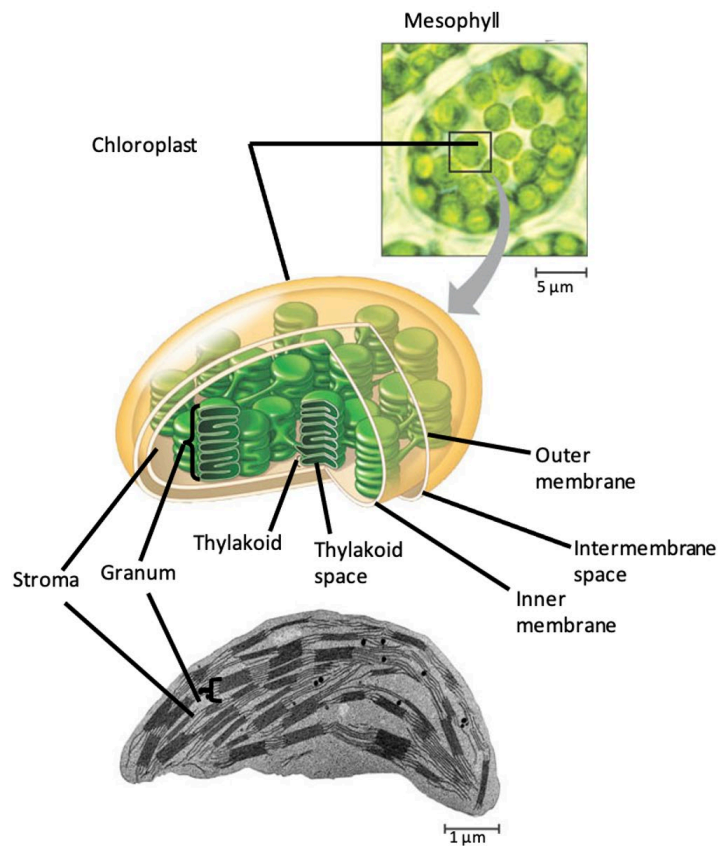


Gambar 241 Reaksi Gelap dan Terang

Pada dasarnya, rangkaian reaksi fotosintesis dapat dibagi menjadi dua bagian utama: reaksi terang (karena memerlukan cahaya) dan reaksi gelap (tidak memerlukan cahaya tetapi memerlukan karbon dioksida). Reaksi terang terjadi pada tilakoid, sedangkan reaksi gelap terjadi di dalam stroma. Dalam reaksi terang, terjadi konversi energi cahaya menjadi energi kimia dan menghasilkan oksigen (O_2). Sedangkan dalam reaksi gelap terjadi seri reaksi siklik yang membentuk gula dari bahan dasar CO_2 dan energi (ATP dan NADPH).

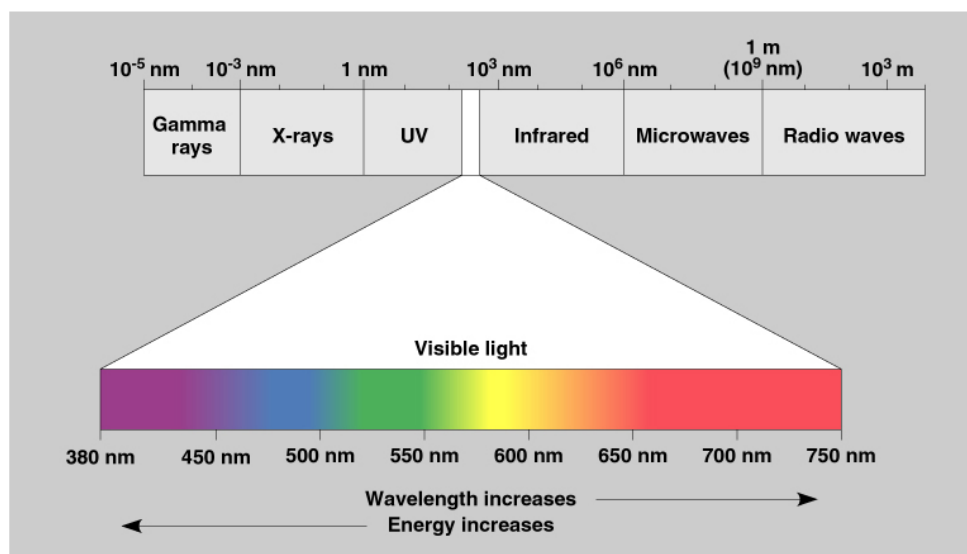
B. Reaksi Terang

Tilakoid adalah sistem membran dalam kloroplas (tempat terjadinya reaksi terang). Memisahkan kloroplas menjadi ruang tilakoid dan stroma. Grana kumpulan tilakoid dalam kloroplas. Stroma adalah daerah cair antara tilakoid dan membran dalam tempat terjadi siklus Calvin.



Gambar 242 Cloroplas

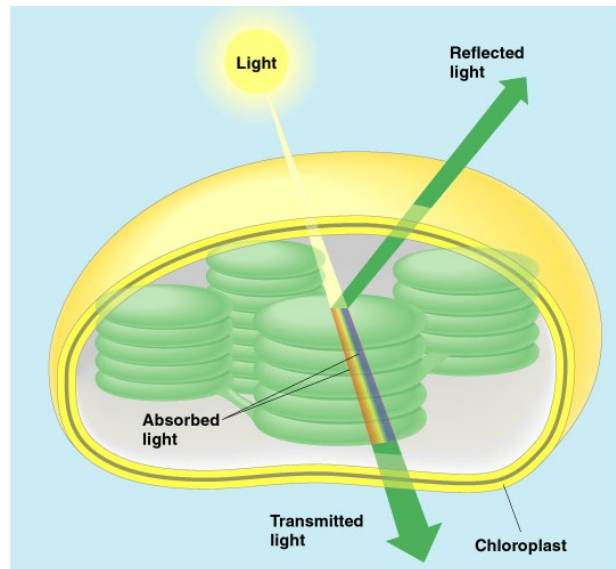
Energi elektromagnetik bergerak dalam bentuk gelombang, terdapat hubungan yang berbalik antara panjang gelombang dengan energi, panjang gelombang tinggi maka energi rendah.



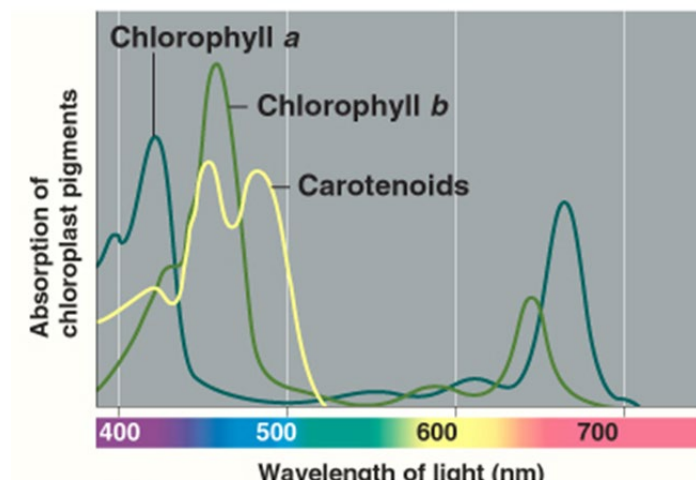
©1999 Addison Wesley Longman, Inc.

Gambar 243 Pita Cahaya Tampak

Substansi yang menyerap cahaya tampak, kebanyakan menyerap panjang gelombang hijau, pigmen klorofil *a*, klorofil *b*, Karotenoid, Karotene dan Xantofil.



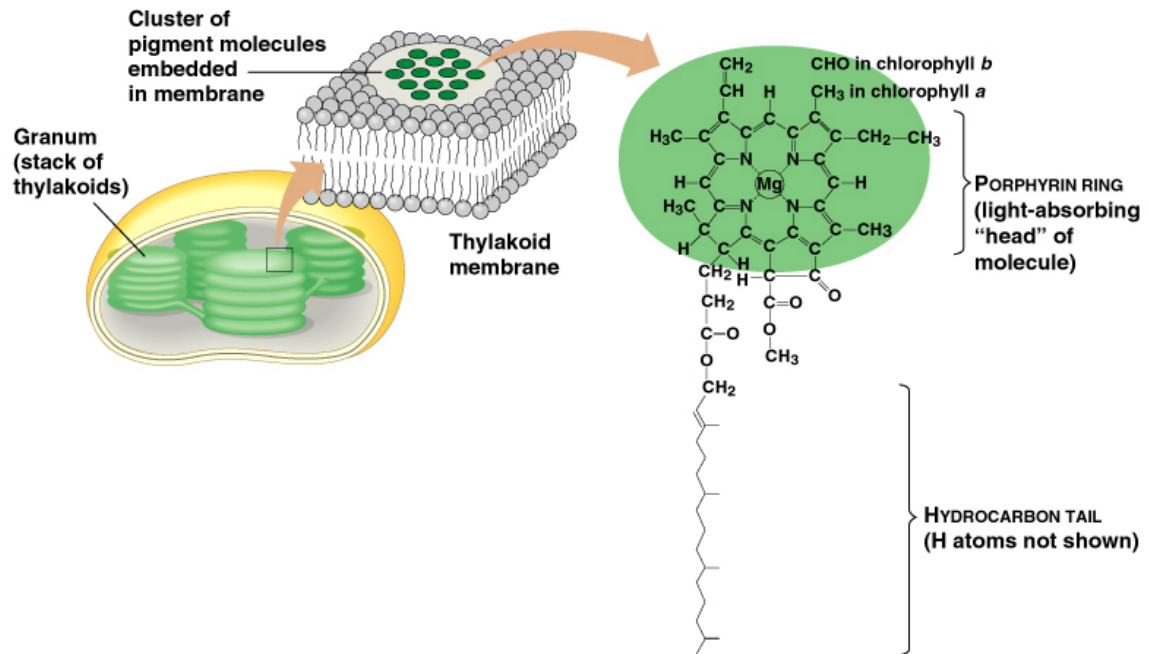
Gambar 244 Absorpsi foton



Gambar 245 Absorpsi foton pada panjang gelombang tampak

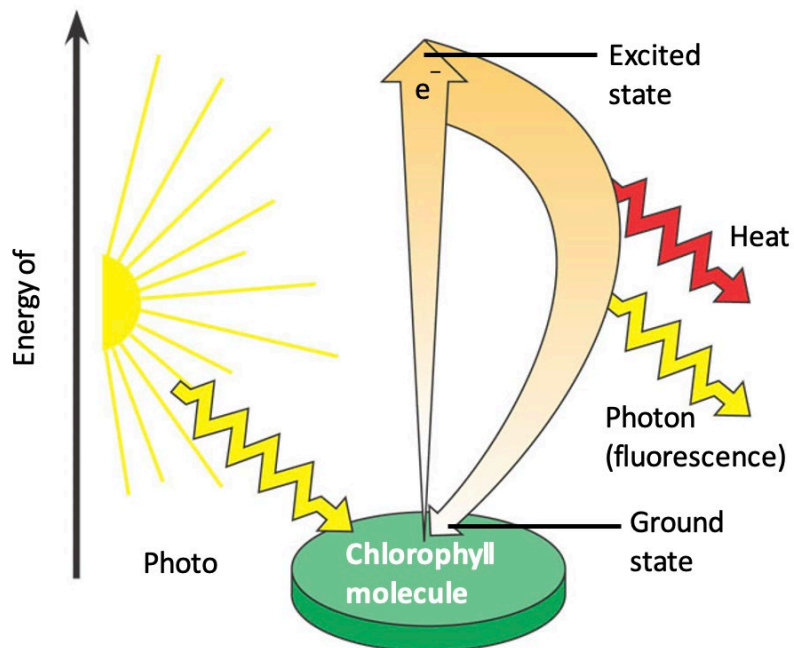
Klorofil *a* adalah pigmen yang secara langsung berpartisipasi dalam reaksi terang, pigmen lain menambahkan energi ke klorofil *a*, penyerapan cahaya meningkatkan elektron ke orbital energi yang lebih tinggi.

Klorofil a:



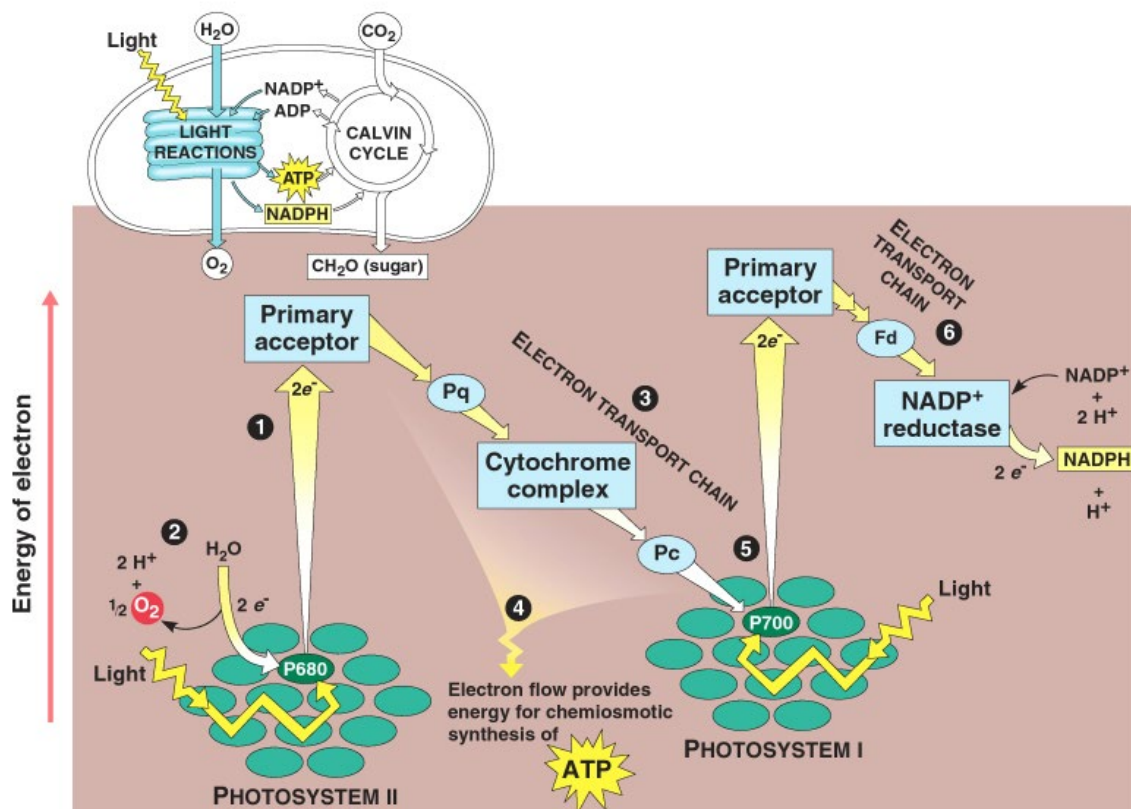
Gambar 246 Clorofil

Klorofil tereksitasi oleh cahaya pada saat pigmen menyerap cahaya, pada keadaan ini klorofil tereksitasi dan menjadi tidak stabil.



Gambar 247 Molekul keadaan tereksitasi.

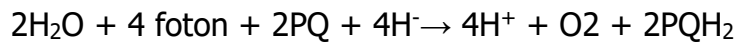
Reaksi terang fotosintesis pada membran tilakoid, adalah proses untuk menghasilkan ATP dan reduksi NADPH₂. Reaksi ini memerlukan molekul air dan cahaya matahari. Proses diawali dengan penangkapan foton oleh pigmen sebagai antena. Reaksi terang melibatkan dua fotosistem yang saling bekerja sama, yaitu fotosistem I dan fotosistem II. Fotosistem I berisi pusat reaksi P700, yang berarti bahwa fotosistem ini optimal menyerap cahaya pada panjang gelombang 700 nm, sedangkan fotosistem II berisi pusat reaksi P680 dan optimal menyerap cahaya pada panjang gelombang 680 nm.



