

BIOKIMIA



Penulis:

1. Dian Wuri Astuti
2. Khafsah Sangadah
3. Vicha Nur Fatanah
4. Masfah Raudlotus Shofiyyah
5. Dewi Kurniasih
6. Muslina
7. Erisa Febriyani
8. Rina Setyawati
9. Renditya Ismiyati
10. Ratna Puspita

BIOKIMIA

Dian Wuri Astuti
Khafsah Sangadah
Vicha Nur Fatanah
Masfah Raudlotus Shofiyyah
Dewi Kurniasih
Muslina
Erisa Febriyani
Rina Setyawati
Renditya Ismiyati
Ratna Puspita

Editor: Wiwin Aprianie



PT. Mustika Sri Rosadi

BIOKIMIA

Penulis:

Dian Wuri Astuti
Khafsah Sangadah
Vicha Nur Fatanah
Masfah Raudlotus Shofiyyah
Dewi Kurniasih
Muslina
Erisa Febriyani
Rina Setyawati
Renditya Ismiyati
Ratna Puspita

Editor: Wiwin Aprianie

Layout: Tim PT. Mustika Sri Rosadi

Desain Sampul: Tim PT. Mustika Sri Rosadi

ISBN: 978-634-7775-37-5 (PDF)

Cetakan Pertama: 15 Juli 2026

Hak Cipta 2026

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

Diterbitkan oleh **Penerbit Mustika Sri Rosadi**

Anggota IKAPI No. 544/JBA/2026

Alamat:

Citra Indah City, Bukit Heliconia, Kec. Jonggol, Kab. Bogor.

Email: mars.mustikasrirosadi@gmail.com

Website: mustikamars.com

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku "Biokimia" ini dapat disusun dan diselesaikan. Buku ini dirancang sebagai sumber pembelajaran yang komprehensif bagi mahasiswa, tenaga kesehatan, dan pembaca dalam memahami konsep-konsep dasar biokimia sebagai landasan ilmu kesehatan dan kedokteran.

Buku ini membahas berbagai materi penting, mulai dari pengantar biokimia, struktur air dan sistem buffer, karbohidrat, protein, enzim, asam nukleat, metabolisme karbohidrat dan protein, bioenergetika, hingga biokimia klinis serta hubungannya dengan berbagai penyakit. Materi disajikan secara sistematis agar memudahkan pembaca memahami keterkaitan proses biokimia dengan fungsi tubuh manusia dan praktik pelayanan kesehatan.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung tersusunnya buku ini. Semoga bermanfaat bagi pengembangan ilmu dan praktik di bidang kesehatan.

Bogor, 15 Juli 2026
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
BAB 1 PENGANTAR BIOKIMIA - Dian Wuri Astuti	1
A. Pendahuluan	1
B. Pengertian Biokimia	2
C. Ruang Lingkup Biokimia	3
D. Peran Biokimia dalam Memahami Proses Kehidupan	7
E. Aplikasi Biokimia dalam Bidang Kesehatan	9
F. Aplikasi Biokimia dalam Bidang Kedokteran	10
G. Integrasi Biokimia dalam Ilmu Kesehatan Modern	12
H. Kesimpulan	12
I. Latihan Soal	13
BAB 2 STRUKTUR AIR DAN SISTEM <i>BUFFER</i> - Khafsa Sangadah	17
A. Pendahuluan	17
B. Air	17
C. Sistem <i>Buffer</i>	22
D. Latihan Soal	33
BAB 3 KARBOHIDRAT DAN FUNGSINYA -Vicha Nur Fatanah	37
A. Pendahuluan	37
B. Karakteristik dan Fungsi Karbohidrat	38
C. Penggolongan Karbohidrat	42
D. Latihan Soal	46
BAB 4 PROTEIN DAN ASAM AMINO - Masfah Raudlotus Shofiyyah	49
A. Pendahuluan	49
B. Asam Amino	50

C. Protein	54
D. Denaturasi Protein	59
E. Aplikasi Klinik yang Menerapkan Konsep denaturasi Protein	60
F. Rangkuman	61
G. Latihan Soal	62
BAB 5 ENZIM - Dewi Kurniasih	65
A. Pendahuluan	65
B. Mekanisme Kerja Enzim	65
C. Faktor yang Mempengaruhi Aktivitas Enzim	69
D. Peran Enzim Dalam Mempercepat Reaksi Biokimia di Dalam Sel	72
E. Latihan Soal	75
BAB 6 STRUKTUR DAN FUNGSI ASAM NUKLEAT - Muslina	78
A. Pendahuluan	78
B. Peran Biomedis	79
C. Biosintesis Nukleotida Purin	80
D. Deoksiribonukleosida Urasil & Sitosin "Diselamatkan"	81
E. Metotreksat Menghambat Reduksi Dihidrofolat	82
F. Gout Adalah Gangguan Metabolik Katabolisme Purin	83
G. Katabolisme Pirimidin Memproduksi Metabolit Larut Air	85
H. Latihan Soal	86
BAB 7 METABOLISME KARBOHIDRAT - Erisa Febriyani	90
A. Pendahuluan	90
B. Pencernaan dan Absorpsi Karbohidrat	91
C. Glikolisis	93

D. Oksidasi Piruvat dan Siklus Asam Sitrat (Siklus Krebs)	94
E. Rantai Transpor Elektron dan Fosforilasi Oksidatif	96
F. Glikogenesis	98
G. Glikogenolisis	100
H. Glukoneogenesis	101
I. Jalur Pentosa Fosfat (<i>Pentose Phosphate Pathway</i>)	103
J. Latihan Soal	104
BAB 8 METABOLISME PROTEIN - Rina Setyawati .	107
A. Pendahuluan	107
B. Konsep Metabolisme Protein	107
C. Pencernaan dan Absorpsi Protein	110
D. Katabolisme Asam Amino	111
E. Siklus Urea	113
F. Anabolisme Asam Amino	116
G. Peran Hormon Pada Protein	118
H. Latihan Soal	120
BAB 9 BIOENERGETIKA DAN PRODUKSI ENERGI - Renditya Ismiyati	124
A. Pendahuluan	124
B. Konsep Dasar Bioenergetika	125
C. ATP: Mata Uang Energi Sel	126
D. Oksidasi Biologis	127
E. Rantai Transpor Elektron (RTE)	128
F. Fosforilasi Oksidatif	129
G. Aspek Farmakologis dan Klinis	131
H. Latihan Soal	132
BAB 10 BIOKIMIA KLINIS DAN HUBUNGANNYA DENGAN PENYAKIT - Ratna Puspita	136
A. Pendahuluan	136

B. Dasar-Dasar Biokimia Klinis	136
C. Biomarker Biokimia dalam Diagnosis Penyakit.....	138
D. Profil Biokimia untuk Organ Spesifik.....	140
E. Keterbatasan dan Interpretasi Hasil Laboratorium	143
F. Latihan Soal	147
DAFTAR PUSTAKA	152
BIOGRAFI PENULIS	164
BIOGRAFI EDITOR	174
LAMPIRAN	177
SINOPSIS	181