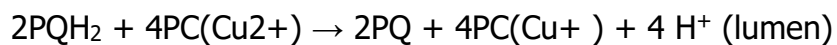
Gambar 248 Photosistem I dan Photosistem 2

Mekanisme reaksi terang diawali dengan tahap di mana fotosistem II menyerap cahaya matahari sehingga elektron klorofil pada fotosistem II tereksitasi dan menyebabkan muatan menjadi tidak stabil. Untuk menstabilkan kembali, fotosistem II akan mengambil elektron dari molekul H₂O yang ada disekitarnya. Molekul air akan dipecahkan oleh ion mangan (Mn²⁺) yang bertindak sebagai Koenzim. Hal ini akan mengakibatkan pelepasan H⁺ di lumen tilakoid. Dengan menggunakan elektron dari

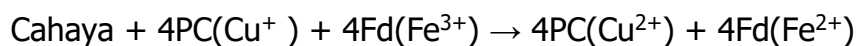
air, selanjutnya fotosistem II akan mereduksi plastokuinon (PQ) membentuk PQH₂. Plastokuinon merupakan molekul kuinon yang terdapat pada membran lipid bilayer tilakoid. Plastokuinon ini akan mengirimkan elektron dari fotosistem II ke suatu pompa H⁺ yang disebut sitokrom b6-f kompleks. Reaksi keseluruhan yang terjadi di fotosistem II adalah :



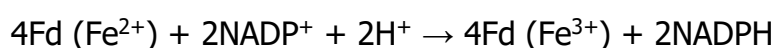
Sitokrom b6-f kompleks berfungsi untuk membawa elektron dari fotosistem II ke fotosistem I dengan mengoksidasi PQH₂ dan mereduksi protein kecil yang sangat mudah bergerak dan mengandung tembaga, yang dinamakan plastosianin (PC). Kejadian ini juga menyebabkan terjadinya pompa H⁺ dari stroma ke membran tilakoid. Reaksi yang terjadi pada sitokrom b6-f kompleks adalah :



Elektron dari sitokrom b6-f kompleks akan diterima oleh fotosistem I, fotosistem ini menyerap energi cahaya terpisah dari fotosistem II, tetapi mengandung kompleks inti terpisah, yang menerima elektron yang berasal dari H₂O melalui kompleks inti fotosistem II lebih dahulu. Sebagai sistem yang bergantung pada cahaya, fotosistem I berfungsi mengoksidasi plastosianin tereduksi dan memindahkan elektron ke protein Fe-S larut yang disebut feredoksin. Reaksi keseluruhan pada fotosistem I adalah :

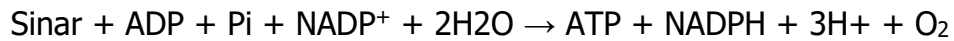


Selanjutnya elektron dari feredoksin digunakan dalam tahap akhir pengangkutan elektron untuk mereduksi NADP⁺ dan membentuk NADPH. Reaksi ini dikatalisis dalam stroma oleh enzim feredoksin-NADP⁺ reduktase. Adapun reaksinya adalah :

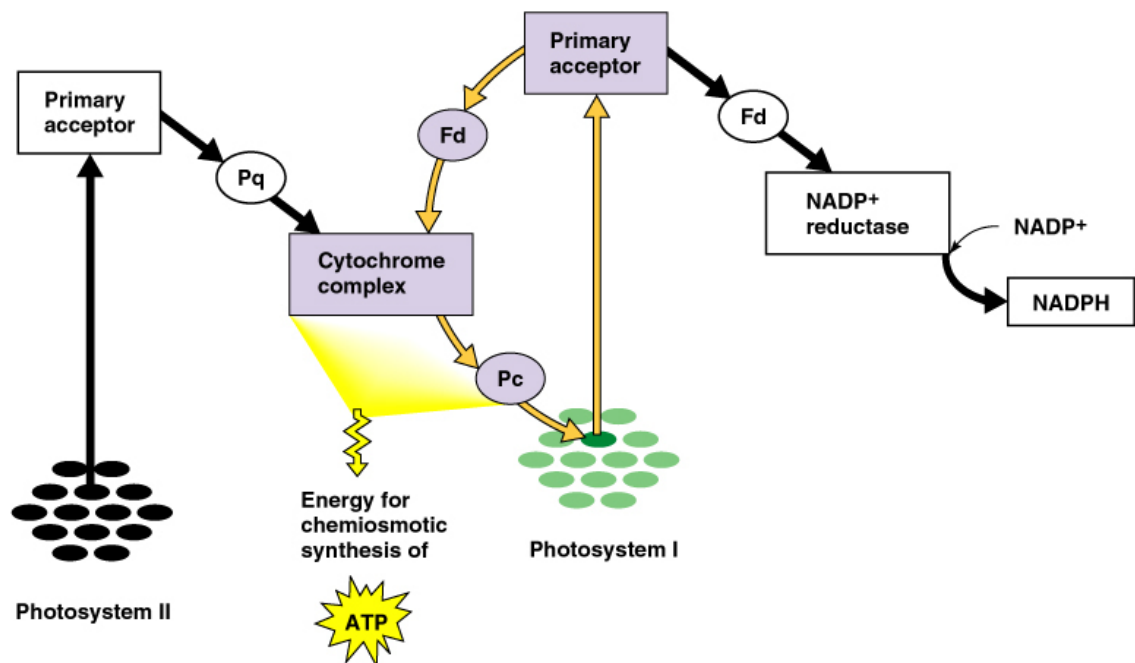


Ion H⁺ yang telah dipompa ke dalam membran tilakoid akan masuk ke dalam ATP sintase. ATP sintase akan menggandengkan pembentukan ATP dengan pengangkutan elektron dan H⁺ melintasi membran tilakoid. Masuknya H⁺ pada ATP sintase akan membuat ATP sintase bekerja mengubah ADP dan fosfat anorganik (Pi) menjadi ATP.

Reaksi keseluruhan yang terjadi pada reaksi terang adalah sebagai berikut :



Reaksi siklus hanya berlangsung pada fotosistem I. Setelah elektron dipindahkan dari fotosistem, elektron digerakkan melewati molekul penerima elektron dan dikembalikan ke fotosistem I, yang dari sanalah awalnya elektron dikeluarkan, sehingga reaksi ini diberi nama reaksi siklus.



Gambar 249 Aliran Siklik

NADPH adalah agen pereduksi utama dalam kloroplas, menyediakan sumber elektron enerjik kepada reaksi lainnya. Produksinya meninggalkan klorofil dengan defisit elektron (teroksidasi), yang harus diperoleh dari beberapa agen pereduksi lainnya. Elektron yang hilang dari klorofil pada fotosistem I ini digantikan dari rangkaian transport elektron oleh plastosianin. Akan tetapi, karena fotosistem II

meliputi tahap pertama dari skema Z, sumber elektron eksternal diperlukan untuk mereduksi molekul klorofil a-nya yang telah teroksidasi. Sumber elektron pada tanaman hijau dan fotosintesis cyanobacteria adalah air. Dua molekul air teroksidasi oleh empat reaksi pemisahan-tenaga berturut-turut oleh fotosistem II untuk menghasilkan satu molekul oksigen diatom dan empat ion hidrogen; elektron yang dihasilkan pada tiap tahap dipindahkan ke residu tirosin redoks-aktif yang kemudian mereduksi spesies klorofil a yang berpasangan yang telah terfotooksidasi yang disebut P680 yang berguna sebagai donor elektron primer (digerakkan oleh cahaya) pada pusat reaksi fotosistem II.

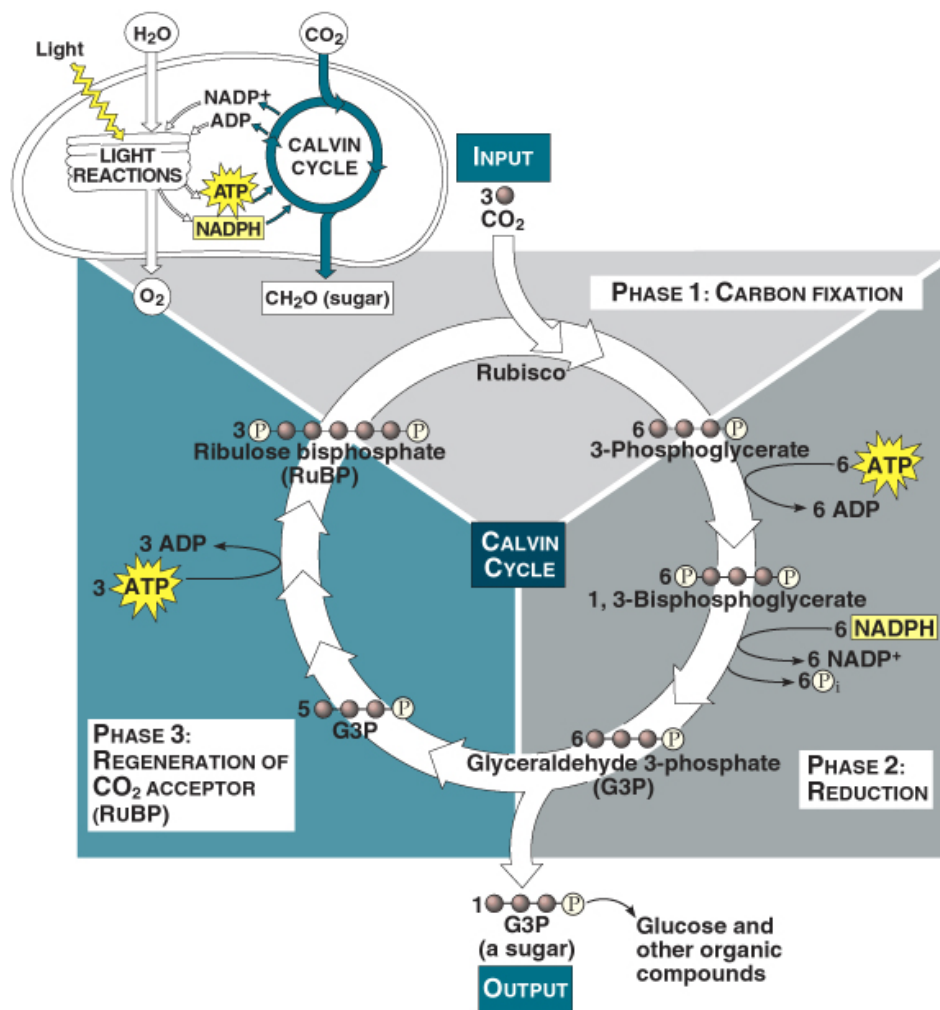
Oksidasi air terkatalisasi pada fotosistem oleh fotosistem II oleh suatu struktur redoks-aktif yang mengandung empat ion mangan dan satu ion kalsium; kompleks evolusi oksigen ini mengikat dua molekul air dan menyimpan empat padanannya yang telah teroksidasi yang diperlukan untuk melakukan reaksi oksidasi air. Fotosistem II adalah satu-satunya enzim biologi yang diketahui melaksanakan oksidasi air ini. Ion hidrogen berkontribusi terhadap potensi kemiosmosis transmembran yang berujung pada sintesis ATP. Oksigen adalah produk samping dari reaksi cahaya, namun sebagian besar organisme di Bumi menggunakan oksigen untuk respirasi sel, termasuk organisme fotosintesis.

C. Siklus Calvin

Siklus Calvin menggunakan ATP dan NADPH untuk mengkonversi CO₂ menjadi gula, siklus calvin terjadi di stroma. Siklus Calvin memiliki 3 tahap: fiksasi karbon, reduksi dan regenerasi akseptor CO₂.

Tahap pertama asimilasi CO₂ menjadi biomolekul (adalah reaksi fiksasi karbon: kondensasi CO₂ dengan penerima lima karbon, ribulosa 1,5-bifosfat, untuk membentuk dua molekul 3-fosfoglisarat. Pada tahap kedua, 3-fosfoglisarat direduksi menjadi triosa fosfat. Secara keseluruhan, tiga molekul CO₂ difiksasi ke tiga molekul ribulosa 1,5-bifosfat untuk membentuk enam molekul gliseraldehida 3-fosfat (18 karbon) dalam kesetimbangan dengan dihidroksiaseton fosfat. Pada tahap ketiga, lima dari enam molekul triosa fosfat (15 karbon) digunakan untuk meregenerasi tiga molekul ribulosa 1,5-bifosfat (15 karbon), bahan awal. Molekul keenam triosa fosfat,

produk bersih fotosintesis, dapat digunakan untuk membuat heksosa untuk bahan bakar, sukrosa untuk transportasi ke jaringan nonfotosintetik, atau pati untuk penyimpanan. Jadi proses keseluruhan adalah siklus, dengan konversi berkelanjutan dari CO₂ menjadi triosa fosfat dan heksosa. Fruktosa 6-fosfat adalah perantara kunci dalam tahap 3 asimilasi CO₂, mengarah pada regenerasi ribulosa 1,5-bifosfat atau sintesis pati. Jalur dari heksosa fosfat ke pentosa bifosfat melibatkan banyak reaksi yang sama yang digunakan dalam sel hewan untuk konversi pentosa fosfat menjadi heksosa fosfat selama fase nonoksidatif dari jalur pentosa fosfat. Dalam asimilasi CO₂ fotosintesis, pada dasarnya rangkaian reaksi yang sama bereaksi ke arah lain, mengubah heksosa fosfat menjadi pentosa fosfat. Siklus pentosa fosfat reduktif ini menggunakan enzim yang sama dengan jalur oksidatif, dan beberapa enzim lagi yang membuat siklus reduktif tidak dapat diubah.



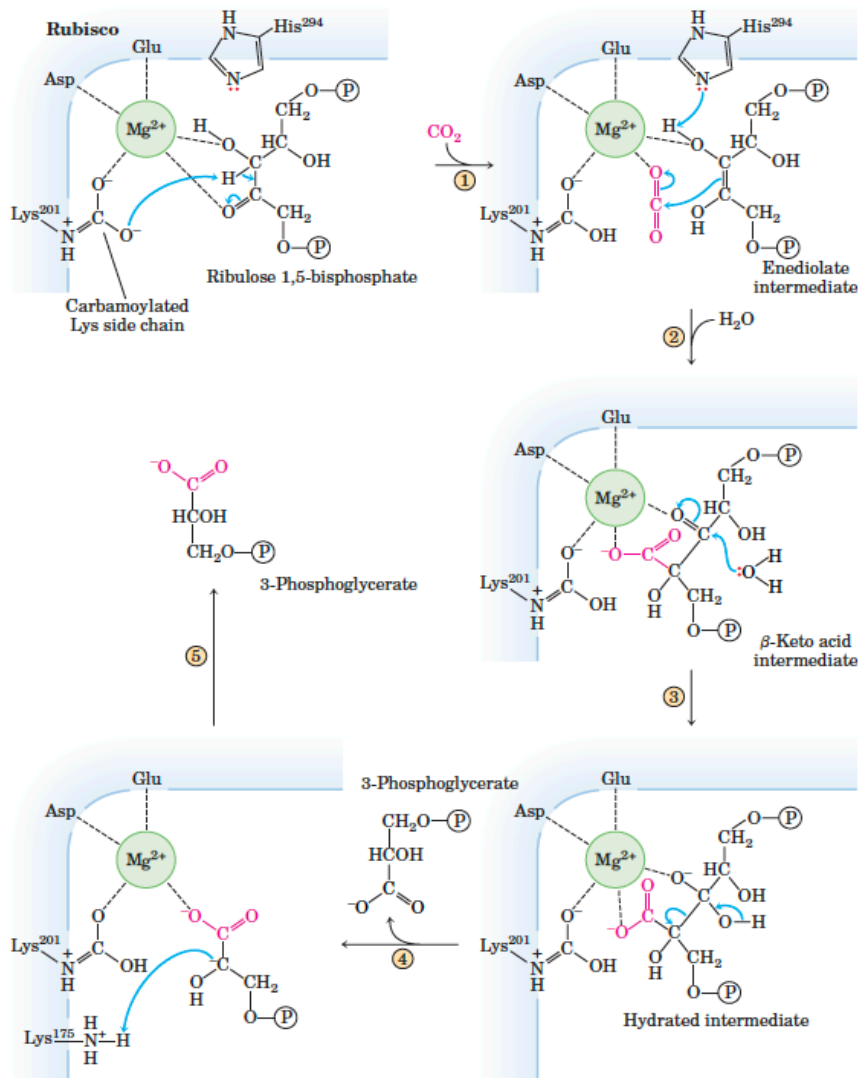
Gambar 250 Siklus Calvin.

Secara rinci mekanisme reaksi Calvin sebagai berikut: Tahap 1: Fiksasi CO₂ menjadi 3-Fosfoglisarat, mekanisme asimilasi CO₂ pada organisme fotosintesis muncul pada akhir 1940-an, Calvin dan rekan-rekannya melebel suspensi ganggang hijau dengan adanya karbon dioksida radioaktif (¹⁴CO₂) hanya selama beberapa detik, kemudian dengan cepat membunuh sel, mengekstrak isinya, dan dengan bantuan metode kromatografi mencari metabolit di mana karbon berlabel pertama kali muncul. Senyawa pertama yang diberi label adalah 3-fosfoglisarat, dengan ¹⁴C sebagian besar terletak di atom karbon karboksil. Eksperimen ini menghasilkan bahwa 3-fosfoglisarat adalah perantara awal dalam fotosintesis.

Enzim yang mengkatalisis penggabungan CO₂ ke dalam bentuk organik adalah ribulosa 1,5-bifosfat karboksilase/oksigenase, namanya disingkat menjadi rubisco. Sebagai karboksilase, rubisco mengkatalisis ikatan kovalen CO₂ ke gula lima karbon ribulosa 1,5-bifosfat dan pemutusan enam karbon antara yang tidak stabil untuk membentuk dua molekul 3-fosfoglisarat. Rubisco tanaman merupakan enzim penting dalam produksi biomassa CO₂, memiliki struktur kompleks dengan delapan subunit besar yang identik (Mr 53.000; dikodekan dalam genom kloroplas, atau plastom), masing-masing berisi situs katalitik, dan delapan sub-unit kecil yang identik (Mr 14.000; dikodekan dalam genom inti) dengan fungsi yang tidak pasti. Rubisco bakteri fotosintetik lebih sederhana dalam struktur, memiliki dua subunit menyerupai subunit besar dari enzim tanaman. Kesamaan ini konsisten dengan hipotesis endosimbion untuk asal usul kloroplas. Enzim tanaman memiliki jumlah turnover yang sangat rendah; hanya tiga molekul CO₂ yang tetap per detik per molekul rubisco pada 25°C. Untuk mencapai tingkat fiksasi CO₂ yang tinggi, tanaman membutuhkan sejumlah besar enzim ini. Faktanya, rubisco membentuk hampir 50% protein larut dalam kloroplas dan mungkin merupakan salah satu enzim yang paling melimpah di biosfer.

Inti dari mekanisme yang diusulkan untuk rubisco tanaman adalah rantai samping Lys yang terkarbamoilasi dengan ion Mg²⁺ yang terikat. Ion Mg²⁺ menyatukan dan mengarahkan reaktan pada sisi aktif dan mempolarisasi CO₂, membukanya terhadap serangan nukleofilik oleh zat antara reaksi eniolat lima karbon

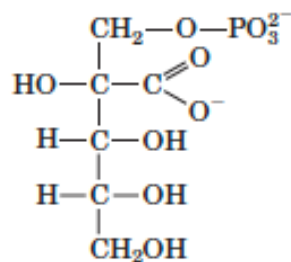
yang terbentuk pada enzim. Zat antara enam karbon yang dihasilkan terurai untuk menghasilkan dua molekul 3-fosfoglisarat.



Gambar 251 Tahap pertama asimilasi CO₂

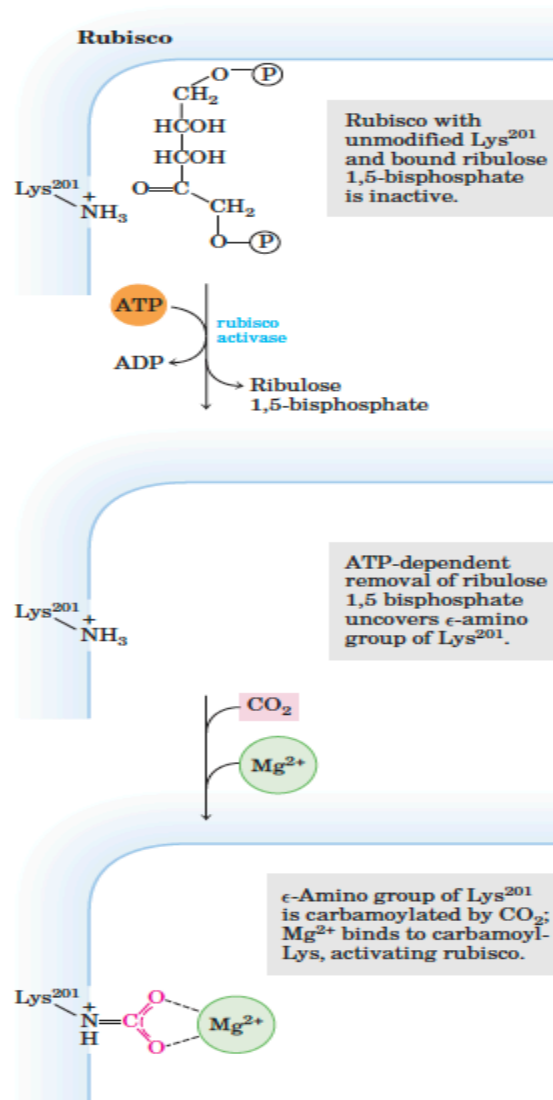
Aktivitas karboksilase rubisco, Reaksi fiksasi CO₂ dikatalisis oleh ribulosa 1,5-bifosfat karboksilase/oksigenase (rubisco). 1 Ribulosa 1,5-bifosfat membentuk enediolat di situs aktif. 2CO₂, terpolarisasi oleh kedekatan ion Mg²⁺, mengalami serangan nukleofilik oleh enediolat, menghasilkan gula enam karbon bercabang. 3 Hidroksi-lasi pada C-3 gula ini, diikuti oleh pembelahan aldol 4 , membentuk satu molekul 3-fosfoglisarat, yang meninggalkan situs aktif enzim.

Sebagai katalis untuk langkah pertama asimilasi CO₂ fotosintesis, rubisco adalah target utama regulasi. Enzim tidak aktif sampai karbamoilasi pada gugus amino Lys201. Ribulosa 1,5-bifosfat menghambat karbamoilasi dengan mengikat erat ke situs aktif dan mengunci enzim dalam konformasi "tertutup", di mana Lys201 tidak dapat diakses. Rubisco activase mengatasi penghambatan dengan pelepasan ATP dari ribulosa 1,5-bifosfat, mengekspos gugus amino Lys ke karbamoilasi nonenzimatik oleh CO₂; ini diikuti oleh pengikatan Mg²⁺, yang mengaktifkan rubisco. Rubisco activase pada beberapa spesies diaktifkan oleh cahaya melalui mekanisme redoks. Mekanisme pengaturan lainnya melibatkan "inhibitor nokturnal" 2-karboksyarabinitol 1-fosfat, analog keadaan transisi yang terjadi secara alami dengan struktur yang mirip dengan asam keto perantara dari reaksi rubisco. Senyawa ini, disintesis dalam reaksi gelap di beberapa tanaman, merupakan inhibitor kuat dari rubisco karbamoilasi.

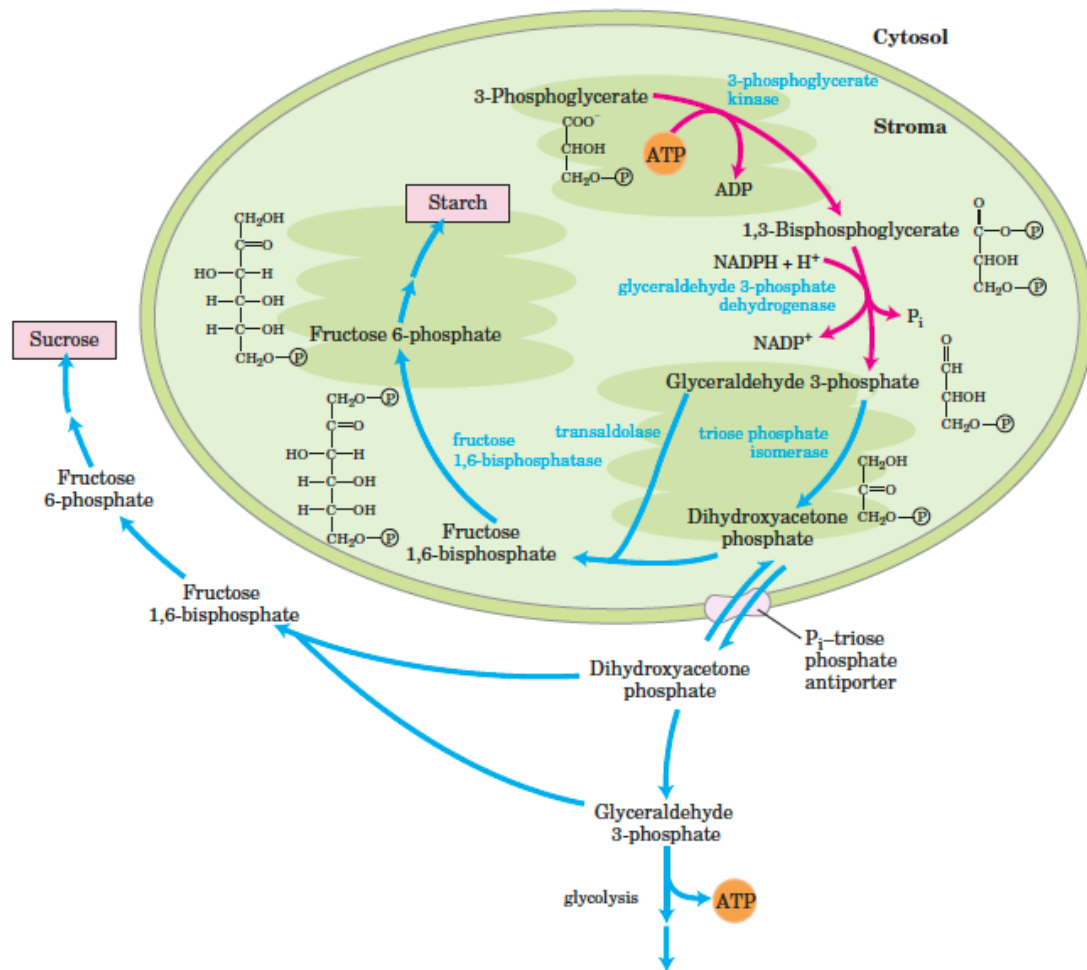


2-Carboxyarabinitol 1-phosphate

Tahap 2: Konversi 3-Fosfoglisarat menjadi Gliseraldehida 3-Fosfat, 3-fosfoglisarat yang terbentuk pada tahap 1 diubah menjadi gliseraldehida 3-fosfat dalam dua langkah yang pada dasarnya merupakan kebalikan dari langkah-langkah yang sesuai dalam glikolisis, dengan satu pengecualian: kofaktor nukleotida untuk reduksi 1,3-bisfosfoglisarat adalah NADPH. Stroma kloroplas mengandung semua enzim glikolitik kecuali fosfoglisarat mutase. Enzim stroma dan sitosol adalah isozim; kedua enzim mengkatalisis reaksi yang sama, tetapi mereka adalah produk dari gen yang berbeda.



Pada langkah pertama tahap 2, stroma 3-fosfo-gliserat kinase mengkatalisis transfer gugus fosforil dari ATP ke 3-fosfogliserat, menghasilkan 1,3-bisfosfogliserat. Selanjutnya, NADPH menyumbangkan elektron dalam reduksi yang dikatalisis oleh isozim spesifik kloroplas dari gliseraldehida 3-fosfat dehidrogenase, menghasilkan gliseraldehida 3-fosfat dan P_i . Triose phosphate isomerase kemudian mengubah gliseraldehida 3-fosfat dan dihidroksiaseton fosfat.

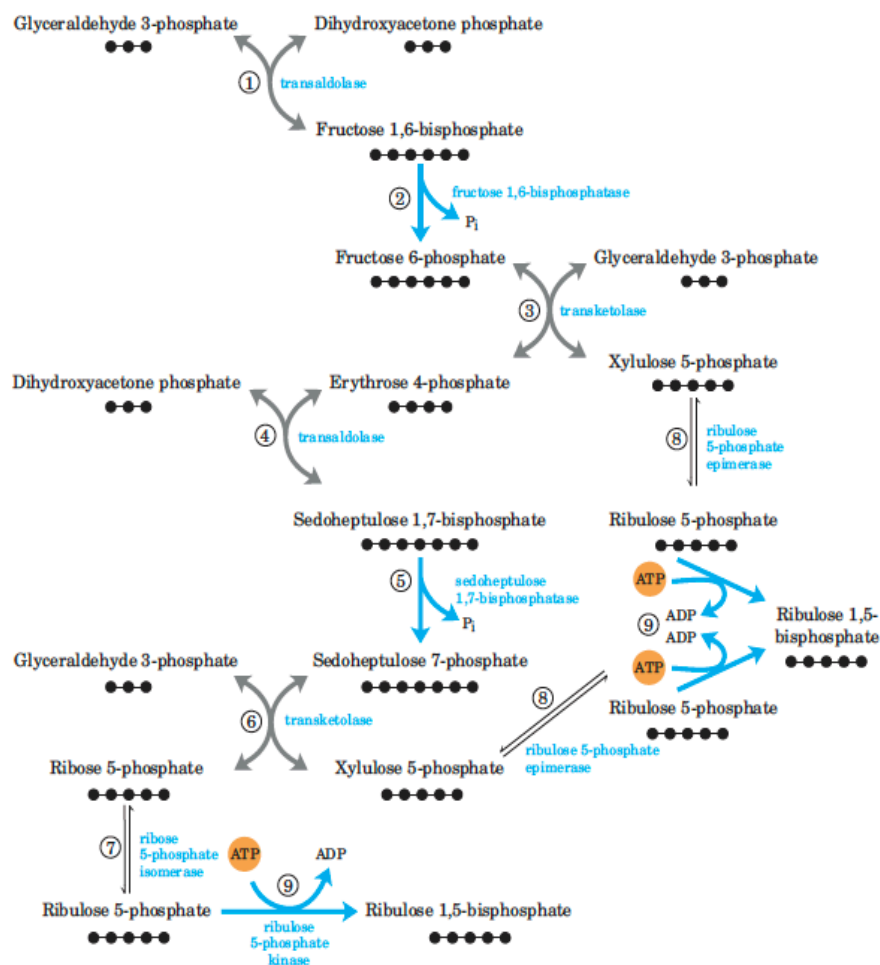


Gambar 252 Asimilasi CO₂ tahap kedua.
Sumber: Nelson & Cox, 2013

3-Fosfogliserat diubah menjadi gliseraldehida 3-fosfat (panah merah). Juga ditunjukkan nasib alternatif dari karbon tetap gliseraldehida 3-fosfat (panah biru). Sebagian besar gliseraldehida 3-fosfat didaur ulang menjadi ribulosa 1,5-bifosfat. Sebagian kecil dari "ekstra" gliseraldehida 3-fosfat dapat digunakan segera sebagai sumber energi, tetapi sebagian besar diubah menjadi sukrosa untuk transportasi atau disimpan dalam kloroplas sebagai pati.

Gliseraldehida 3-fosfat mengembun dengan dihidroksiaseton fosfat di stroma untuk membentuk fruktosa 1,6-bifosfat, prekursor pati. Dalam situasi lain gliseraldehida 3-fosfat diubah menjadi dihidroksiaseton fosfat, yang meninggalkan kloroplas melalui transporter tertentu dan dalam sitosol, dapat didegradasi secara glikolitik untuk menyediakan energi atau digunakan untuk membentuk fruktosa 6-fosfat dan karenanya sukrosa.

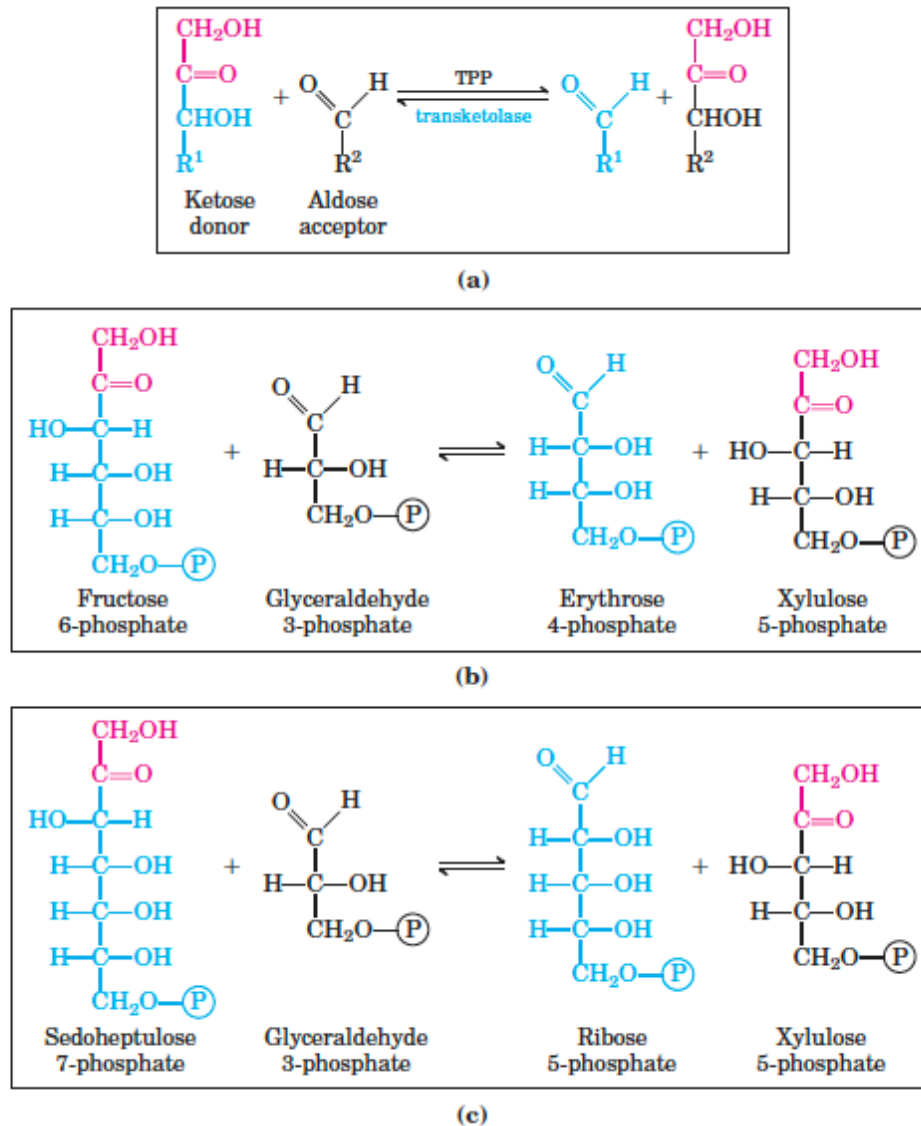
Tahap 3: Regenerasi Ribulosa 1,5-Bisfosfat dari Triosa fosfat reaksi pertama dalam asimilasi CO₂ menjadi triosa fosfat mengkonsumsi ribulosa 1,5-bisfosfat dan, untuk aliran berkelanjutan CO₂ menjadi karbohidrat, ribulosa 1,5-bifosfat harus terus-menerus diregenerasi. Hal ini dicapai dalam serangkaian reaksi, yang bersama-sama dengan tahap 1 dan 2, merupakan jalur siklik. Produk dari reaksi asimilasi pertama (3-fosfogliserat) sehingga mengalami transformasi yang meregenerasi ribulose 1,5-bifosfat. Perantara dalam jalur ini termasuk tiga, empat, lima, enam, dan tujuh karbon gula.