BAB 1

PENGANTAR BIOKIMIA

A. Pendahuluan

1. Tujuan Pembelajaran

Mahasiswa mampu memiliki landasan ilmiah untuk memahami proses kimia dalam makhluk hidup, yaitu:

- a. Memahami konsep dasar biokimia
- b. Mahasiswa mampu menjelaskan pengertian biokimia sebagai cabang ilmu yang mengkaji molekul penyusun makhluk hidup dan reaksi kimia yang terjadi di dalamnya.
- c. Menjelaskan struktur dan fungsi biomolekul
Mahasiswa memahami struktur, sifat, dan fungsi utama karbohidrat, protein, Lipid, Asam nukleat
- d. Memahami prinsip reaksi biokimia dan enzim
- e. Mahasiswa mampu menjelaskan peran enzim sebagai katalis biologis, mekanisme kerja, serta faktor yang memengaruhi aktivitas enzim.
- f. Memahami dasar metabolisme
- g. Mahasiswa mengenali konsep dasar jalur metabolisme seperti: Katabolisme (pemecahan molekul) dan Anabolisme (sintesis molekul)

- h. Mengaitkan biokimia dengan sistem biologis dan kesehatan
 - i. Mahasiswa mampu memahami hubungan antara proses biokimia dengan fungsi tubuh serta kaitannya dengan penyakit.
2. Capaian Pembelajaran

Setelah mengikuti pembelajaran pada topik ini diharapkan mahasiswa mampu:

- a. Menjelaskan konsep dasar biokimia
- b. Menganalisis struktur dan fungsi biomolekul
- c. Menjelaskan prinsip reaksi biokimia dan peran enzim
- d. Memahami konsep dasar metabolisme
- e. Mengaitkan proses biokimia dengan sistem biologis dan kesehatan

B. Pengertian Biokimia

Biokimia merupakan ilmu yang mempelajari struktur, fungsi, dan interaksi biomolekul dalam makhluk hidup. Setiap proses biologis dalam tubuh makhluk hidup, seperti metabolisme energi, sintesis protein, dan regulasi gen, terjadi melalui reaksi kimia yang kompleks (Murray, dkk., 2018). Oleh karena itu, ruang lingkup biokimia tidak hanya terbatas pada kajian struktur molekul, tetapi juga mencakup dinamika interaksi molekuler serta implikasinya dalam sistem biologis. Perkembangan

biokimia telah memperluas cakupan kajian hingga mencakup bidang kesehatan, farmasi, bioteknologi, dan lingkungan. Hal ini menjadikan biokimia sebagai ilmu yang bersifat multidisiplin dan sangat relevan dalam menjawab berbagai tantangan kesehatan global (Garrett & Grisham, 2017).

C. Ruang Lingkup Biokimia

Ruang lingkup biokimia meliputi biokimia struktural, enzimologi, metabolisme, biologi molekuler, serta biokimia klinis. Pemahaman terhadap ruang lingkup ini sangat penting dalam menjelaskan mekanisme kehidupan serta pengembangan ilmu kesehatan modern.

1. Biokimia Struktural

Biokimia struktural mempelajari struktur dan sifat fisik biomolekul, termasuk protein, karbohidrat, lipid, dan asam nukleat. Fokus utama bidang ini adalah memahami hubungan antara struktur molekul dengan fungsi biologisnya.

Protein, misalnya, memiliki struktur hierarkis yang terdiri dari struktur primer, sekunder, tersier, dan kuartener. Perubahan kecil dalam struktur protein dapat menyebabkan perubahan fungsi yang signifikan, bahkan dapat menyebabkan penyakit seperti anemia sel sabit.

Selain itu, studi struktur DNA memberikan pemahaman tentang mekanisme penyimpanan dan pewarisan informasi genetik. Teknik seperti kristalografi sinar-X dan spektroskopi digunakan untuk mengungkap struktur molekul secara detail.

2. Enzimologi

Enzimologi adalah cabang biokimia yang mempelajari enzim sebagai katalis biologis. Enzim mempercepat reaksi kimia tanpa mengalami perubahan permanen, sehingga sangat penting dalam mempertahankan kehidupan.

- a. Ruang lingkup enzimologi meliputi:
- b. Mekanisme kerja enzim
- c. Kinetika enzim
- d. Regulasi aktivitas enzim
- e. Faktor yang mempengaruhi aktivitas enzim (pH, suhu, inhibitor)

Konsep kunci dalam enzimologi adalah model "lock and key" dan "induced fit", yang menjelaskan interaksi antara enzim dan substrat. Gangguan pada aktivitas enzim dapat menyebabkan berbagai penyakit metabolik.

3. Metabolisme

Metabolisme mencakup seluruh reaksi kimia yang terjadi dalam sel (Voet, dkk., 2016).

Metabolisme dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu:

a. Katabolisme

Proses pemecahan molekul kompleks menjadi molekul sederhana yang menghasilkan energi dalam bentuk ATP.

b. Anabolisme

Proses sintesis molekul kompleks dari molekul sederhana yang membutuhkan energi.

Jalur metabolik utama yang dipelajari dalam biokimia meliputi:

- 1) Glikolisis
- 2) Siklus Krebs
- 3) Rantai transport elektron
- 4) Metabolisme lipid dan protein

Regulasi metabolisme sangat penting untuk menjaga keseimbangan energi dalam tubuh. Ketidakseimbangan metabolisme dapat menyebabkan penyakit seperti diabetes mellitus dan obesitas (Nelson & Cox, 2017).

4. Biologi Molekuler

Biologi molekuler merupakan bagian dari biokimia yang mempelajari mekanisme molekuler dalam ekspresi gen. Fokus utama bidang ini adalah pada DNA, RNA, dan sintesis protein.

Proses utama dalam biologi molekuler meliputi:

- a. Replikasi DNA
- b. Transkripsi (DNA → RNA)
- c. Translasi (RNA → protein)

Pemahaman tentang biologi molekuler sangat penting dalam pengembangan teknologi modern seperti rekayasa genetika, terapi gen, dan diagnostik molekuler (Berg, dkk., 2015).

5. Biologi Klinis

Biokimia klinis merupakan aplikasi biokimia dalam bidang kesehatan dan kedokteran. Bidang ini berfokus pada analisis cairan tubuh (darah, urin, cairan serebrospinal) untuk diagnosis dan pemantauan penyakit.

Ruang lingkup biokimia klinis meliputi:

- a. Analisis kadar glukosa darah
- b. Profil lipid
- c. Fungsi hati dan ginjal
- d. Penanda tumor
- e. Elektrolit dan keseimbangan asam-basa

Biokimia klinis berperan penting dalam membantu tenaga medis menentukan diagnosis, prognosis, dan terapi penyakit.

Semua bidang dalam biokimia saling berhubungan dan tidak dapat dipisahkan, misalnya:

- a. Struktur protein menentukan fungsi enzim
- b. Aktivitas enzim mempengaruhi jalur metabolisme

- c. Metabolisme diatur oleh ekspresi gen

Integrasi ini memungkinkan pemahaman yang komprehensif tentang sistem biologis dan membantu dalam pengembangan solusi terhadap berbagai masalah kesehatan.