Gambar 253 Katalisis enzim transaldolase
 Sumber: Nelson & Cox, 2013

Langkah 1 dan 4 dikatalisis oleh enzim yang sama, transaldolase, ini pertama mengkatalisis kondensasi reversible gliseraldehida 3-fosfat dengan dihidroksiaseton fosfat, menghasilkan fruktosa 1,6-bifosfat (Langkah 1); ini dipecah menjadi fruktosa 6-fosfat dan Pi oleh fruktosa 1,6-bisphosphatase (FBPase-1) dalam Langkah 2 .

Reaksinya sangat eksergonik dan pada dasarnya ireversibel. Langkah 3 dikatalisis oleh transketolase, yang mengandung tiamin pirofosfat (TPP) sebagai gugus prostetik dan membutuhkan Mg^{2+} .

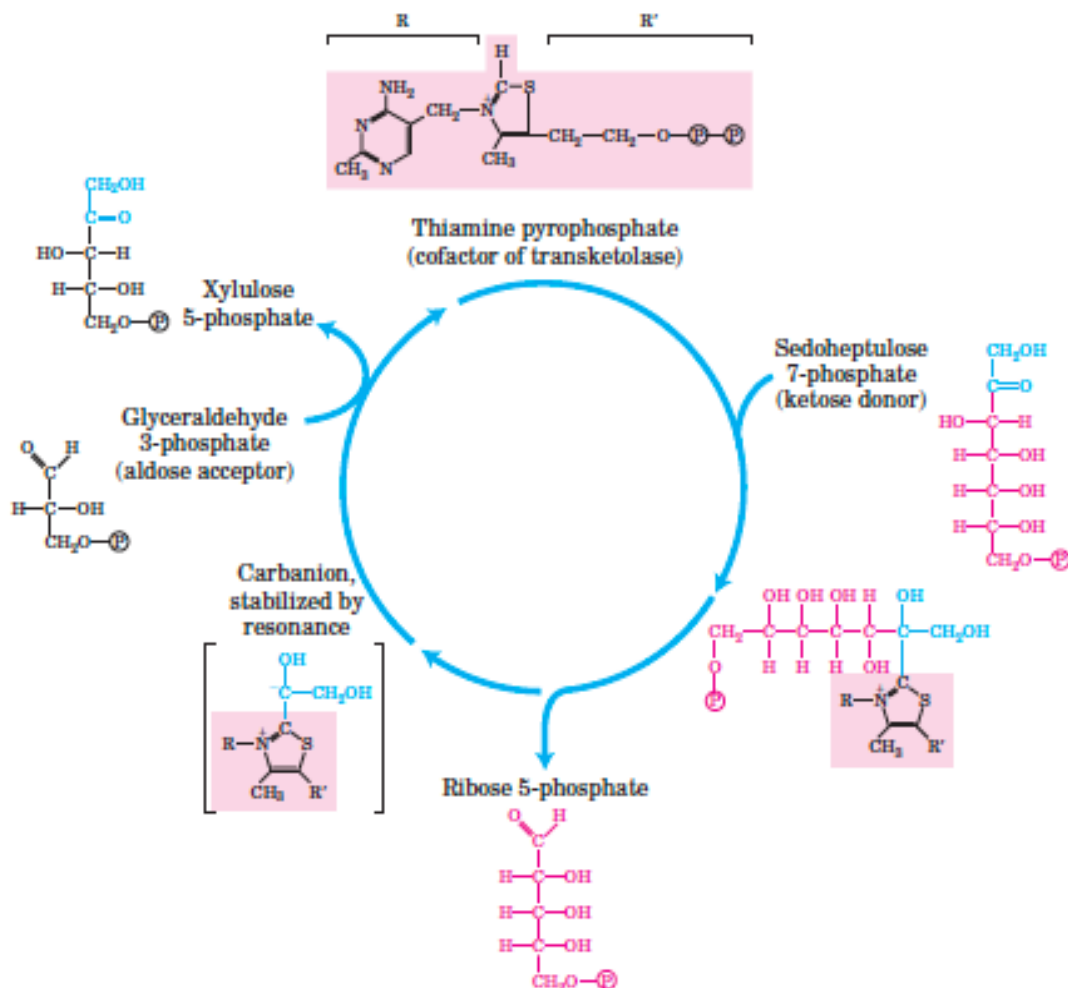


Gambar 254 Katalisis enzim transketolase

Reaksi yang dikatalisis enzim transketolase dari siklus Calvin (a) Reaksi umum dikatalisis oleh transketolase: transfer gugus dua karbon, dilakukan sementara pada ikatan enzim TPP, dari donor ketosa ke akseptor aldosa. (b) Konversi heksosa dan triosa menjadi gula berkarbon empat dan gula lima karbon (langkah 3 dari Gambar 254). (c) Konversi tujuh karbon dan gula tiga karbon menjadi dua pentose.

Transketolase mengkatalisis transfer reversibel dari Gugus ketol 2-karbon (CH_2OHCOO) dari ketosa donor fosfat, fruktosa 6-fosfat, ke aldose akseptor fosfat,

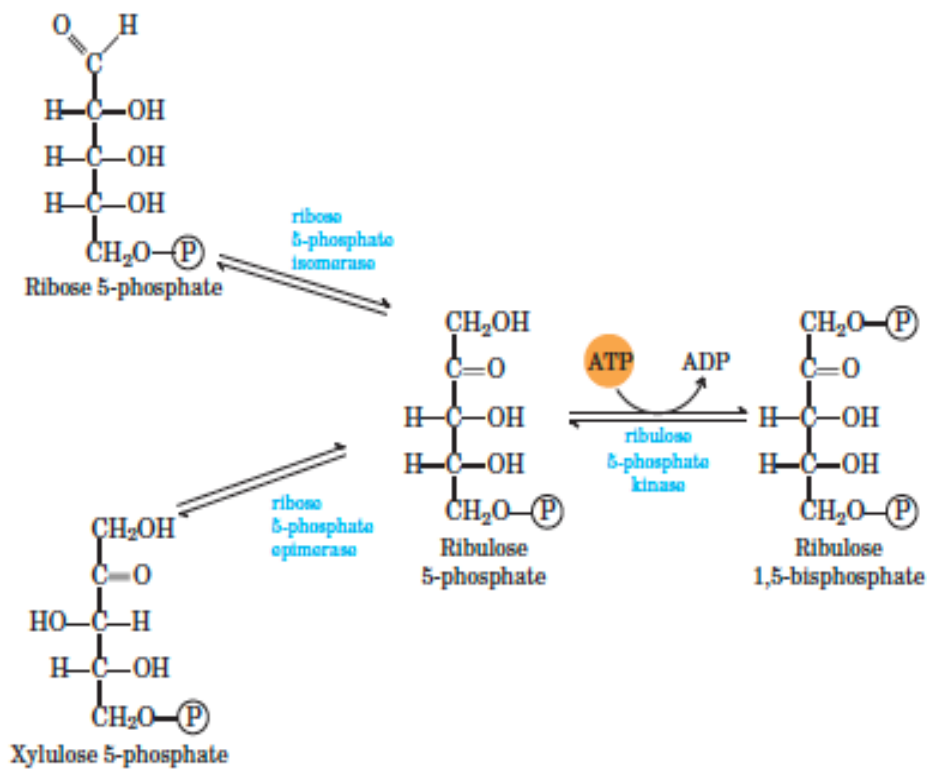
gliseraldehida 3-fosfat, membentuk pentosa xilulose 5-phosphate dan tetrosa eritrosa 4-fosfat. Pada langkah 4, transaldolase bekerja lagi, menggabungkan eritrosa 4-fosfat dengan dihidroksiaseton fosfat untuk membentuk tujuh karbon sedoheptulosa 1,7-bifosfat. Sebuah enzim unik untuk plastida, sedoheptulose 1,7-bisphosphatase, mengubah bifosfat menjadi sedoheptulosa 7-fosfat (langkah 5); ini adalah reaksi ireversibel kedua. Selanjutnya transketolase mengubah sedoheptulosa 7-fosfat dan gliseraldehida 3-fosfat menjadi dua pentosa fosfat (Langkah 6). Pentosa fosfat yang terbentuk pada transketolase reaksi ribosa 5-fosfat dan xilulosa 5-fosfat, diubah menjadi ribulosa 5-fosfat (Langkah 7 dan 8), yang pada langkah terakhir (9) dari siklus adalah terfosforilasi menjadi ribulosa 1,5-bifosfat oleh ribulose 5-fosfat kinase.



Gambar 255 TPP sebagai kofaktor untuk transketolase.

TPP sebagai kofaktor untuk transketolase mentransfer gugus dua karbon dari sedoheptulosa 7-fosfat ke gliseraldehida 3-fosfat, menghasilkan dua pentosa fosfat.

Tiamin pirofosfat berfungsi sebagai pembawa sementara unit dua karbon dan sebagai penerima elektron.



Gambar 256 Regenerasi ribulosa 1,5-bifosfat.

Bahan awal untuk siklus Calvin, ribulosa 1,5-bifosfat, diregenerasi dari dua pentose fosfat yang dihasilkan dalam siklus tersebut. Jalur ini melibatkan aksi dari isomerase dan epimerase, kemudian fosforilasi oleh kinase, dengan ATP sebagai donor gugus fosfat. Sintesis Setiap Triosa Fosfat dari CO₂ Membutuhkan enam NADPH dan Sembilan ATP. Hasil bersih dari tiga putaran siklus Calvin adalah konversi tiga molekul CO₂ dan satu molekul fosfat menjadi satu molekul triosa fosfat.

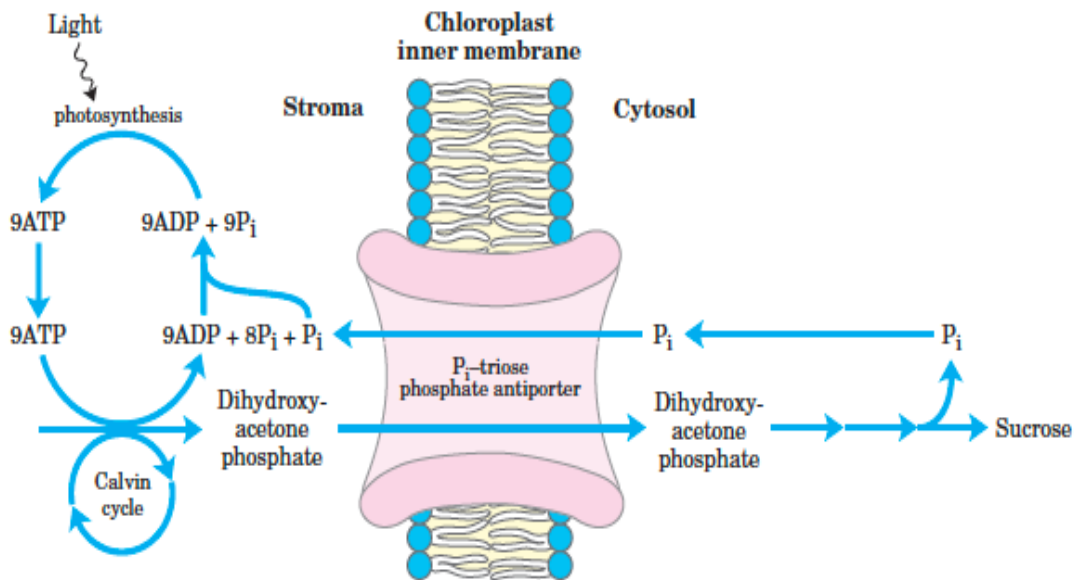
Stoikiometri jalur keseluruhan dari CO₂ ke triosa fosfat, dengan regenerasi ribulosa 1,5-bifosfat. Tiga molekul ribulosa 1,5-bifosfat (total 15 karbon) mengembun dengan tiga CO₂ (3 karbon) untuk membentuk enam molekul 3-fosfoglisarat (18 karbon). Keenam molekul 3-fosfoglisarat ini direduksi menjadi enam molekul gliseraldehida 3-fosfat (yang berada dalam kesetimbangan dengan dihidroksiaseton fosfat), dengan pengeluaran enam ATP (dalam sintesis 1,3-bifosfoglisarat) dan enam

NADPH (dalam reduksi 1,3-bifosfo-gliserat menjadi gliseraldehida 3-fosfat). Isozim gliseraldehida 3-fosfat dehidrogenase yang ada dalam kloroplas dapat menggunakan NADP sebagai pembawa elektronnya dan biasanya berfungsi dalam arah reduksi 1,3-bifosfo-gliserat. Isozim sitosol menggunakan NAD, seperti halnya enzim glikolitik hewan dan eukariota lainnya, dan dalam gelap isozim ini bertindak dalam glikolisis untuk mengoksidasi gliseraldehida 3-fosfat. Kedua isozim gliseraldehida 3-fosfat dehidrogenase, seperti semua enzim, mengkatalisis reaksi di kedua arah.

Satu molekul gliseraldehida 3-fosfat adalah produk bersih dari jalur asimilasi karbon. Lima molekul triosa fosfat lainnya (15 karbon) disusun kembali dalam langkah 1 sampai 9 untuk membentuk tiga molekul ribulosa 1,5-bifosfat (15 karbon). Langkah terakhir dalam konversi ini membutuhkan satu ATP per ribulosa 1,5-bifosfat, atau total tiga ATP. Jadi, secara ringkas, untuk setiap molekul triosa fosfat yang dihasilkan oleh asimilasi CO₂ fotosintesis, diperlukan enam NADPH dan sembilan ATP. NADPH dan ATP diproduksi dalam reaksi fotosintesis yang bergantung pada cahaya dalam rasio yang hampir sama (2:3) seperti yang dikonsumsi dalam siklus Calvin. Sembilan molekul ATP diubah menjadi ADP dan fosfat dalam pembentukan molekul triosa fosfat; delapan fosfat dilepaskan sebagai Pi dan digabungkan dengan delapan ADP untuk meregenerasi ATP. Fosfat kesembilan dimasukkan ke dalam triosa fosfat itu sendiri. Untuk mengubah ADP kesembilan menjadi ATP, sebuah molekul Pi harus diimpor dari sitosol.

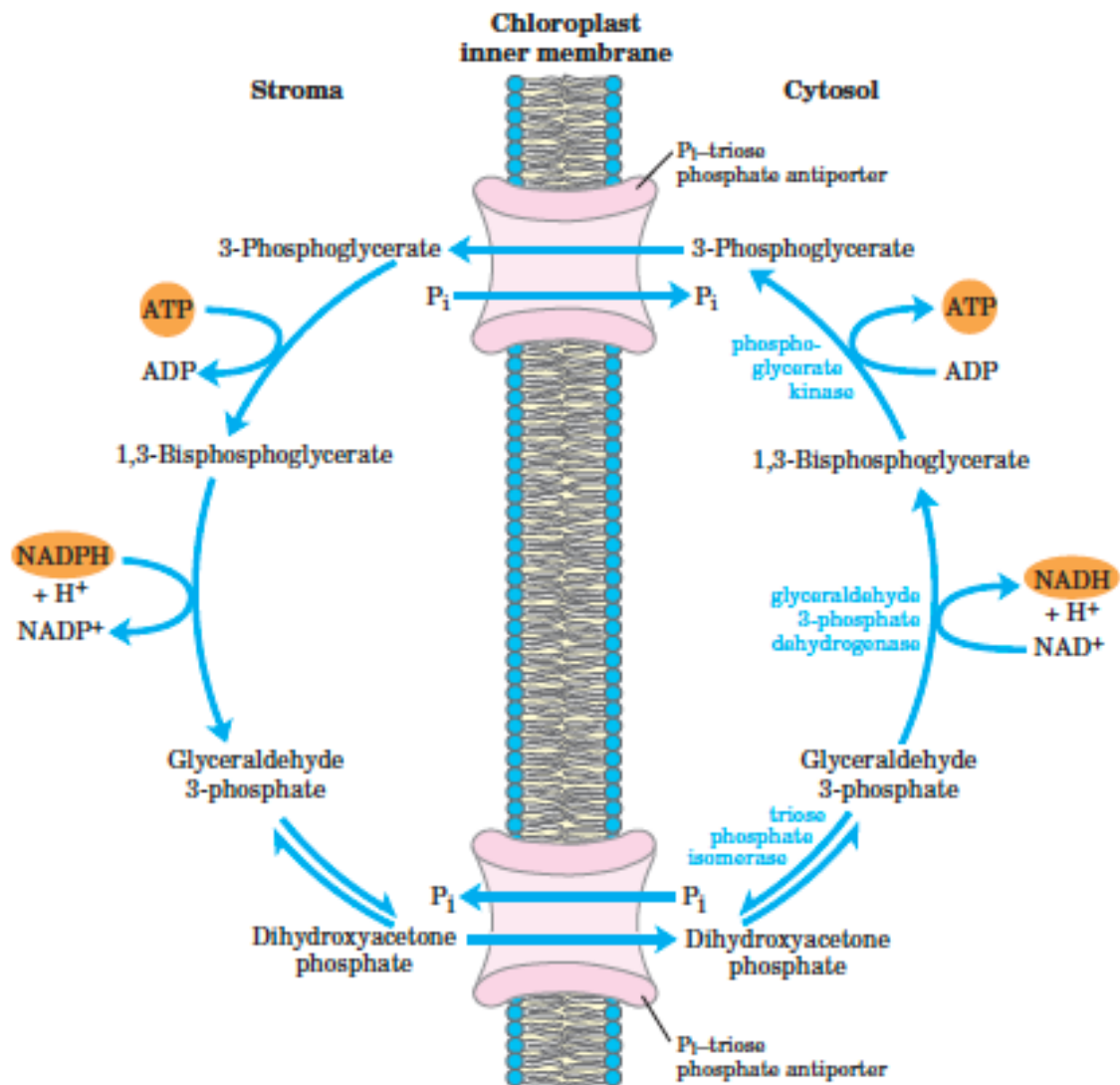
Dalam reaksi gelap, produksi ATP dan NADPH melalui fotofosforilasi, dan penggabungan CO₂ ke dalam triosa fosfat (dengan apa yang disebut reaksi gelap), berhenti. "Reaksi gelap" fotosintesis dinamai demikian untuk membedakannya dari reaksi primer yang digerakkan oleh cahaya dari transfer elektron ke NADP⁺ dan sintesis ATP. Sebenarnya tidak terjadi pada tingkat yang signifikan dalam reaksi gelap dan dengan demikian lebih tepat disebut reaksi asimilasi karbon. Mekanisme pengaturan yang mengaktifkan asimilasi karbon dalam reaksi terang dan mematikannya dalam reaksi gelap. Stoikiometri asimilasi CO₂ dalam siklus Calvin bahwa untuk setiap tiga molekul CO₂, membentuk satu molekul triosa fosfat (gliseraldehida 3-fosfat) membutuhkan sembilan ATP dan enam NADPH.

Sistem transport Triosa Posfat



Gambar 257 Sistem antiport Pi-triosa fosfat bagian dalam membran kloroplas.
Sumber: Nelson & Cox, 2013

Transporter ini memfasilitasi pertukaran sitosolik Pi untuk stroma dihidroksiaseton fosfat. Produk dari asimilasi karbon fotosintesis dengan demikian dipindahkan ke sitosol di mana mereka berfungsi sebagai titik awal untuk biosintesis sukrosa, dan Pi diperlukan untuk fotofosforilasi dipindahkan ke stroma. Ini sama antiporter dapat mengangkut 3-fosfoglisarat dan bertindak dalam antar-jemput untuk mengeksplor ATP dan mereduksi ekuivalen.



Gambar 258 Peran Pi-triosa fosfat antiporter dalam pengangkutan ATP dan pereduksi setara. Sumber: Nelson & Cox, 2013.

Senyawa dihidroksiaseton fosfat diubah menjadi gliseraldehida 3-fosfat di sitosol. Oleh enzim gliseraldehida 3-fosfat dehidrogenase dan fosfoglisarat kinase kemudian menghasilkan NADH, ATP, dan 3-fosfoglisarat. Yang terakhir masuk kembali ke kloroplas dan direduksi menjadi dihidroksiaseton fosfat, menyelesaikan siklus yang secara efektif menggerakkan ATP dan mereduksi setara (NADPH/NADH) dari kloroplas ke sitosol.

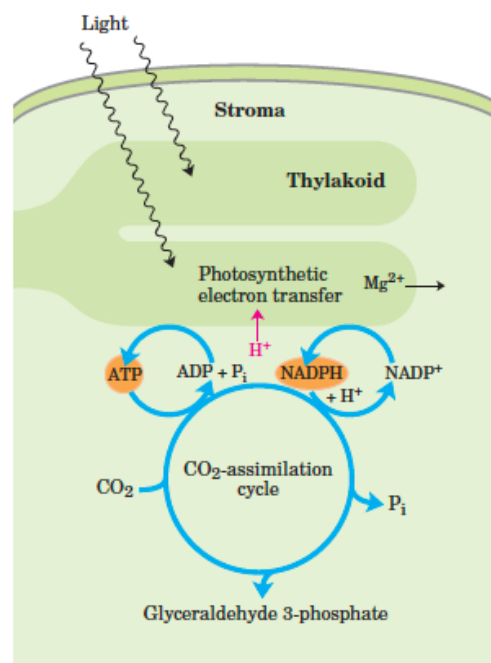
Stroma kloroplas mengandung semua enzim yang diperlukan untuk mengubah triosa fosfat yang dihasilkan oleh asimilasi CO₂ (gliseraldehida 3-fosfat dan di-

hidroksiaseton fosfat) menjadi pati, yang disimpan sementara dalam kloroplas sebagai butiran yang tidak larut. Enzim aldolase mengubah triosa menjadi fruktosa 1,6-bisfosfat; fruktosa 1,6-bisfosfatase menghasilkan fruktosa 6-fosfat; fosfoheksosa isomerase menghasilkan glukosa 6-fosfat; dan fosfoglukomutase menghasilkan glukosa 1-fosfat, bahan awal untuk sintesis pati. Semua reaksi siklus Calvin kecuali yang dikatalisis oleh enzim rubisco, sedoheptulose 1,7-bisphosphatase, dan ribulosa 5-fosfat kinase juga berlangsung di jaringan hewan. Tanpa ketiga enzim ini, hewan tidak dapat melakukan konversi bersih CO₂ menjadi glukosa.

Sistem transportasi mengekspor triosa fosfat dari kloroplas dan impor fosfat baik dihidroksiaseton fosfat atau 3-fosfoglisarat. Antiporter ini secara bersamaan memindahkan Pi ke dalam kloroplas, di mana ia digunakan dalam fotofosforilasi, dan memindahkan triosa fosfat ke dalam sitosol, di mana ia dapat digunakan untuk mensintesis sukrosa, bentuk di mana karbon tetap diangkut ke jaringan tanaman yang jauh. Sintesis sukrosa dalam sitosol dan sintesis pati dalam kloroplas adalah jalur utama dimana kelebihan triosa fosfat dari fotosintesis "dipanen." Sintesis sukrosa (dijelaskan di bawah) melepaskan empat molekul Pi dari empat triosa fosfat yang diperlukan untuk membuat sukrosa. Untuk setiap molekul triosa fosfat yang dikeluarkan dari kloroplas, satu Pi diangkut ke dalam kloroplas, memberikan Pi kesembilan yang disebutkan di atas, untuk digunakan dalam regenerasi ATP. Jika pertukaran ini diblokir, sintesis triosa fosfat akan dengan cepat menghabiskan Pi yang tersedia di kloroplas, memperlambat sintesis ATP dan menekan asimilasi CO₂ menjadi pati.

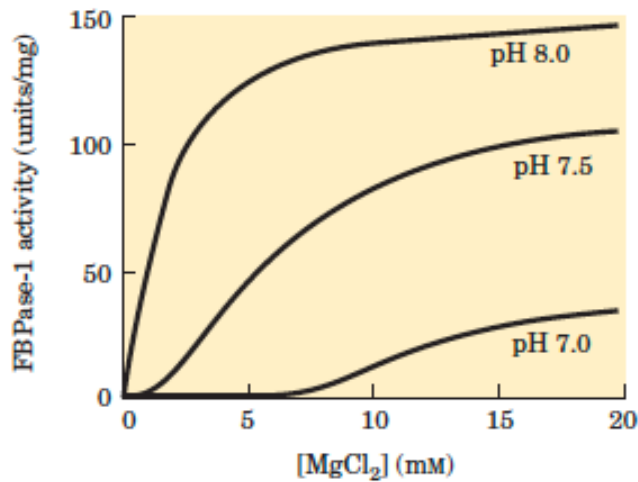
Empat enzim siklus Calvin tunduk pada jenis regulasi oleh cahaya. Ribulosa 5-fosfat kinase, fruktosa 1,6-bisphosphatase, sedoheptulose 1,7-bisphosphatase, dan gliseraldehida 3-fosfat dehydrogenase diaktifkan oleh reduksi disulfida yang digerakkan oleh cahaya, pada dua residu Cys sisi katalitiknya. Ketika residu Cys ini terikat disulfida (teroksidasi), enzim tidak aktif; ini adalah situasi normal dalam reaksi gelap. Dengan iluminasi, electron mengalir dari fotosistem I ke ferredoxin, yang mengandung disulfida protein yang disebut thioredoxin, dalam reaksi yang dikatalisis oleh ferredoxin-thioredoxin reduktase. Thioredoxin tereduksi menyumbangkan

elektron untuk pengurangan ikatan disulfida dari aktivasi cahaya reaksi ini disertai perubahan konformasi yang meningkatkan aktivitas enzim. Saat malam tiba, residu Cys dalam empat enzim dioksidasi ulang menjadi bentuk disulfidanya, menjadi enzim tidak aktif, dan ATP tidak dikeluarkan dalam asimilasi CO₂. Sebaliknya, pati disintesis dan disimpan pada siang hari, terdegradasi untuk bahan bakar glikolisis di malam hari. Glukosa 6-fosfat dehidrogenase, enzim pertama dalam jalur pentosa fosfat oksidatif, adalah juga diatur oleh mekanisme reduksi yang digerakkan oleh cahaya, tetapi dalam arti yang berlawanan, pada siang hari saat fotosintesis menghasilkan banyak NADPH, enzim ini tidak dibutuhkan.



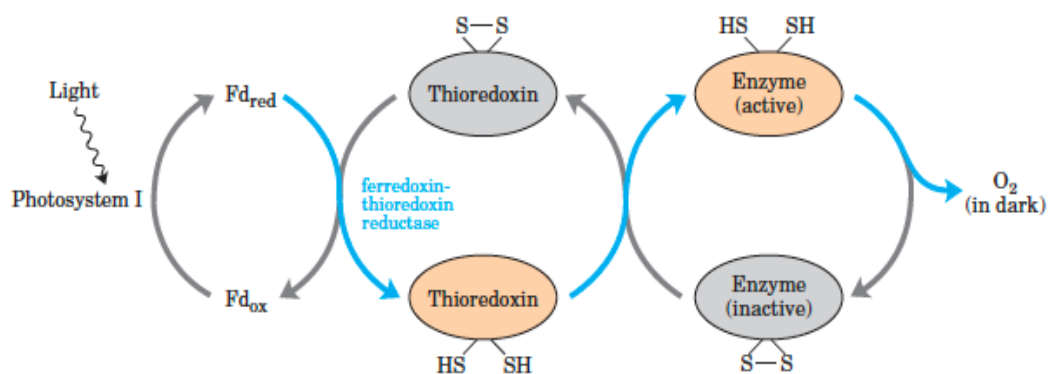
Gambar 259 Sumber ATP dan NADPH

ATP dan NADPH yang dihasilkan oleh reaksi terang adalah substrat penting untuk reduksi dari CO₂. Reaksi fotosintesis yang menghasilkan ATP dan NADPH disertai dengan pergerakan proton (merah) dari stroma ke tilakoid, menciptakan kondisi basa di stroma. Ion Magnesium berpindah dari tilakoid ke stroma, meningkatkan stroma [Mg²⁺].



Gambar 260 Aktivasi kloroplas fruktosa 1,6-bisfosfatase.

Enzim fruktosa 1,6-bisphosphatase (FBPase-1) diaktifkan oleh cahaya dan dengan kombinasi pH tinggi dan $[Mg^{2+}]$ tinggi di stroma, keduanya dihasilkan oleh iluminasi.



Gambar 261 Aktivasi cahaya dari beberapa enzim Calvin siklus.

Aktivasi cahaya dimediasi oleh thioredoxin, protein kecil yang mengandung disulfida, tioredoksin direduksi oleh elektron bergerak dari fotosistem I melalui ferredoxin (Fd) (biru panah), maka tioredoksin mengurangi ikatan disulfida di masing-masing enzim sedoheptulose 1,7-bisphosphatase, fruktosa 1,6 bisphosphatase, ribulosa 5-fosfat kinase, dan gliseraldehde 3-fosfat dehidrogenase, mengaktifkan enzim ini. Dalam gelap, gugus -SH mengalami reoksidasi menjadi disulfida, menonaktifkan enzim.

D. REAKSI FOTOSINTESIS PADA TANAMAN C3, C4 DAN CAM

Fotosintesis yang terjadi pada tanaman C3, C4 dan CAM berbeda prosesnya, seperti berikut :

1. Tumbuhan C3

Tanaman C3 lebih adaptif pada kondisi kandungan CO₂ atmosfer tinggi. Sebagian besar tanaman pertanian, seperti gandum, kentang, kedelai, kacang-kacangan, dan kapas merupakan tanaman dari kelompok C3. Pada tanaman C3, enzim yang menyatukan CO₂ adalah RuBP dalam proses awal asimilasi, juga dapat mengikat O₂ pada saat yang bersamaan untuk proses fotorespirasi, fotorespirasi adalah proses oksidasi karbohidrat untuk menghasilkan energi dan hasil samping, yang terjadi pada siang hari. Jika konsentrasi CO₂ di atmosfer ditingkatkan, hasil dari kompetisi antara CO₂ dan O₂ akan lebih menguntungkan CO₂, sehingga fotorespirasi terhambat dan asimilasi akan bertambah besar.

Tumbuhan C3 dengan karbon fiksasi C3 biasanya tumbuh dengan baik di area dimana intensitas sinar matahari cenderung sedang, temperatur sedang dan dengan konsentrasi CO₂ sekitar 200 ppm atau lebih tinggi, dan juga dengan air tanah yang berlimpah. Tumbuhan C3 harus berada dalam area dengan konsentrasi gas karbondioksida yang tinggi sebab Rubisco sering menyertakan molekul oksigen ke dalam Rubp sebagai pengganti molekul karbondioksida. Konsentrasi gas karbondioksida yang tinggi menurunkan kesempatan Rubisco untuk mengikat molekul oksigen. Karena bila ada molekul oksigen maka Rubp akan terpecah menjadi molekul 3-karbon yang tinggal dalam siklus Calvin, dan 2 molekul glikolat akan dioksidasi dengan adanya oksigen, menjadi karbondioksida yang akan menghabiskan energi. Pada tumbuhan C3, CO₂ hanya difiksasi RuBP oleh karboksilase RuBP. Karboksilase RuBP hanya bekerja apabila CO₂ jumlahnya berlimpah

2. Tumbuhan C4

Tumbuhan C4 dan CAM lebih adaptif di daerah panas dan kering. Pada tanaman C4, CO₂ diikat oleh PEP (enzim pengikat CO₂ pada tanaman C4) yang tidak dapat mengikat O₂ sehingga tidak terjadi kompetisi antara CO₂ dan O₂. Lokasi terjadinya asosiasi awal ini adalah di sel-sel mesofil (sekelompok sel-sel yang mempunyai

klorofil yang terletak di bawah sel-sel epidermis daun). CO₂ yang sudah terikat oleh PEP kemudian ditransfer ke selsel "bundle sheath" (sekelompok sel-sel di sekitar xylem dan floem) dimana kemudian pengikatan dengan RuBP terjadi. Karena tingginya konsentrasi CO₂ pada sel-sel bundle sheath ini, maka O₂ tidak mendapat kesempatan untuk bereaksi dengan RuBP, sehingga fotorespirasi sangat kecil, PEP mempunyai daya ikat yang tinggi terhadap CO₂, sehingga reaksi fotosintesis terhadap CO₂ di bawah 100 μmol m⁻² s⁻¹ sangat tinggi. Laju asimilasi tanaman C₄ hanya bertambah sedikit dengan meningkatnya CO₂. Sehingga, dengan meningkatnya CO₂ di atmosfer, tanaman C₃ akan lebih beruntung dari tanaman C₄ dalam hal pemanfaatan CO₂ yang berlebihan. Contoh tanaman C₄ adalah jagung, sorgum dan tebu.