D. Peran Biokimia dalam Memahami Proses Kehidupan

Biokimia memainkan peran penting dalam menjelaskan berbagai proses fundamental yang mendasari kehidupan.

1. Produksi dan Pengelolaan Energi

Salah satu peran utama biokimia adalah menjelaskan bagaimana organisme memperoleh, menyimpan, dan menggunakan energi. Energi dalam tubuh disimpan dalam bentuk adenosin trifosfat (ATP) yang dihasilkan melalui proses metabolisme seperti glikolisis, siklus Krebs, dan rantai transpor elektron. Proses ini memungkinkan sel untuk menjalankan berbagai fungsi vital, seperti kontraksi otot, sintesis molekul, dan transport zat (Campbell, dkk., 2020).

2. Sintesis dan Degradasi Biomolekul

Biokimia menjelaskan bagaimana tubuh mensintesis biomolekul penting seperti protein, lipid, karbohidrat, dan asam nukleat

(anabolisme) dan proses pemecahan molekul (katabolisme).

Sintesis protein, misalnya, melibatkan proses transkripsi dan translasi yang diatur secara ketat oleh sistem genetik. Kesalahan dalam proses ini dapat menyebabkan gangguan fungsi sel dan penyakit.

3. Regulasi dan Komunikasi Sel

Biokimia juga berperan dalam menjelaskan bagaimana sel berkomunikasi dan mengatur aktivitasnya melalui molekul sinyal seperti hormon, neurotransmitter, dan faktor pertumbuhan.

Mekanisme transduksi sinyal memungkinkan sel merespons perubahan lingkungan secara cepat dan tepat. Gangguan pada sistem ini dapat menyebabkan berbagai penyakit, termasuk kanker dan gangguan metabolik.

4. Pewarisan dan Ekspresi Genetik

Biokimia molekuler menjelaskan bagaimana informasi genetik disimpan dalam DNA dan diekspresikan menjadi protein yang berfungsi dalam tubuh.

Proses replikasi, transkripsi, dan translasi merupakan dasar dari pewarisan sifat dan fungsi biologis. Mutasi pada DNA dapat menyebabkan perubahan struktur protein yang berdampak

pada kesehatan organisme (McKee, & McKee., 2019).

5. Homeostasis

Biokimia berperan dalam menjaga keseimbangan internal tubuh (homeostasis), termasuk pengaturan pH, suhu, kadar glukosa, dan keseimbangan elektrolit.

Mekanisme ini melibatkan berbagai sistem biokimia yang bekerja secara terintegrasi untuk memastikan tubuh tetap berada dalam kondisi optimal.

E. Aplikasi Biokimia dalam Bidang Kesehatan

Pemahaman biokimia sangat penting dalam menjaga kesehatan dan mencegah penyakit.

1. Nutrisi dan Metabolisme

Biokimia membantu menjelaskan bagaimana tubuh mencerna, menyerap, dan memanfaatkan zat gizi. Pengetahuan ini digunakan untuk merancang pola makan yang sehat dan mencegah gangguan nutrisi seperti malnutrisi dan obesitas.

2. Sistem Imun

Biokimia menjelaskan mekanisme pertahanan tubuh terhadap patogen melalui interaksi molekuler antara antigen dan antibodi. Pemahaman ini penting dalam pengembangan vaksin dan terapi imun.

3. Biomarker Kesehatan

Biokimia digunakan untuk mengidentifikasi biomarker yang dapat menunjukkan kondisi kesehatan seseorang, seperti kadar glukosa, kolesterol, dan enzim tertentu dalam darah.

Biomarker ini membantu dalam deteksi dini penyakit serta pemantauan kondisi kesehatan. (Baynes & Dominiczak, 2019).

F. Aplikasi Biokimia dalam Bidang Kedokteran

Dalam dunia kedokteran, biokimia memiliki peran yang sangat penting dalam diagnosis, terapi, dan penelitian penyakit (Stryer, dkk., 2019).

1. Diagnosis Penyakit

Pemeriksaan laboratorium berbasis biokimia digunakan untuk mendiagnosis berbagai penyakit. Contohnya:

- a. Kadar glukosa darah untuk diagnosis diabetes mellitus
- b. Profil lipid untuk penyakit kardiovaskular
- c. Enzim hati untuk gangguan fungsi hati

Analisis ini memberikan informasi objektif mengenai kondisi fisiologis dan patologis pasien (Baynes & Dominiczak, 2019).

2. Pengembangan Obat

Biokimia berperan dalam memahami mekanisme kerja obat pada tingkat molekuler.

Pengetahuan tentang interaksi antara obat dan target biologis memungkinkan pengembangan obat yang lebih efektif dan spesifik.

Selain itu, biokimia juga digunakan dalam studi farmakokinetik dan farmakodinamik untuk menentukan dosis dan keamanan obat.

3. Terapi Berbasis Molekuler

Perkembangan biokimia molekuler telah memungkinkan munculnya terapi berbasis molekuler, seperti terapi gen dan terapi target (*targeted therapy*).

Terapi ini dirancang untuk menargetkan molekul spesifik yang terlibat dalam penyakit, sehingga meningkatkan efektivitas pengobatan dan mengurangi efek samping (Alberts, dkk., 2022).

4. Pemantauan Penyakit

Biokimia digunakan untuk memantau perkembangan penyakit dan respons terhadap terapi. Misalnya, kadar hemoglobin terglikasi (HbA1c) digunakan untuk memantau kontrol glukosa pada pasien diabetes (Burtis, dkk., 2023).

5. Pemahaman Patogenesis Penyakit

Biokimia membantu menjelaskan mekanisme terjadinya penyakit pada tingkat molekuler, seperti:

a. Resistensi insulin pada diabetes

- b. Mutasi gen pada kanker
- c. Peradangan kronis pada penyakit degeneratif

Pemahaman ini menjadi dasar dalam pengembangan strategi pencegahan dan pengobatan (Lodish, dkk., 2021).

G. Integrasi Biokimia dalam Ilmu Kesehatan Modern

Biokimia tidak berdiri sendiri, tetapi terintegrasi dengan berbagai bidang seperti:

- 1. Biologi molekuler
- 2. Farmasi
- 3. Mikrobiologi
- 4. Kedokteran klinis

Integrasi ini memungkinkan pendekatan multidisipliner dalam menangani masalah kesehatan, termasuk pengembangan pengobatan presisi (*precision medicine*) (Rodwell, dkk., 2021).

H. Kesimpulan

Biokimia memiliki peran yang sangat penting dalam memahami proses kehidupan pada tingkat molekuler. Ilmu ini menjelaskan berbagai mekanisme dasar kehidupan, seperti produksi energi, sintesis biomolekul, dan regulasi genetik.

Selain itu, biokimia memiliki aplikasi luas dalam bidang kesehatan dan kedokteran, termasuk

diagnosis penyakit, pengembangan obat, terapi, dan pemantauan kondisi klinis. Oleh karena itu, pemahaman biokimia merupakan fondasi penting dalam pengembangan ilmu kesehatan dan peningkatan kualitas hidup manusia.