Pada sintesis C₄, enzim karboksilase PEP memfiksasi CO₂ pada akseptor karbon lain yaitu PEP. Karboksilase PEP memiliki daya ikat yang lebih tinggi terhadap CO₂ daripada karboksilase RuBP. Oleh karena itu, tingkat CO₂ menjadi sangat rendah pada tumbuhan C₄, jauh lebih rendah daripada konsentrasi udara normal dan CO₂ masih dapat terfiksasi ke PEP oleh enzim karboksilase PEP. Sistem perangkap C₄ bekerja pada konsentrasi CO₂ yang jauh lebih rendah. Tumbuhan C₄ dinamakan demikian karena tumbuhan itu mendahului siklus Calvin yang menghasilkan asam berkarbon 4 sebagai hasil pertama fiksasi CO₂ dan yang memfiksasi CO₂ menjadi APG di sebut spesies C₃, sebagian spesies C₄ adalah monokotil (tebu, jagung, dll). Reaksi dimana CO₂ dikongfersi menjadi asam malat atau asam aspartat adalah melalui penggabungannya dengan fosfoenolpiruvat (PEP) untuk membentuk oksaloasetat dan Pi. Enzim PEP-karboksilase ditemukan pada setiap sel tumbuhan yang hidup dan enzim ini yang berperan dalam memacu fiksasi CO₂ pada tumbuhan C₄. enzim PEP-karboksilase terkandung dalam jumlah yang banyak pada daun tumbuhan C₄, pada daun tumbuhan C₃ dan pada akar, buah-buah dan sel – sel tanpa klorofil lainnya ditemukan suatu isozim dari PEP-karboksilase.

Reaksi untuk mengkonversi oksaloasetat menjadi malat dirangsang oleh enzim malat dehidrogenase dengan kebutuhan elektronnya disediakan oleh NADPH. Oksaloasetat harus masuk kedalam kloroplas untuk direduksi menjadi malat. Pembentukan aspartat dari malat terjadi didalam sitosol dan membutuhkan asam amino lain sebagai sumber gugus aminonya, proses ini disebut transaminasi. Siklus

calvin didahului oleh masuknya CO_2 ke dalam senyawa organik dalam mesofil. Langkah pertama ialah penambahan CO_2 pada fosfoenolpiruvat (PEP) untuk membentuk produk berkarbon empat yaitu oksaloasetat, Enzim PEP karboksilase menambahkan CO_2 pada PEP. Karbondioksida difiksasi dalam sel mesofil oleh enzim PEP karboksilase. Senyawa berkarbon empat malat, dalam hal ini menyalurkan atom CO_2 kedalam sel pembuluh, melalui plasmodesmata. Dalam sel pembuluh, senyawa berkarbon empat melepaskan CO_2 yang diasimilasi ulang kedalam materi organik oleh rubisco dan siklus Calvin. Dengan cara ini, fotosintesis C_4 meminimumkan fotorespirasi dan meningkatkan produksi gula. Adaptasi ini sangat bermanfaat dalam daerah panas dengan cahaya matahari yang banyak, dan dilingkungan seperti inilah tumbuhan C_4 sering muncul dan tumbuh subur.

3. Tumbuhan CAM

Tumbuhan C_4 dan CAM lebih adaptif di daerah panas dan kering. Crassulacean acid metabolism (CAM), tanaman ini mengambil CO_2 pada malam hari, dan menggunakannya untuk fotosintesis pada siang harinya. Meski tidak menguarkan oksigen di malam hari, namun dengan memakan CO_2 yang beredar, tanaman ini sudah membantu kita semua menghirup udara bersih, lebih sehat, menyejukkan dan menyegarkan bumi, tempat tinggal dan ruangan. Jadi, cocok buat taruh di ruang tidur misalnya. Sayang, hanya sekitar 5% tanaman jenis ini. Tumbuhan CAM yang dapat mudah ditemukan adalah nanas, kaktus, dan bunga lili.

Tanaman CAM, pada kelompok ini penambatan CO_2 seperti pada tanaman C_4 , tetapi dilakukan pada malam hari dan dibentuk senyawa dengan gugus 4-C. Pada hari berikutnya (siang hari) pada saat stomata dalam keadaan tertutup terjadi dekarboksilase senyawa C_4 tersebut dan penambatan kembali CO_2 melalui kegiatan Rudp karboksilase. Jadi tanaman CAM mempunyai beberapa persamaan dengan kelompok C_4 yaitu dengan adanya dua tingkat sistem penambatan CO_2 . Pada C_4 terdapat pemisahan ruang sedangkan pada CAM pemisahannya bersifat sementara. Termasuk golongan CAM adalah Crassulaceae, Cactaceae, Bromeliaceae, Liliaceae, Agaveceae, Ananas comosus, dan *Oncidium lanceanum*.

Beberapa tanaman CAM dapat beralih ke jalur C_3 bila keadaan lingkungan lebih baik. Beberapa spesies tumbuhan mempunyai sifat yang berbeda dengan

kebanyakan tumbuhan lainnya, yakni Tumbuhan ini membuka stomatanya pada malam hari dan menutupnya pada siang hari. Dengan menutup stomata pada siang hari membantu tumbuhan ini menghemat air, dapat mengurangi laju transpirasinya, sehingga lebih mampu beradaptasi pada daerah kering tersebut. Selama malam hari, ketika stomata tumbuhan itu terbuka, tumbuhan mengambil CO_2 dan memasukkannya kedalam berbagai asam organik. Cara fiksasi karbon ini disebut metabolisme asam krasulase, atau crassulacean acid metabolism (CAM). Dinamakan demikian karena metabolisme ini pertama kali diteliti pada tumbuhan dari famili crassulaceae. Termasuk golongan CAM adalah Crassulaceae, Cactaceae, Bromeliaceae, Liliaceae, Agaveceae, Ananas comosus, dan Oncidium lanceanum. Jalur CAM serupa dengan jalur C4 dalam hal karbon dioksida terlebih dahulu dimasukkan kedalam senyawa organik intermediet sebelum karbon dioksida ini memasuki siklus Calvin. Perbedaannya ialah bahwa pada tumbuhan C4, kedua langkah ini terjadi pada ruang yang terpisah. Langkah ini terpisahkan pada dua jenis sel. Pada tumbuhan CAM, kedua langkah dipisahkan untuk sementara. Fiksasi karbon terjadi pada malam hari, dan siklus calvin berlangsung selama siang hari.

Faktor- Factor Yang Mempengaruhi Proses Fotosintesis

Proses fotosintesis dipengaruhi beberapa faktor yaitu faktor yang dapat memengaruhi secara langsung seperti kondisi lingkungan maupun faktor yang tidak memengaruhi secara langsung seperti terganggunya beberapa fungsi organ yang penting bagi proses fotosintesis. Proses fotosintesis sebenarnya peka terhadap beberapa kondisi lingkungan meliputi kehadiran cahaya matahari, suhu lingkungan, konsentrasi karbondioksida (CO_2). Faktor lingkungan tersebut dikenal juga sebagai faktor pembatas dan berpengaruh secara langsung bagi laju fotosintesis. Faktor pembatas tersebut dapat mencegah laju fotosintesis mencapai kondisi optimum meskipun kondisi lain untuk fotosintesis telah ditingkatkan, inilah sebabnya faktor-faktor pembatas tersebut sangat memengaruhi laju fotosintesis yaitu dengan mengendalikan laju optimum fotosintesis. Selain itu, faktor-faktor seperti translokasi karbohidrat, umur daun, serta ketersediaan nutrisi memengaruhi fungsi organ yang penting pada fotosintesis sehingga secara tidak langsung ikut memengaruhi laju fotosintesis. Berikut adalah beberapa faktor utama yang menentukan laju fotosintesis:

a. Intensitas cahaya

Laju fotosintesis maksimum ketika banyak cahaya.

b. Konsentrasi karbon dioksida

Semakin banyak karbon dioksida di udara makin banyak jumlah bahan yang dapat digunakan tumbuhan untuk melangsungkan fotosintesis.

c. Suhu

Enzim-enzim yang bekerja dalam proses fotosintesis hanya dapat bekerja pada suhu optimalnya. Umumnya laju fotosintesis meningkat seiring dengan meningkatnya suhu hingga batas toleransi enzim.

b. Kadar air

Kekurangan air atau kekeringan menyebabkan stomata menutup, menghambat penyerapan karbon dioksida sehingga mengurangi laju fotosintesis.

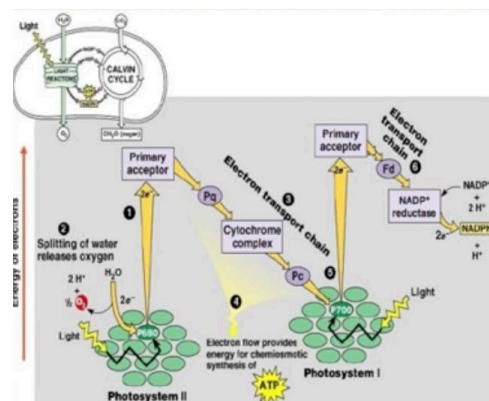
c. Kadar fotosintat (hasil fotosintesis)

Jika kadar fotosintat seperti karbohidrat berkurang, laju fotosintesis akan naik. Bila kadar fotosintat bertambah atau bahkan sampai jenuh, laju fotosintesis akan berkurang.

d. Tahap pertumbuhan

Penelitian menunjukkan bahwa laju fotosintesis jauh lebih tinggi pada tumbuhan yang sedang berkecambah ketimbang tumbuhan dewasa. Hal ini mungkin dikarenakan tumbuhan berkecambah memerlukan lebih banyak energi dan makanan untuk tumbuh.

[Materi fotosintesis dapat di lihat pada video berikut ini.](#)



Gambar 262 Fotosintesis
Sumber: Sukaryawan & Sari, 2021

Berdasarkan materi dan video pembelajaran pertemuan ke empat belas belas biokimia 1 pada pokok bahasan fotosintesis yang telah disajikan, amati tumbuh-tumbuhan disekitar saudara? Bagaimana makhluk hidup tersebut memperoleh energi?

2. PENCETUSAN IDE

Pahamilah orientasi di atas yang telah disajikan, kemudian amatilah disekitar saudara beberapa tumbuh-tumbuhan: Bagaimana tumbuh-tumbuhan dapat melangsungkan fotosintesis? Apakah semua tumbuh-tumbuhan melakukan fotosintesis dengan proses yang sama? kerjakanlah pada Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang telah disediakan.

3. PENSTRUKTURAN IDE

Hasil pencetusan ide bersama dengan kelompok saudara rancanglah proyek tentang fotosintesis. Bahaslah bersama dengan kelompok saudara naskah rancangan tersebut tulislah/gambarkan/skenariokan tentang fotosintesis. Bahaslah bahan dan alat yang digunakan untuk menyelesaikan proyek tersebut.

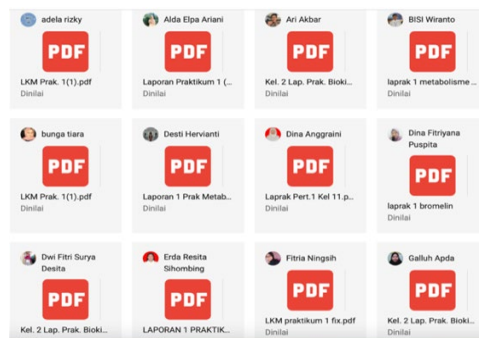
4. APLIKASI

Berdasarkan rancangan yang telah di buat, kerjakanlah proyek bersama kelompok saudara, dokumentasikanlah dalam bentuk video tentang fotosintesis. Proyek dilakukan di luar jam kuliah, sesuai operasional prosedur Program Studi Pendidikan Kimia FKIP Unsri. Lakukanlah proyek tersebut semenarik mungkin. Lakukanlah kolaborasi bersama teman-teman saudara dalam menyelesaikan proyek tersebut. Dokumentasi video yang sudah di apload cantumkan link videonya dibawah aplikasi sebelum pembahasan. Berdasarkan hasil proyek yang telah saudara lakukan bahaslah hal berikut ini.

- a. Mengapa tumbuh-tumbuhan membutuhkan cahaya?
- b. Bahaslah proses fotosintesis yang terjadi pada tumbuh-tumbuhan.
- c. Bahaslah dan tuliskan fotosistem I dan fotosistem II, serta hubungan keduanya.
- d. Bahaslah dan tuliskan reaksi-reaksi yang terjadi pada siklus calvin

5. REFLEKSI

Hasil elaborasi dengan dosen, saat proses pembelajaran jika ada perbaikan ditindaklanjuti dengan perbaikan, kemudian dituangkan dalam "Laporan 14 Fotosintesis". Selanjutnya laporan Fotosintesis tersebut di submit ke <https://elearning.unsri.ac.id>. Laporan 14 Fotosintesis minimal memuat hal-hal sebagai berikut yaitu: orientasi, pencetusan ide, penstrukturan ide, aplikasi, refleksi, dan daftar pustaka. Contoh submit laporan 15 Fotosintesis



Gambar 272 Submit Laporan 15 Fotosintesis

Materi perkuliahan pokok bahasan fotosintesis dapat anda pelajari juga dalam paparan berikut ini.

FOTOSINTESIS

- Kemampuan akhir tiap tahapan belajar (Sub-CPMK):
- Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi fotosintesis (Sub-CPMK3).

Gambar 273 Paparan materi Fotosintesis

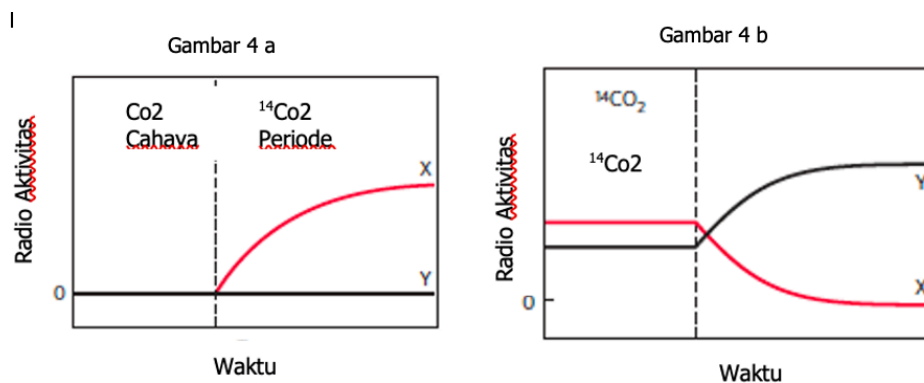
Latihan Soal

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini, kemudian jawaban anda di muat pada lembar kerja mahasiswa (LKM) pada bagian akhir, selanjutnya di submit ke alamat web berikut <https://elearning.unsri.ac.id>

1. Pada dasarnya, rangkaian reaksi fotosintesis dapat dibagi menjadi dua bagian utama: reaksi terang (karena memerlukan cahaya) dan reaksi gelap (tidak memerlukan cahaya tetapi memerlukan karbon dioksida). Reaksi terang terjadi pada tilakoid, sedangkan reaksi gelap terjadi di dalam stroma. Dalam reaksi terang, terjadi konversi energi cahaya menjadi energi kimia dan menghasilkan oksigen (O_2). Sedangkan dalam reaksi gelap terjadi seri reaksi siklik yang membentuk gula dari bahan dasar CO_2 dan energi (ATP dan NADPH). Jelaskan mekanisme yang terjadi pada reaksi terang dan reaksi yang terjadi pada siklus Calvin.
2. Proses fotosintesis dipengaruhi beberapa faktor yaitu faktor yang dapat memengaruhi secara langsung seperti kondisi lingkungan maupun faktor yang tidak memengaruhi secara langsung seperti terganggunya beberapa fungsi organ yang penting bagi proses fotosintesis. Jelaskan bagaimana faktor-faktor tersebut mempengaruhi jalannya fotosintesis?
3. Konsentrasi keadaan imbang ATP, ADP, dan Pi pada isolat kloroplas bayam jika disinari penuh pada pH 7,0 berturut-turut adalah 120,6 dan 700 μM .
 - (a) Berapa energi yang diperlukan untuk sintesis 1 mol ATP pada keadaan ini?
 - (b) Energi untuk sintesis ATP diberikan oleh transpor elektron yang diinduksi oleh cahaya di dalam kloroplas. Berapa tegangan minimum yang harus diturunkan selama transpor sepasang elektron untuk sintesis ATP pada keadaan ini?
4. Identifikasi Senyawa Antara pada Kunci Reaksi Gelap Fotosintesis. Calvin dan kawan-kawan menggunakan alga hijau bersel tunggal, *Chlorella* untuk mempelajari reaksi gelap pada fotosintesis. Pada percobaan ini $^{14}CO_2$ diinkubasi dengan suspensi alga yang telah disinari pada kondisi yang berbeda-beda.

Mereka mengikuti waktu proses munculnya ^{14}C sebagai senyawa X dan Y pada dua kondisi yang berbeda.

- (a) *Chlorella* disinari dan ditumbuhkan pada media CO_2 yang tidak dilabel, kemudian cahaya dimatikan dan $^{14}\text{CO}_2$ ditambahkan. Pada kondisi ini senyawa X adalah senyawa pertama yang ditemukan pada alga dan disebut dengan ^{14}C . senyawa Y tidak dilabel.



- (b) *Chlorella* yang disinari ditumbuhkan pada $^{14}\text{CO}_2$ radioaktif. Penyinaran diteruskan hingga semua $^{14}\text{CO}_2$ hilang (digambarkan sebagai garis vertikal putus-putus). Pada kondisi ini senyawa X menjadi label dengan cepat, tetapi aktivitas radioaktifnya lama kelamaan menurun. Sebaliknya senyawa Y meningkat radioaktivitasnya dengan mengikatnya waktu.

Kemukakan sifat-sifat X dan Y berdasarkan atas pengertian anda mengenai siklus Calvin.

5. Regulasi Ribulosa 1,5-Difosfat Karboksilase oleh pH. Nilai $K_M \text{CO}_2$ pada ribulosa 1,5-difosfat karboksilase menurun dengan nyata jika pH medium meningkat. Apa pengaruh dari penurunan laju peningkatan CO_2 pada reaksi ribulosa difosfat karboksilase?

Bagaimana sifat-sifat ini berfungsi dalam mengatur kecepatan fotosintesis selama penyinaran tumbuhan? Peranan apakah yang dilakukan oleh proses regulasi ini dalam tumbuhan selama keadaan gelap?

DAFTAR PUSTAKA

1. Buckle, K.A, R.A Edwards, G.H. Fleet, and M. Wootton. 2007. Ilmu Pangan (Food Science). Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press).
2. Campbell, N A.,J.B. Reece, & L.G. Mithchell. 2005. *Biologi*. Edisi Kelima. Terj. dari: Biology.5th ed. oleh Manalu, W. Jakarta : Erlangga.
3. Darmawan dan Baharsjah. 1983. Pengantar Fisiologi Tumbuhan . Jakarta : PT Gramedia.
4. Genomis Lab. 2013. *How to estimate carbohydrate by anthrone method*. <https://youtu.be/VzYDk4t97Ok>. di akses pada tanggal 3 November 2020.
5. Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition*. New York: W.H. Freeman and Company.
6. Protein In Food And Agricultural Products. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(10).
7. Methew, Holde, V., Ahern. 2000. *Biochemistry*. Sanfrancisco: Addison Wesley P.C
8. Salisbury, Frank. B dan C.W. Ross. 1995. Fisiologi Tumbuhan. Penerbit ITB.Bandung.
9. Sukaryawan, M. 2004. *Biokimia*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
10. Sukaryawan, M., Desi. 2014. *Modul Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
11. Sukaryawan, M., Sari, D.K. 2021. *Video Pembelajaran Praktikum Biokimia 1*. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.
12. Suyatman. 2020. Menyelidiki Energi Pada Fotosintesis Tumbuhan. *Jurnal Pendidikan IPA*, 9(2) hal 134-140.
13. Thenawidjaja, M. 1990. *Dasar-Dasar Biokimia*. Jakarta: Erlangga
14. Voet, D., Voet, J.G. 2011. *Amino Acid, Biochemistry*. 4th. USA: John Wiley & Sons Incorporated.
15. Wirahadikusumah, M. 1985. *Protein, Enzim dan Asam Nukleat*. Bandung: ITB
16. Winarno, F.G. 2004. Kimia Pangan dan Gizi. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta

SINGKATAN UMUM DALAM BIOKIMIA

A	Adenin atau Adenosin
ACP	Protein pembawa asil
ACTH	Hormon adrenokortikotropik
Asil-KoA (asil-S-KoA)	Turunan asil dari koenzim A
AMP	Adenosin 5'-monofosfat
ADP	Adenosin 5'-difosfat
ATP	Adenosin 5'-trifosfat
cAMP	3', 5' – AMP siklik
dAMP, dGMP, dADP, dll	deoksiguanosin 5'-monofosfat, deaksiadenosin 5'-difosfat, dan lain lain.
Ala	Alanin
Arg	Arginin
Asn	Asparagin
Asp	Asam aspartat
ATPase	Trifosfatase adenosin
C	Sitosin atau Sitodin
CAP	Protein pengaktif katabolik
cDNA	DNA pasangan
CMP, CDP,CTP	Sitidin 5',-mono-, -di-, -trifosfat
KoA (KoA-SH)	Koenzim A
KoQ	Koenzim Q(ubikuinon)
Sis	Sistein
dATP	2'- Deoksiadenosin 5'-trifosfat,
dGTP	2'- deoksiguanosin 5'-trifosfat,
dCTP	2'- deksisitidin5'-trifosfat
dTTP	2'- deksitimidin5'-trifosfat
DFP (DIFP)	Diisopropilfosfofluoridat
DNA	Asam deoksiribunokleat
DNAase	Deoksiribunoklease

DNP	2,4-Dinitrofenol
DOPA	Dihidroksifenilalanin
EC (diikuti oleh jumlah)	Komisi enzim (jumlah menunjukkan klasifikasi resmi enzim)
EDTA	Asam etilendiamintetraasetat
ETP	Partikel pemindah elektron (dari membran mitokondria)
FA	Asam lemak
FAD, FADH ₂	Flavin adenin dinukleotida dan bentuk reduksinya
FCCP	Karbonilsianida <i>p</i> -trifluorometoksifenilhidrazon
Fd	Feredoksin
FDNB (DNFB)	1- Fluoro- 2,4-dinitrobenzen
FDP	Fruktosa 1,6-difosfat
FFA	Asam lemak bebas
FH ₂ ,FH ₄ , (THFA)	Asam dihidro dan tetrahidrofolat
fMet	<i>N</i> -Formilmetionin
FMN, FMNH ₂	Flavin monokleotida dan bentuk reduksinya
FP	Flavoprotein
ΔG^{01}	Perubahan energi bebas baku
ΔG	Perubahan energi bebas
ΔG_p	Perubahan energi bebas dari hidrolisis ATP di bawah kondisi tidak baku
G	Guanin atau guanosin
Gal	D-Galaktosa
GalNAc	N-Asetil-D-Galaktosamin
GDH	Dehidrogenase glutamat
GH	Hormon Pertumbuhan

Glc	D-glukosa
GlcNAc	N-asetil-D-glukosamin
Gln	Glutamin
Glu	Asam Glutamat
Gli	Glisin
cGMP	3', 5' - siklik GMP
GMP	Guanosin 5'-mono fosfat
GDP	Guanosin 5'-difosfat
GTP	Guanosin 5'-trifosfat
G3P	Gliseraldehida 3-fosfat
G6P	Glukosa 6-fosfat
GSH, GSSG	Glutation dan bentuk oksidasinya
Hb, HbO ₂ , HbCO, MetHb	Hemoglobin, oksihemoglobin, karbon monosakarida hemoglobin, metemoglobin
His	Histidin
hnRNA	RNA inti heterogen
Hip	Hidroksiprolin
I	Isonin
Ile	Isoleusin
IMP, IDP, ITP	Inosin 5'-mono-, -di-, -trifosfat
αKG	α-Ketoglutarat
LDH	Dehidrogenase laktat
Leu	Leusin
LH	Hormon luteinizing
Lis	Lisin
Mb, MbO ₂	Mioglobin, Oksimioglobin
MDH	Dehidrogenase malat
MtDNA	DNA mitokhondria
Met	Metionin
MSH	Hormon perangsang Melanosit




NAD*, NADH	Nikotinamid adenin dinukleotida dan bentuk reduksinya
NADP*, NADPH	Nikotinamid adenin dinukleotida fosfat dan bentuk reduksinya
NMN*, NMNH	Nikotinamid mononukleotida dan bentuk reduksinya
OAA	Oksaloasetat
P _i	Ortofosfat inorganik
PAB atau PABA	Asam p-aminobenzoat
PEP	Fosfoenolpiruvat
3PG	3-Fosfogliserat
PGA	Asam pteroilglutamat (asam folat)
PGP	3-Fosfogliserol fosfat
Phe	Fenilalanin
PP _i	Pirofosfat anorganik
PQ	Plastokuinon
Pro	Prolin
PRPP	5-Fosforilbosiil 1- pirofosfat
Q	Koenzim Q (ubikuinon)
Rib	D-Ribosa
RNA	Asam ribonukleat
hnRNA	RNA inti heterogen
mRNA	RNA pembawa pesan
rRNA	RNA ribosom
snRNA	RNA inti kecil
tRNA	RNA tranfer
RNase	Ribonuklease
KR	Kuosien respirasi
Ser	Serin

T	Tiamin atau timidin
HT	Hormon tirotropik
Thr	Treonin
TMP	Timidin 5'-mono-fosfat
TDP	Timidin 5'-di-fosfat
TTP	Timidin 5'-trifosfat
TMV	Virus mosaik tembakau
TPP	Tiamin pirofosfat
Tir	Triptofan
U	Urasil atau uridin
UDP-gal	Uridin difosfat galaktosa
UDP-glc	Uridin difosfat glukosa
UMP	Uridin 5' –mono-fosfat
UDP	Uridin 5' –di -fosfat
UTP	Uridin 5' –trifosfat
UV	Sinar ultraviolet
Val	Valin



UNIVERSITAS SRIWIJAYA
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN
JURUSAN PENDIDIKAN MIPA
PROGRAM STUDI PENDIDIKAN KIMIA

RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)
(Daring 100%)

Mata Kuliah	: Biokimia 1		
Kode / SKS	: GKM328317/3		
Semester	: 5		
Dibuat	: Indralaya, 14 Mei 2021		
Dosen Pengampu		Diperiksa oleh	Disetujui oleh
			
Drs. Made Sukaryawan, M.Si., PhD NIP. 196508051991021001		Dr. Diah Kartika Sari, M.Si NIP.198405202008012010	Drs. K. Anom W., M.Si NIP 195904061984031001 (Penjamin Mutu Prodi Pkimia)
Drs. Effendi, M.Si NIP 196010061988031002 (Koordinator Prodi Pkimia)			
Kode	CPL Prodi yang dibebankan pada mata kuliah		
CPL-S9	Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri;		
CPL-P1	Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya;		
CPL-P5	Menguasai pondasi metode saintifik dan integritas akademik serta prinsip-prinsip penggunaan Teknologi Informasi dan Komunikasi dalam pembelajaran kimia, penelitian dan karya ilmiah;		
CPL-KU3	Mampu mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora sesuai dengan keahliannya berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam rangka menghasilkan solusi, gagasan, desain atau kritik seni.		
Kode	Capaian Pembelajaran Mata Kuliah (CPMK)		
CPMK-1	Mahasiswa mampu bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (CPL-S9);		
CPMK-2	Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya (CPL-P1);		
CPMK-3	Mahasiswa menguasai pondasi metode saintifik dan integritas akademik serta prinsip-prinsip penggunaan Teknologi Informasi dan Komunikasi dalam pembelajaran kimia, penelitian dan karya ilmiah (CPL-P5);		
CPMK-4	Mampu mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora sesuai dengan keahliannya berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam rangka menghasilkan solusi, gagasan, desain atau kritik seni (CPL-KU3).		

Kode	Kemampuan akhir tiap tahapan belajar (Sub-CPMK)
Sub-CPMK1	Mahasiswa mampu menunjukkan sikap tanggungjawab untuk memahami falsafah biokimia.(CPMK-1);
Sub-CPMK2	Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan asam amino, protein dalam kehidupan sehari-hari (CPMK-2);
Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik dalam materi dalam biokimia (CPMK3);
Sub-CPMK4	Mampu mengkaji implikasi materi Vitamin dan mineral dalam kehidupan sehari-hari (CPMK4);
Sub-CPMK5	Mampu mengkaji implikasi Karbohidrat dalam kehidupan sehari-hari (CPMK4);
Sub-CPMK6	Mampu mengkaji implikasi Lipid dalam kehidupan sehari-hari CPMK4);
Deskripsi Singkat Mata Kuliah	
Perkuliahan ini menganalisis hubungan antara struktur dan fungsi biologis dari makromolekul dalam sistem organisme, memberikan pemahaman tentang struktur senyawa biomolekul : asam nukleat, protein, karbohidrat, lipida dan enzim serta proses biokimiawi yang berlangsung didalam sel.	
Pustaka	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lehninger, A.L. 2017. <i>Principles of Biochemistry</i> 7th edition 2. Denise R. F. 2017. <i>Biochemistry</i> 7th edition 3. David P.C. 2009. <i>Biotechnology</i> 4. Wirahadi K.M . 2014. <i>Dasar-dasar Biokimia</i>

Pertemuan	Kemampuan akhir tiap tahapan belajar		Materi pelajaran	Metode Pembelajaran	Pengalaman Belajar	Teknik Penilaian	Waktu dan Media	Daftar referensi
1	Sub-CPMK1	Mahasiswa mampu menunjukkan sikap tanggungjawab untuk memahami falsafah biokimia.	LOGIKA MOLEKULER ORGANISME HIDUP - Pondasi Biokimia - Sel - Virus	Ceramah dan Diskusi	Pembelajaran Daring: Penjelasan tentang falsafah Biokimia dan pembagian kelompok (3-4 org)	1. Prates diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,3
2	Sub-CPMK2	Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan biomolekul dalam makhluk hidup.	BIOMOLEKUL - Struktur Biomolekul - Fungsi Biomolekul	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
3	Sub-CPMK2	Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan asam amino dalam kehidupan sehari-hari	ASAM AMINO - Struktur asam amino - Penggolongan asam amino - Titik Isoelektrik asam amino - Pemisahan asam amino - Reaksi-reaksi asam amino	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4

4	Sub-CPMK2	Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan protein dalam kehidupan sehari-hari	PROTEIN - Sifat dan fungsi biologi protein - Penggolongan Protein - Reaksi-reaksi protein	5 Fasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstrukturan Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstrukturan pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan - Merefleksi dengan membuat dan submit laporan	1. Prates diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
5	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi protein;	PEMURNIAN DAN PEMISAHAN PROTEIN - Pemurnian Protein - Pemisahan Protein - Penentuan deret asam amino dari rantai polipeptida	5 Fasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstrukturan Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstrukturan pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan - Merefleksi dengan membuat dan submit laporan	1. Prates diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
6	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi protein;;	STRUKTUR PROTEIN: - Struktur Primer - Struktur Sekunder - Struktur Tersier - Struktur Kuarternerr	5 Fasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstrukturan Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstrukturan pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan - Merefleksi dengan membuat dan submit laporan	1. Prates diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
7	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi enzim;	ENZIM - Sifat-sifat dan fungsi enzim - Koenzim - Mekanisme reaksi enzim	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2
8	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi enzim	ENZIM - Kinetika reaksi enzim - Inhibitor	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	2,3,4

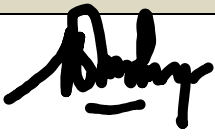

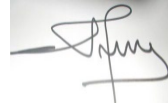
9			- Ujian Tengah Semester		-		1 Jam	
10	Sub-CPMK4	Mampu mengkaji implikasi Vitamin dan mineral dalam kehidupan sehari-hari.	VITAMIN DAN MINERAL (Koenzim dan Kofaktor) - Struktur vitamin - Peran vitamin sebagai koenzim - Peranan mineral sebagai kofaktor.	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates Unsri/ google diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
11	Sub-CPMK5	Mampu mengkaji implikasi Karbohidrat dalam kehidupan sehari-hari;	KARBOHIDRAT - Struktur dan sifa-sifat Karbohidrat - Penggolongan Karbohidrat - Uji Karbohidrat	5 Fhasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstruktur an Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstruktur an pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan - Merefleksi dengan membuat dan submit laporan	1. Prates Unsri/ google diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
12	Sub-CPMK6	Mampu mengkaji implikasi Lipid dalam kehidupan sehari-hari;	LIPID - Struktur dan sifat-sifat Lipid - Penggolongan Lipid - Uji Lipid	5 Fhasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstruktur an Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstruktur an pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan - Merefleksi dengan membuat dan submit laporan	1. Prates Unsri/ google diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
13	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi pencernaan makanan;	PENCERNAAN MAKANAN - Pencernaan dalam mulut, lambung, usus.	Ceramah dan Diskusi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Diskusi Kelompok - Membuat dan mensubmit laporan	1. Prates Unsri/ google diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
14	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi Bioenergitika;	BIOENERGITIKA - Bioenergitika	Ceramah dan Diskusi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Diskusi Kelompok - Membuat dan mensubmit laporan	1. Prates Unsri/ google diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,3