I. Latihan Soal

1. Biokimia adalah ilmu yang mempelajari
 - A. Struktur bumi dan mineral
 - B. Makhluk hidup dan lingkungannya
 - C. Molekul penyusun makhluk hidup dan reaksi kimia yang terjadi di dalamnya
 - D. Penyakit menular pada manusia
 - E. Penyakit tidak menular pada manusia
2. Tujuan utama mempelajari biokimia adalah
 - A. Mengetahui sejarah perkembangan ilmu kesehatan
 - B. Memahami proses kehidupan pada tingkat molekuler
 - C. Menentukan jenis obat yang akan digunakan
 - D. Mempelajari struktur organ tubuh saja
 - E. Mengetahui cara hidup bersih dan sehat
3. Cabang biokimia yang mempelajari struktur biomolekul disebut
 - A. Enzimologi
 - B. Metabolisme
 - C. Biokimia struktural

- D. Biokimia klinis
 - E. Biologi
4. Berikut yang merupakan ruang lingkup biokimia adalah
- A. Struktur biomolekul
 - B. Metabolisme sel
 - C. Fungsi enzim
 - D. Semua benar
 - E. Semua salah
5. Biokimia memiliki peran penting dalam bidang kesehatan karena
- A. Membantu memahami mekanisme penyakit pada tingkat molekuler
 - B. Menggantikan ilmu anatomi
 - C. Menentukan harga obat
 - D. Mengukur tekanan darah
 - E. Menentukan status kesehatan masyarakat
6. Metabolisme adalah
- A. Proses pembelahan sel
 - B. Seluruh reaksi kimia dalam makhluk hidup
 - C. Sistem peredaran darah
 - D. Proses reproduksi
 - E. Sistem pernafasan
7. Pemecahan molekul kompleks menjadi molekul sederhana disebut
- A. Anabolisme
 - B. Katabolisme
 - C. Biosintesis

- D. Difusi
 - E. Transkripsi
8. Pembentukan molekul kompleks dari molekul sederhana disebut
- A. Katabolisme
 - B. Respirasi
 - C. Anabolisme
 - D. Oksidasi
 - E. Difusi
9. Berikut yang bukan aplikasi biokimia dalam bidang kedokteran, yaitu untuk ...
- A. Mendiagnosis penyakit
 - B. Pengembangan obat
 - C. Terapi berbasis molekuler, seperti terapi gen
 - D. Memantau perkembangan penyakit dan respons terhadap terapi
 - E. Perancangan struktur bangunan rumah sakit
10. Berikut yang bukan aplikasi biokimia dalam bidang kesehatan, yaitu untuk ...
- A. Merancang pola makan yang sehat dan mencegah gangguan nutrisi
 - B. Menjelaskan mekanisme pertahanan tubuh terhadap patogen melalui interaksi molekuler antara antigen dan antibodi.
 - C. Mengidentifikasi biomarker yang dapat menunjukkan kondisi kesehatan seseorang

- D. Pengukuran kadar glukosa darah dalam rangka diagnosis diabetes melitus
- E. Mendesain kebutuhan fasilitas kesehatan

BAB 2

STRUKTUR AIR DAN SISTEM *BUFFER*

A. Pendahuluan

1. Tujuan Pembelajaran

Mahasiswa mampu menjelaskan struktur dan sifat air serta konsep pH dan sistem buffer dalam menjaga keseimbangan asam-basa tubuh.

2. Capaian Pembelajaran

Setelah mengikuti pembelajaran pada topik ini diharapkan mahasiswa mampu:

- a. Menganalisis hubungan antara struktur dan sifat air dengan perannya dalam sistem biologis.
- b. Menganalisis konsep kesetimbangan air, kekuatan asam-basa, dan perhitungan pH.
- c. Mengevaluasi peran sistem buffer dalam menjaga kestabilan pH pada cairan biologis dan proses metabolisme.

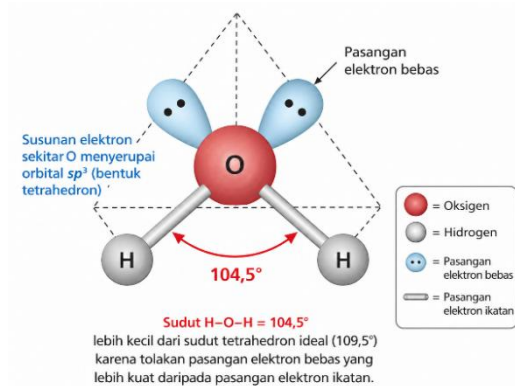
B. Air

Air merupakan komponen utama tubuh yang berperan sebagai pelarut biologis dan medium berbagai reaksi biokimia. Keberadaan air memungkinkan transportasi zat, pengaturan suhu, serta pemeliharaan fungsi sel dan jaringan. Pada bab ini akan dijelaskan struktur dan sifat air, konsep

pH, serta peran sistem buffer dalam mempertahankan homeostasis tubuh.

1. Struktur Molekul dan Kepolaran Air

Molekul air tersusun atas satu atom oksigen yang berikatan kovalen dengan dua atom hidrogen. Bentuk molekul air ditentukan oleh susunan orbital elektron terluar atom oksigen yang menyerupai orbital sp^3 sehingga membentuk struktur tetrahedron, dengan dua sudut ditempati atom hidrogen dan dua sudut lainnya ditempati pasangan elektron bebas. Sudut ikatan H-O-H pada molekul air sebesar $104,5^\circ$, sedikit lebih kecil dibandingkan sudut tetrahedron ideal $109,5^\circ$ karena adanya tolakan pasangan elektron bebas pada atom oksigen yang tidak terlibat dalam pembentukan ikatan. (Nelson & Cox, 2005). Gambar 1.1 menunjukkan bentuk dan geometri molekul air.



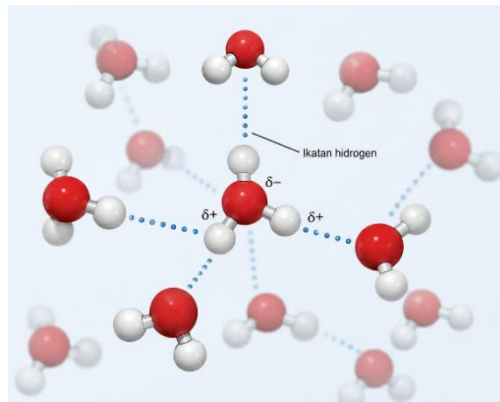
Gambar 2.1 Bentuk Molekul Air

Distribusi muatan listrik yang tidak merata pada molekul air menyebabkan air bersifat polar. Atom oksigen memiliki elektronegativitas lebih tinggi daripada atom hidrogen, sehingga elektron ikatan lebih tertarik ke arah oksigen. Akibatnya, atom oksigen bermuatan negatif parsial (δ^-), sedangkan atom hidrogen bermuatan positif parsial (δ^+). Sifat ini memungkinkan air berinteraksi dengan ion maupun molekul lain yang bermuatan.