15	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi fotosintesis;	FOTOSINTESIS - Fotosintesis	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,3
16			- Ujian Semester				1 Jam	



UNIVERSITAS SRIWIJAYA
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN
JURUSAN PENDIDIKAN MIPA
PROGRAM STUDI PENDIDIKAN KIMIA

RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)
(Daring 50%)
(Luring 50%)

Mata Kuliah	: Biokimia 1		
Kode / SKS	: GKM328317/3		
Semester	: 5		
Dibuat	: Indralaya, 14 Mei 2021		
Dosen Pengampu		Diperiksa oleh	Disetujui oleh
			
Drs. Made Sukaryawan, M.Si., PhD NIP. 196508051991021001		Dr. Diah Kartika Sari, M.Si NIP.198405202008012010	Drs. K. Anom W., M.Si NIP 195904061984031001 (Penjamin Mutu Prodi PKimia)
			Dr. Effendi, M.Si NIP 196010061988031002 (Koordinator Prodi PKimia)
Kode	CPL Prodi yang dibebankan pada mata kuliah		
CPL-S9	Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri;		
CPL-P1	Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya;		
CPL-P5	Menguasai pondasi metode saintifik dan integritas akademik serta prinsip-prinsip penggunaan Teknologi Informasi dan Komunikasi dalam pembelajaran kimia, penelitian dan karya ilmiah;		
CPL-KU3	Mampu mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora sesuai dengan keahliannya berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam rangka menghasilkan solusi, gagasan, desain atau kritik seni.		
Kode	Capaian Pembelajaran Mata Kuliah (CPMK)		
CPMK-1	Mahasiswa mampu bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (CPL-S9);		
CPMK-2	Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya (CPL-P1);		
CPMK-3	Mahasiswa menguasai pondasi metode saintifik dan integritas akademik serta prinsip-prinsip penggunaan Teknologi Informasi dan Komunikasi dalam pembelajaran kimia, penelitian dan karya ilmiah (CPL-P5);		
CPMK-4	Mampu mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora sesuai dengan keahliannya berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam rangka menghasilkan solusi, gagasan, desain atau kritik seni (CPL-KU3).		

Kode	Kemampuan akhir tiap tahapan belajar (Sub-CPMK)
Sub-CPMK1	Mahasiswa mampu menunjukkan sikap tanggungjawab untuk memahami falsafah biokimia.(CPMK-1);
Sub-CPMK2	Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan asam amino, protein dalam kehidupan sehari-hari (CPMK-2);
Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik dalam materi dalam biokimia (CPMK3);
Sub-CPMK4	Mampu mengkaji implikasi materi Hormon dan Vitamin dalam kehidupan sehari-hari (CPMK4);
Sub-CPMK5	Mampu mengkaji implikasi Karbohidrat dalam kehidupan sehari-hari (CPMK4);
Sub-CPMK6	Mampu mengkaji implikasi Lipid dalam kehidupan sehari-hari CPMK4);
Deskripsi Singkat Mata Kuliah	
Perkuliahan ini menganalisis hubungan antara struktur dan fungsi biologis dari makromolekul dalam sistem organisme, memberikan pemahaman tentang struktur senyawa biomolekul : asam nukleat, protein, karbohidrat, lipida dan enzim serta proses biokimiawi yang berlangsung didalam sel.	
Pustaka	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lehninger, A.L. 2017. <i>Principles of Biochemistry</i> 7nd edition 2. Denise R. F. 2017. <i>Biochemistry</i> 7nd edition 3. David P.C. 2009. <i>Biotechnology</i> 4. Wirahadi K.M . 2014. <i>Dasar-dasar Biokimia</i>

temuanK e	Kemampuan akhir tiap tahapan belajar	Materi pelajaran	Metode Pembelajaran	Pengalaman Belajar	Teknik Penilaian	Waktu dan Media	Daftar referensi	
1	Sub-CPMK1	Mahasiswa mampu menunjukkan sikap tanggungjawab untuk memahami falsafah biokimia.	LOGIKA MOLEKULER ORGANISME HIDUP - Pondasi Biokimia - Sel - Virus	Ceramah dan Diskusi	Pembelajaran Daring: - Penjelasan tentang falsafah Biokimia dan pembagian kelompok (3-4 org)	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,3
2	Sub-CPMK2	Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan biomolekul dalam makhluk hidup.	BIOMOLEKUL - Struktur Biomolekul - Fungsi Biomolekul	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
3	Sub-CPMK2	Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan asam amino dalam kehidupan sehari-hari	ASAM AMINO - Struktur asam amino - Penggolongan asam amino - Titik Isoelektrik asam amino - Pemisahan asam amino - Reaksi-reaksi asam amino	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
4	Sub-CPMK2	Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan protein dalam kehidupan sehari-hari	PROTEIN - Sifat dan fungsi biologi protein - Penggolongan Protein - Reaksi-reaksi protein	5 Fhasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstrukturan Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstrukturan pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan - Merefleksi dengan membuat dan submit laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
5	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi protein;	PEMURNIAN DAN PEMISAHAN PROTEIN - Pemurnian Protein - Pemisahan Protein - Penentuan deret asam amino dari rantai polipeptida	5 Fhasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstrukturan Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstrukturan pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan - Merefleksi dengan membuat dan submit laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4




6	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi protein;;	STRUKTUR PROTEIN: - Struktur Primer - Struktur Sekunder - Struktur Tersier - Struktur Kuarternerr	5 Fhasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstrukturan Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstrukturan pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan Merefleksi dengan membuat dan submit	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
7	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi enzim;	ENZIM - Sifat-sifat dan fungsi enzim - Koenzim - Mekanisme reaksi enzim	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2
8	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi enzim	ENZIM - Kinetika reaksi enzim - Inhibitor	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	2,3,4
9			- Ujian Tengah Semester		-		1 Jam	
10	Sub-CPMK4	Mampu mengkaji implikasi Vitamin dan mineral dalam kehidupan sehari-hari.	VITAMIN DAN MINERAL (Koenzim dan Kofaktor) - Struktur vitamin - Peran vitamin sebagai koenzim - Peranan mineral sebagai kofaktor.	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: kumpul makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,4
11	Sub-CPMK5	Mampu mengkaji implikasi Karbohidrat dalam kehidupan sehari-hari;	KARBOHIDRAT - Struktur dan sifa-sifat Karbohidrat - Penggolongan Karbohidrat - Uji Karbohidrat	5 Fhasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstrukturan Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstrukturan pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan Merefleksi dengan membuat laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: kumpul makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,4

12	Sub-CPMK6	Mampu mengkaji implikasi Lipid dalam kehidupan sehari-hari;	LIPID - Struktur dan sifat-sifat Lipid - Penggolongan Lipid - Uji Lipid	5 Fhasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstrukturan Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstrukturan pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan Merefleksi dengan membuat laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: kumpul makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,4
13	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi pencernaan makanan;	PENCERNAAN MAKANAN - Pencernaan dalam mulut, lambung, usus.	Ceramah dan Diskusi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Diskusi Kelompok - Membuat laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,4
14	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi Bioenergitika;	BIOENERGITIKA - Bioenergitika	Ceramah dan Diskusi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Diskusi Kelompok - Membuat laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: kumpul makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,3
15	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi fotosintesis;	FOTOSINTESIS - Fotosintesis	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: kumpul makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,3
16			- Ujian Semester				1 Jam	



UNIVERSITAS SRIWIJAYA
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN
JURUSAN PENDIDIKAN MIPA
PROGRAM STUDI PENDIDIKAN KIMIA

RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)
(Luring 85%)
(Daring 15%)

Mata Kuliah	: Biokimia 1		
Kode / SKS	: GKM328317/3		
Semester	: 5		
Dibuat	: Indralaya, 14 Mei 2021		
Dosen Pengampu		Diperiksa oleh	Disetujui oleh
			
Drs. Made Sukaryawan, M.Si., PhD NIP. 196508051991021001		Dr. Diah Kartika Sari, M.Si NIP.198405202008012010	Drs. K. Anom W., M.Si NIP 195904061984031001 (Penjamin Mutu Prodi PKimia)
Drs. Effendi, M.Si NIP 196010061988031002 (Koordinator Prodi PKimia)			
Kode	CPL Prodi yang dibebankan pada mata kuliah		
CPL-S9	Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri;		
CPL-P1	Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya;		
CPL-P5	Menguasai pondasi metode saintifik dan integritas akademik serta prinsip-prinsip penggunaan Teknologi Informasi dan Komunikasi dalam pembelajaran kimia, penelitian dan karya ilmiah;		
CPL-KU3	Mampu mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora sesuai dengan keahliannya berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam rangka menghasilkan solusi, gagasan, desain atau kritik seni.		
Kode	Capaian Pembelajaran Mata Kuliah (CPMK)		
CPMK-1	Mahasiswa mampu bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (CPL-S9);		
CPMK-2	Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya (CPL-P1);		
CPMK-3	Mahasiswa menguasai pondasi metode saintifik dan integritas akademik serta prinsip-prinsip penggunaan Teknologi Informasi dan Komunikasi dalam pembelajaran kimia, penelitian dan karya ilmiah (CPL-P5);		
CPMK-4	Mampu mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora sesuai dengan keahliannya berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam rangka menghasilkan solusi, gagasan, desain atau kritik seni (CPL-KU3).		

Kode	Kemampuan akhir tiap tahapan belajar (Sub-CPMK)
Sub-CPMK1	Mahasiswa mampu menunjukkan sikap tanggungjawab untuk memahami falsafah biokimia.(CPMK-1);
Sub-CPMK2	Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan asam amino, protein dalam kehidupan sehari-hari (CPMK-2);
Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik dalam materi dalam biokimia (CPMK3);
Sub-CPMK4	Mampu mengkaji implikasi materi Hormon dan Vitamin dalam kehidupan sehari-hari (CPMK4);
Sub-CPMK5	Mampu mengkaji implikasi Karbohidrat dalam kehidupan sehari-hari (CPMK4);
Sub-CPMK6	Mampu mengkaji implikasi Lipid dalam kehidupan sehari-hari CPMK4);
Deskripsi Singkat Mata Kuliah	
Perkuliahan ini menganalisis hubungan antara struktur dan fungsi biologis dari makromolekul dalam sistem organisme, memberikan pemahaman tentang struktur senyawa biomolekul : asam nukleat, protein, karbohidrat, lipida dan enzim serta proses biokimiawi yang berlangsung didalam sel.	
Pustaka	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lehninger, A.L. 2017. <i>Principles of Biochemistry</i> 7th edition 2. Denise R. F. 2017. <i>Biochemistry</i> 7th edition 3. David P.C. 2009. <i>Biotechnology</i> 4. Wirahadi K.M . 2014. <i>Dasar-dasar Biokimia</i>

Pertemuan Ke	Kemampuan akhir tiap tahapan belajar	Materi pelajaran	Metode Pembelajaran	Pengalaman Belajar	Teknik Penilaian	Waktu dan Media	Daftar referensi	
1	Sub-CPMK1	Mahasiswa mampu menunjukkan sikap tanggungjawab untuk memahami falsafah biokimia.	LOGIKA MOLEKULER ORGANISME HIDUP - Pondasi Biokimia - Sel - Virus	Ceramah dan Diskusi	Pembelajaran Luring: Penjelasan tentang falsafah Biokimia dan pembagian kelompok (3-4 org)	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,3
2	Sub-CPMK2	Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan biomolekul dalam makhluk hidup.	BIOMOLEKUL - Struktur Biomolekul - Fungsi Biomolekul	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,4
3	Sub-CPMK2	Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan asam amino dalam kehidupan sehari-hari	ASAM AMINO - Struktur asam amino - Penggolongan asam amino - Titik Isoelektrik asam amino - Pemisahan asam amino - Reaksi-reaksi asam amino	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,4
4	Sub-CPMK2	Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, inovatif, dalam konteks peranan protein dalam kehidupan sehari-hari	PROTEIN - Sifat dan fungsi biologi protein - Penggolongan Protein - Reaksi-reaksi protein	5 Fhasa Nedham - Orientasi ide - Pencetusan ide - Penstrukturan Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstrukturan pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan - Merefleksikan dengan membuat laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,4
5	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi protein;	PEMURNIAN DAN PEMISAHAN PROTEIN - Pemurnian Protein - Pemisahan Protein - Penentuan deret asam amino dari rantai polipeptida	5 Fhasa Nedham - Orientasi ide - Pencetusan ide - Penstrukturan Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstrukturan pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan - Merefleksikan dengan membuat laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,4

6	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi protein;;	STRUKTUR PROTEIN: - Struktur Primer - Struktur Sekunder - Struktur Tersier - Struktur Kuarternerr	5 Fhasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstruktur an Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstruktur an pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan - Merefleksi dengan membuat laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,4
7	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi enzim;	ENZIM - Sifat-sifat dan fungsi enzim - Koenzim - Mekanisme reaksi enzim	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevalu asi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2
8	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi enzim	ENZIM - Kinetika reaksi enzim - Inhibitor	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevalu asi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	2,3,4
9			- Ujian Tengah Semester		-		1 Jam	
10	Sub-CPMK4	Mampu mengkaji implikasi Vitamin dan mineral dalam kehidupan sehari-hari.	VITAMIN DAN MINERAL (Koenzim dan Kofaktor) - Struktur vitamin - Peran vitamin sebagai koenzim - Peranan mineral sebagai kofaktor.	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevalu asi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat dan submit laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
11	Sub-CPMK5	Mampu mengkaji implikasi Karbohidrat dalam kehidupan sehari-hari;	KARBOHIDRAT - Struktur dan sifa-sifat Karbohidrat - Penggolongan Karbohidrat - Uji Karbohidrat	5 Fhasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstruktur an Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstruktur an pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan - Merefleksi dengan membuat laporan	1. Prates 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,4

12	Sub-CPMK6	Mampu mengkaji implikasi Lipid dalam kehidupan sehari-hari;	LIPID - Struktur dan sifat-sifat Lipid - Penggolongan Lipid - Uji Lipid	5 Fhasa Nedham - Orientasi - Pencetusan ide - Penstruktur an Ide - Aplikasi - Refleksi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pencetusan dan penstruktur an pengetahuan - Mengaplikasikan pengetahuan Merefleksi dengan membuat laporan	1. Prates diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,4
13	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi pencernaan makanan;	PENCERNAAN MAKANAN - Pencernaan dalam mulut, lambung, usus.	Ceramah dan Diskusi	Pembelajaran Daring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Diskusi Kelompok - Membuat dan mensubmit laporan	1. Prates diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	e-learning Unsri/ google classroom/ zoom meeting (150 menit)	1,2,4
14	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi Bioenergitika;	BIOENERGITIKA - Bioenergitika	Ceramah dan Diskusi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Diskusi Kelompok - Membuat laporan	1. Prates diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,3
15	Sub-CPMK3	Mahasiswa menguasai pondasi saintifik pada materi fotosintesis;	FOTOSINTESIS - Fotosintesis	PBL: - Orientasi masalah - Diskusi Kelompok - Membuat dan men submit laporan - Menganalisis & mengevaluasi	Pembelajaran Luring: - Presentasi tugas klp - Mengamati video/PW/LKM - Pemecahan masalah melalui diskusi - Membuat laporan	1. Prates diskusi. 2. Aktifitas diskusi. 3. Tugas Mandiri: submit makalah 4. Postes	Tatap muka Power point/video pembelajaran (150 menit)	1,2,3
16			- Ujian Semester				1 Jam	

BIODATA PENULIS



Drs. Made Sukaryawan, M.Si., Ph.D merupakan dosen Pendidikan Kimia FKIP UNSRI yang lahir di Karang Asem pada tanggal 5 Agustus 1965. Beliau menyelesaikan studi S1 Pendidikan Kimia di Universitas Sriwijaya tahun 1990. S2 Kimia-Biokimia di Institut Teknologi Bandung tahun 1998 dan melanjutkan kuliah S3 pada Program Doktor Pendidikan Kimia di Universiti Pendidikan Sultan Idris yang selesai pada tahun 2019.



Diah Kartika Sari merupakan dosen Pendidikan Kimia FKIP UNSRI yang lahir di Palembang pada tanggal 20 Mei 1984. Beliau menyelesaikan studi S1 Pendidikan Kimia di Universitas Sriwijaya tahun 2006, S2 Kimia-Biokimia di Institut Teknologi Bandung tahun 2010 dan melanjutkan kuliah S3 pada Program Doktor Pendidikan IPA Universitas Pendidikan Indonesia yang selesai pada tahun 2017.