2. Ikatan Hidrogen pada Air

Perbedaan distribusi muatan pada air membentuk sifat dipol dan gaya tarik elektrostatik antara atom oksigen dari satu molekul air dengan atom hidrogen dari molekul air lainnya yang dikenal sebagai ikatan hidrogen (Gambar 2). Ikatan hidrogen merupakan interaksi nonkovalen lemah antara atom hidrogen dari satu molekul dengan atom yang bersifat lebih elektronegatif pada molekul lain. (Haoxing & System, 2018) Energi yang diperlukan untuk memutus satu ikatan hidrogen air dalam wujud cair hanya sekitar 4,5 kkal/mol, yaitu kurang dari 5% energi yang dibutuhkan untuk memutus ikatan kovalen O–H. Ikatan hidrogen juga tidak berlangsung lama, dengan waktu paruh kurang lebih sekitar satu mikrodetik. Ikatan hidrogen menyebabkan

molekul-molekul air saling berinteraksi dan membentuk susunan yang lebih teratur. Rata-rata, satu molekul air membentuk ikatan hidrogen dengan sekitar 3,5 molekul air lainnya. Keseluruhan ikatan hidrogen antar molekul air memberikan kohesi pada air dalam wujud cair. Ikatan hidrogen sangat memengaruhi sifat fisik air dan menjadi penyebab tingginya tegangan permukaan dan titik didih air. (Wood, 1996)



Gambar 2.1 Ikatan Hidrogen Antar Molekul Air

Ikatan hidrogen tidak hanya terbentuk antar molekul air, tetapi juga antara atom elektronegatif (seperti oksigen atau nitrogen) yang memiliki pasangan elektron bebas dengan atom hidrogen yang terikat pada atom elektronegatif lainnya. Ikatan ini dapat terjadi dalam molekul yang sama maupun antarmolekul. Karena bersifat terarah, ikatan hidrogen berperan penting dalam mempertahankan susunan geometri dan

stabilitas struktur molekul. (Ahern, Rajagopal, 2014) Sifat ini berperan dalam pembentukan struktur tiga dimensi biomolekul seperti protein dan asam nukleat karena memiliki banyak ikatan hidrogen intramolekul. Selain itu, jaringan ikatan hidrogen yang luas dapat membentuk jembatan antarmolekul terlarut sehingga molekul-molekul besar, seperti protein dan asam nukleat, dapat saling berinteraksi tanpa harus bersentuhan langsung. (Nelson & Cox, 2005)

3. Air dan Gaya Antarmolekul dalam Sistem Biologis

Sifat kepolaran yang tinggi menjadikan air sebagai pelarut yang sangat efektif bagi senyawa ionik dan polar. Melalui proses hidrasi, air mampu memisahkan dan menstabilkan ion-ion bermuatan, seperti ion Na^+ , Cl^- , senyawa dengan gugus karboksilat, amonium, dan fosfat, sehingga melemahkan gaya elektrostatik serta meningkatkan kelarutannya dalam larutan. Sebaliknya, senyawa nonpolar bersifat hidrofobik karena tidak dapat berinteraksi secara menguntungkan dengan air. Akibatnya, molekul-molekul nonpolar cenderung berkumpul melalui interaksi hidrofobik untuk meminimalkan kontak dengan air, suatu fenomena yang berperan penting dalam

pembentukan misel, membran biologis, dan stabilisasi struktur tiga dimensi protein. Selain interaksi hidrofobik, biomolekul juga distabilkan oleh berbagai interaksi nonkovalen, seperti ikatan hidrogen, interaksi ionik, dan gaya van der Waals. Meskipun masing-masing interaksi ini relatif lemah dibandingkan ikatan kovalen, kombinasi banyak interaksi nonkovalen menghasilkan efek stabilisasi yang besar sehingga berperan penting dalam mempertahankan struktur dan fungsi biomolekul, termasuk protein, DNA, RNA, serta berbagai kompleks biomolekul.

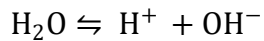
C. Sistem *Buffer*

1. Tetapan Keseimbangan Air (K_w) dan Konsep pH

Salah satu sifat air yang mendasari berbagai proses biologis adalah kemampuannya untuk mengalami ionisasi. Meskipun sebagian besar molekul air berada dalam bentuk utuh, sejumlah molekul air secara spontan terurai menjadi ion hidrogen (H^+) dan ion hidroksida (OH^-). Proses ini dikenal sebagai autoionisasi air. Fenomena ini memiliki peranan yang sangat besar dalam menentukan sifat asam dan basa suatu larutan dan sistem buffer

dalam menjaga keseimbangan pH dalam sistem biologis.

Secara sederhana, proses ionisasi air sering dituliskan sebagai pembentukan ion hidrogen (H^+) dan ion hidroksida (OH^-) melalui persamaan reaksi berikut:



Akan tetapi, proton bebas (H^+) sebenarnya tidak berada dalam keadaan bebas. Ion hidrogen yang terbentuk di dalam air akan segera berikatan dengan molekul air membentuk ion hidronium (H_3O^+) akibat adanya ikatan hidrogen. (Nelson & Cox, 2005) Seperti reaksi dua arah pada umumnya, Konstanta disosiasi air, K , dinyatakan sebagai berikut:

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

Pada suhu 25°C, satu liter air murni memiliki massa sekitar 1000 g. Karena massa molar air adalah 18 g/mol, maka konsentrasi air murni dapat dihitung sebesar 55,5 M. Meskipun air mengalami ionisasi secara spontan, hanya sebagian yang sangat kecil dari molekul air yang terionisasi pada suatu waktu. Oleh karena itu, konsentrasi air dapat dianggap konstan. Nilai konstanta disosiasi air (K) yang diperoleh melalui pengukuran konduktivitas listrik air

murni adalah sekitar $1,8 \times 10^{-16}$ pada suhu 25°C. Konsentrasi air yang konstan dapat digabungkan dengan nilai K membentuk konstanta baru yang disebut hasil kali ion air atau tetapan ionisasi air (K_w) dengan persamaan sebagai berikut:

$$K_w = K [H_2O]$$

dengan memasukkan nilai K dan konsentrasi air, diperoleh:

$$K_w = (1,8 \times 10^{-16})(55,5M) = 1,0 \times 10^{-14}$$

Dengan demikian, pada suhu 25°C, hasil kali konsentrasi ion hidrogen dan ion hidroksida dalam setiap larutan berair selalu bernilai $1,0 \times 10^{-14} M^2$. Hubungan ini berlaku baik pada air murni maupun pada larutan yang bersifat asam atau basa.

$$[H^+][OH^-] = 1,0 \times 10^{-14}$$

Dalam air murni, konsentrasi ion hidrogen dan ion hidroksida adalah sama. Oleh karena itu:

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

karena:

$$[H^+][OH^-] = 1,0 \times 10^{-14}$$

maka:

$$[H^+]^2 = 1,0 \times 10^{-14}$$

sehingga diperoleh:

$$[H^+] = [OH^-] = 1,0 \times 10^{-7} M$$

Keadaan ketika konsentrasi ion hidrogen sama dengan konsentrasi ion hidroksida disebut

netral. Nilai K_w yang konstan menunjukkan adanya hubungan berbanding terbalik antara konsentrasi ion hidrogen dan ion hidroksida. Apabila konsentrasi ion hidrogen meningkat hingga melebihi $1,0 \times 10^{-7} \text{ M}$, maka konsentrasi ion hidroksida turun hingga kurang dari $1,0 \times 10^{-7} \text{ M}$ agar hasil kalinya tetap sama dengan K_w . Sebaliknya, apabila konsentrasi ion hidroksida meningkat, konsentrasi ion hidrogen akan menurun. (Wood, 1996)

pH merupakan ukuran yang digunakan untuk menyatakan Tingkat keasamaan atau kebasaan suatu arutan. Secara matematis, pH didefinisikan sebagai nilai negatif logaritma basis 10 dari konsentrasi ion hidrogen (H^+) dalam larutan yang dinyatakan dalam satuan mol per liter (mol/L). Rumus pH dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Berdasarkan persamaan di atas, nilai pH air murni adalah 7 pada kondisi netral. Larutan dengan nilai pH kurang dari 7 bersifat asam akibat tingginya konsentrasi ion hidrogen dibandingkan ion hidroksida. Sebaliknya, larutan dengan nilai pH lebih dari 7.

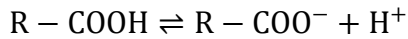
2. Kekuatan Asam-basa

Dalam sistem biologis, banyak molekul mengandung gugus fungsional yang bertindak

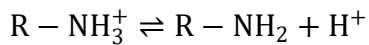
sebagai asam atau basa lemah, seperti gugus karboksil (-COOH), gugus amina (-NH₂), dan berbagai gugus pada rantai samping asam amino penyusun protein, gugus fosfat pada asam nukleat, dan gugus lain yang berasal dari berbagai senyawa metabolit. Selama proses metabolisme, gugus-gugus tersebut mempunyai kemampuan untuk melepas atau menangkap ion hidrogen dan turut serta memengaruhi perubahan pH intraseluler maupun ekstraseluler. Sebagian besar senyawa biologis merupakan asam lemah yang hanya terdisosiasi sebagian dan melepaskan sebagian ion hidrogen (H⁺), berbeda dengan asam anorganik kuat seperti asam sulfat dan asam klorida yang terdisosiasi hampir sempurna dalam larutan. (Vasudevan et al., 2005)

Dalam reaksi asam-basa, bentuk molekul yang masih mengikat ion hidrogen (HA) disebut asam. Anion sisa asam atau asam yang telah melepaskan ion hidrogen disebut basa konjugat (A⁻). Sedangkan suatu basa yang menerima ion hidrogen disebut dengan asam konjugat. Reaksi asam dan basa lemah memenuhi reaksi kesetimbangan sehingga dapat dinyatakan dengan konstanta kesetimbangan asam (K_a) dan konstanta kesetimbangan basa (K_b). Misal untuk asam lemak R-COOH dan basa lemah R-

NH₃⁺ mempunyai persamaan K_a dan K_b sebagai berikut:



$$K_a = \frac{[R - \text{COO}^-][\text{H}^+]}{[R - \text{COOH}]}$$



$$K_a = \frac{[R - \text{NH}_2][\text{H}^+]}{[R - \text{NH}_3^+]}$$

Nilai K_a dan K_b senyawa asam basa lemah menggambarkan kemampuan suatu asam atau basa untuk melepaskan ion hidrogen sehingga juga menunjukkan kekuatan asam atau basa. Nilai K_a umumnya sangat kecil dan sulit digunakan secara praktis, maka digunakan bentuk logaritmiknya yang disebut pK_a.

$$\text{pK}_a = -\log K_a$$

Nilai pK_a memberikan gambaran yang lebih mudah mengenai kekuatan suatu asam. Semakin kecil nilai pK_a, semakin besar kecenderungan asam tersebut untuk melepaskan proton (H⁺), sehingga semakin kuat sifat asamnya. Sebaliknya, nilai pK_a yang lebih besar menunjukkan bahwa asam tersebut lebih sulit terdisosiasi dan bersifat lebih lemah.

Selain untuk menggambarkan kekuatan asam, pKa juga digunakan untuk membandingkan kekuatan basa melalui asam konjugatnya. Hal ini karena terdapat hubungan terbalik antara asam dan basa konjugat. Semakin kuat suatu asam, semakin lemah basa konjugatnya, dan sebaliknya. Pada Tabel 1 terdapat daftar nilai pKA asam dan basa konjugatnya.

Tabel 2.1 Asam Metabolik dalam Darah, Nilai pKa, dan Sumber Pembentukannya. (Mark)

Asam	Anion	pKa	Sumber Utama
Asam kuat			
Asam sulfat (H_2SO_4)	Sulfat (SO_4^{2-})	Terdisosiasi sempurna	Sulfat dari makanan dan asam amino yang mengandung sulfur
Asam lemah			
Asam karbonat ($\text{R}-\text{COOH}$)	Bikarbonat ($\text{R}-\text{COO}^-$)	3,80	CO_2 dari siklus TCA
Asam laktat ($\text{R}-\text{COOH}$)	Laktat ($\text{R}-\text{COO}^-$)	3,73	Glikolisis anaerob
Asam piruvat ($\text{R}-\text{COOH}$)	Piruvat ($\text{R}-\text{COO}^-$)	2,39	Glikolisis
Asam sitrat ($\text{R}-3\text{COOH}$)	Sitrat ($\text{R}-3\text{COO}^-$)	3,13; 4,76; 6,40	Siklus asam sitrat dan makanan (misalnya buah sitrus)

Asam	Anion	pKa	Sumber Utama
Asam asetoasetat (R-COOH)	Asetoasetat (R-COO ⁻)	3,62	Oksidasi asam lemak menjadi badan keton
Asam β-hidroksibutirat (R-COOH)	β-Hidroksibutirat (R-COO ⁻)	4,41	Oksidasi asam lemak menjadi badan keton
Asam asetat (R-COOH)	Asetat (R-COO ⁻)	4,76	Metabolisme etanol
Dihidrogen fosfat (H ₂ PO ₄ ⁻)	Monohidrogen fosfat (HPO ₄ ²⁻)	6,8	Fosfat organik dari makanan
Ion amonium (NH ₄ ⁺)	Amonia (NH ₃)	9,25	Senyawa mengandung nitrogen dari makanan

3. *Buffer* dalam Sistem Biologis

Larutan *buffer* atau larutan penyangga merupakan larutan yang terdiri atas asam lemah dan basa konjugatnya, atau basa lemah dan asam konjugatnya, yang berfungsi mempertahankan pH agar tidak berubah secara signifikan ketika sejumlah kecil asam atau basa ditambahkan. Kemampuan ini dijelaskan melalui persamaan harderson-Hasselbalch, yang menunjukkan hubungan anatara pH, pKa, serta

perbandingan konsentrasi basa konjugat (A^-) dan asam lemah (HA) sebagai berikut:

$$pH = pK_a + \log \frac{[A^-]}{[HA]}$$

Pada larutan *buffer* yang terdiri atas asam lemah (HA) dan basa konjugatnya (A^-), kemampuan menahan perubahan pH mencapai kondisi optimum ketika pH sama dengan nilai pK_a atau konsentrasi HA sama dengan A^- . Ketika basa (OH^-) ditambahkan, asam lemah (HA) akan melepaskan ion H^+ yang kemudian bereaksi dengan OH^- membentuk air, sehingga kenaikan pH menjadi relatif kecil. Sebaliknya, jika asam (H^+) ditambahkan, basa konjugat (A^-) akan mengikat ion H^+ dan membentuk kembali HA, sehingga penurunan pH juga dapat diminimalkan. Dengan demikian, keberadaan HA dan A^- dalam jumlah yang seimbang memungkinkan *buffer* secara efektif menetralkan baik asam maupun basa yang ditambahkan, sehingga pH larutan tetap relatif stabil. Kondisi ini disebut dengan kapasitas *buffer* maksimum.

Dalam sel hidup, banyak reaksi metabolisme menghasilkan atau menggunakan ion H^+ sehingga berpotensi mengubah pH. Proses metabolisme dalam tubuh secara terus-

menerus menghasilkan sejumlah besar asam. Tanpa adanya mekanisme penyangga, akumulasi asam tersebut akan menyebabkan penurunan pH cairan tubuh secara drastis hingga mencapai tingkat yang tidak dapat mendukung kehidupan. Meskipun demikian, tubuh mampu mempertahankan pH darah dalam kisaran normal 7,36–7,44 dan pH intraseluler sekitar 7,1 melalui berbagai mekanisme pengaturan asam-basa. Berikut beberapa contoh sistem *buffer* dalam sistem biologis:

a. *Buffer* bikarbonat

Sistem *buffer* bikarbonat merupakan sistem penyangga utama dalam cairan ekstraseluler yang terdiri atas karbon dioksida (CO_2), asam karbonat (H_2CO_3), dan bikarbonat (HCO_3^-). CO_2 hasil metabolisme bereaksi dengan air membentuk asam karbonat yang kemudian terdisosiasi menjadi ion H^+ dan HCO_3^- . Sistem ini efektif menjaga keseimbangan asam-basa karena ketersediaan CO_2 dapat diatur oleh paru-paru melalui respirasi, sedangkan konsentrasi bikarbonat diatur oleh ginjal. Dengan kerja sama kedua organ tersebut, pH darah dapat dipertahankan dalam rentang normal. (Haoxing & System, 2018)

b. *Buffer* fosfat

pH cairan intraseluler (ICF) terutama dipertahankan oleh sistem *buffer* fosfat dan protein. *Buffer* fosfat terdiri atas pasangan H_2PO_4^- dan HPO_4^{2-} dengan pKa sekitar 7,2, sehingga sangat efektif menjaga pH di dalam sel. Selain itu, protein yang mengandung residu asam amino seperti histidin, serta senyawa fosfat organik seperti ATP dan glukosa-6-fosfat, juga berperan sebagai *buffer*. Keseimbangan pH intraseluler lebih lanjut dipertahankan melalui transport ion melintasi membran sel, termasuk pengeluaran H^+ dan anion metabolik, pertukaran H^+ dengan Na^+ saat sel terlalu asam, serta pertukaran HCO_3^- dengan Cl^- saat sel terlalu basa. (Satyanarayana, 2016)

c. Ekskresi Ion Hidrogen, Amonium, dan Fosfat melalui Urin

Asam nonvolatil yang dihasilkan dari metabolisme tubuh tidak dapat dikeluarkan sebagai CO_2 melalui paru-paru, sehingga harus diekskresikan melalui urin. Ekskresi asam terutama terjadi dalam bentuk ion fosfat (H_2PO_4^-) dan amonium (NH_4^+), yang berperan sebagai *buffer* urin dan membantu mempertahankan pH urin

sekitar 5,5–7,0. Salah satu sumber utama asam nonvolatil adalah asam sulfat (H_2SO_4), yang berasal dari metabolisme asam amino yang mengandung sulfur, seperti sistein dan metionin. Selain itu, ginjal menghasilkan dan mengekskresikan ion amonium sesuai dengan tingkat keasaman darah, sekaligus mengembalikan ion bikarbonat ke sirkulasi sehingga berperan penting dalam menjaga keseimbangan asam-basa tubuh. (Haoxing & System, 2018)

D. Latihan Soal

1. Bentuk molekul air berupa sudut (bengkok) dengan sudut ikatan H–O–H sebesar $104,5^\circ$ disebabkan oleh
 - A. Ikatan hidrogen antar molekul air
 - B. Adanya dua pasangan elektron bebas pada atom oksigen
 - C. Elektronegativitas hidrogen yang tinggi
 - D. Massa atom oksigen lebih besar daripada hydrogen
 - E. Ionisasi spontan molekul air
2. Sifat polar pada molekul air terutama disebabkan oleh
 - A. Massa atom oksigen lebih besar daripada massa atom hydrogen
 - B. Molekul air berbentuk linear

- C. Distribusi muatan yang tidak merata akibat perbedaan elektronegativitas
 - D. Adanya ion H^+ bebas dalam air
 - E. Kemampuan air membentuk ikatan ionic
3. Salah satu akibat biologis penting dari ikatan hidrogen pada biomolekul adalah
- A. Memutus ikatan kovalen pada protein
 - B. Meningkatkan konsentrasi ion hidrogen dalam sel
 - C. Mempertahankan struktur tiga dimensi protein dan asam nukleat
 - D. Mengubah senyawa nonpolar menjadi polar
 - E. Meningkatkan tekanan osmotik cairan tubuh
4. Ketika garam NaCl dilarutkan dalam air, air dapat memisahkan ion Na^+ dan Cl^- karena
- A. Air membentuk ikatan kovalen dengan kedua ion tersebut
 - B. Air meningkatkan massa ion-ion tersebut
 - C. Air mengubah ion menjadi senyawa nonpolar
 - D. Molekul air menghidrasi dan menstabilkan ion-ion bermuatan
 - E. ion Na^+ dan Cl^- bereaksi membentuk asam kuat
5. Interaksi hidrofobik berperan penting dalam
- A. Pembentukan ion hidronium

- B. Stabilisasi struktur protein dan membran biologis
 - C. Pembentukan ikatan kovalen antar asam amino
 - D. Peningkatan kelarutan senyawa nonpolar dalam air
 - E. Pembentukan ion hidroksida
6. Pada suhu 25°C, nilai tetapan ionisasi air (K_w) adalah
- A. $1,0 \times 10^{-7}$
 - B. $1,0 \times 10^{-14}$
 - C. $1,0 \times 10^{-10}$
 - D. $7,0 \times 10^{-7}$
 - E. $5,5 \times 10^{-7}$
7. Jika suatu larutan memiliki konsentrasi ion hidrogen $[H^+]$ sebesar 1×10^{-5} M, maka pH larutan tersebut adalah
- A. 3
 - B. 4
 - C. 5
 - D. 7
 - E. 9
8. Pernyataan yang tepat mengenai nilai pK_a adalah
- A. Semakin besar pK_a , semakin kuat asamnya
 - B. Semakin kecil pK_a , semakin kuat asamnya
 - C. pK_a menunjukkan konsentrasi ion hidroksida

- D. pKa selalu sama dengan pH larutan
 - E. pKa hanya berlaku untuk asam kuat
9. Sistem buffer yang menjadi penyangga utama dalam cairan ekstraseluler adalah
- A. Buffer fosfat
 - B. Buffer protein
 - C. Buffer hemoglobi
 - D. Buffer bikarbonat
 - E. Buffer amonium
10. Buffer fosfat efektif menjaga pH cairan intraseluler karena memiliki pasangan buffer
- A. NH_4^+ / NH_3
 - B. H_2CO_3 / HCO_3^-
 - C. H_2PO_4^- / HPO_4^{2-}
 - D. HCl / Cl^-
 - E. H_2SO_4 / SO_4^{2-}

BAB 3

KARBOHIDRAT DAN FUNGSINYA

A. Pendahuluan

1. Tujuan Pembelajaran
Mahasiswa mampu menjelaskan tentang karbohidrat dan fungsinya.
2. Capaian Pembelajaran
Setelah mengikuti pembelajaran pada topik ini diharapkan mahasiswa mampu:
 - a. Menjelaskan pengertian karbohidrat
 - b. Menjelaskan karakteristik dan fungsi dari karbohidrat
 - c. Mendeskripsikan penggolongan, struktur, dan sifat-sifat karbohidrat

Biokimia merupakan cabang ilmu yang mempelajari berbagai macam proses kimia yang terjadi di dalam organisme hidup, termasuk struktur, fungsi, dan metabolisme biomolekul penyusun sel. Salah satu biomolekul utama yang memiliki peranan sangat penting bagi kehidupan adalah karbohidrat. Karbohidrat dikenal sebagai sumber energi utama bagi makhluk hidup, terutama dalam mendukung aktivitas metabolisme sel dan fungsi fisiologis tubuh. Selain sebagai sumber energi, karbohidrat juga berfungsi sebagai cadangan energi, komponen struktural sel, serta berperan dalam proses komunikasi antar sel dan sistem biologis lainnya (Nelson & Cox, 2021).

Istilah karbohidrat berasal dari kata carbon (karbon) dan hydrate (air), yang secara harfiah berarti "hidrat karbon". Istilah ini diperkenalkan oleh Karl Schmidt pada pertengahan abad ke-19 berdasarkan pengamatan bahwa banyak senyawa karbohidrat memiliki rumus empiris umum $(CH_2O)_n$ sehingga tampak sebagai gabungan karbon dengan air. Walaupun kemudian diketahui bahwa tidak semua karbohidrat memiliki rumus tersebut dan struktur kimianya jauh lebih kompleks, istilah karbohidrat tetap digunakan untuk menyebut kelompok senyawa polihidroksi aldehida atau polihidroksi keton beserta turunannya yang memiliki peran penting dalam sistem biologis (Rafi, 2017).

Dalam kehidupan sehari-hari, karbohidrat banyak ditemukan pada bahan makanan seperti nasi, jagung, gandum, kentang, buah-buahan, dan gula. Oleh karena itu, pemahaman mengenai jenis, struktur, sifat, dan fungsi karbohidrat sangat penting untuk dipelajari, khususnya dalam bidang kesehatan, pertanian, pangan, dan ilmu hayati lainnya.

B. Karakteristik dan Fungsi Karbohidrat

1. Karakteristik Karbohidrat

Karbohidrat merupakan kelompok biomolekul organik yang tersusun atas atom karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O), dengan rumus empiris umum mendekati $(CH_2O)_n$. Secara kimiawi, karbohidrat

didefinisikan sebagai senyawa polihidroksi aldehida atau polihidroksi keton beserta turunannya. Karbohidrat dapat ditemukan dalam bentuk sederhana sebagai monosakarida maupun dalam bentuk kompleks sebagai oligosakarida dan polisakarida yang tersusun melalui ikatan glikosidik (Nelson & Cox, 2021).

Berdasarkan jumlah unit sakarida penyusunnya, karbohidrat diklasifikasikan menjadi monosakarida, disakarida, oligosakarida, dan polisakarida. Monosakarida merupakan unit dasar karbohidrat yang tidak dapat dihidrolisis menjadi molekul yang lebih sederhana. Contohnya adalah glukosa, fruktosa, dan galaktosa. Disakarida tersusun atas dua monosakarida yang dihubungkan oleh ikatan glikosidik, seperti sukrosa, laktosa, dan maltosa. Sementara itu, polisakarida merupakan polimer yang tersusun atas banyak unit monosakarida, seperti pati, glikogen, selulosa, dan kitin (Cox, 2022).

Karbohidrat memiliki sifat struktural yang sangat beragam. Variasi tersebut ditentukan oleh jenis monosakarida penyusun, konfigurasi stereokimia, jenis ikatan glikosidik, serta tingkat percabangan molekul. Sebagai contoh, glikogen dan selulosa sama-sama tersusun dari unit glukosa, tetapi perbedaan konfigurasi ikatan glikosidiknya menghasilkan fungsi biologis yang sangat berbeda. Glikogen berfungsi sebagai cadangan energi pada hewan, sedangkan selulosa berfungsi sebagai komponen struktural

utama dinding sel tumbuhan (Nelson & Cox, 2021).

Selain itu, banyak monosakarida memiliki kemampuan membentuk struktur siklik melalui reaksi intramolekuler antara gugus karbonil dan gugus hidroksil. Struktur cincin ini menghasilkan bentuk anomer α dan β yang berperan penting dalam menentukan sifat fisik maupun biologis suatu karbohidrat (Nelson & Cox, 2021)

2. Fungsi Karbohidrat

Karbohidrat memiliki berbagai fungsi biologis yang sangat penting bagi organisme hidup. Fungsi utama karbohidrat adalah sebagai sumber energi. Glukosa merupakan bahan bakar metabolik utama yang digunakan oleh sel untuk menghasilkan energi dalam bentuk adenosin trifosfat (ATP) melalui proses glikolisis, siklus asam sitrat, dan fosforilasi oksidatif. Jaringan seperti otak dan eritrosit sangat bergantung pada ketersediaan glukosa untuk mempertahankan fungsi fisiologisnya (Murray et al., 2021).

Selain sebagai sumber energi langsung, karbohidrat juga berfungsi sebagai cadangan energi. Pada tumbuhan, energi disimpan dalam bentuk pati (starch), sedangkan pada hewan disimpan dalam bentuk glikogen yang terutama terdapat pada hati dan otot. Cadangan energi ini dapat dimobilisasi kembali ketika tubuh membutuhkan pasokan energi tambahan (Cox, 2022).

Fungsi penting lainnya adalah sebagai komponen struktural. Selulosa merupakan polisakarida utama penyusun dinding sel tumbuhan yang memberikan kekuatan mekanik dan mempertahankan bentuk sel. Pada hewan, glikosaminoglikan berperan sebagai komponen matriks ekstraseluler yang mendukung struktur jaringan ikat, tulang rawan, dan cairan sinovial (Cox, 2022).

Karbohidrat juga berperan dalam proses komunikasi dan pengenalan antar sel. Oligosakarida yang terikat pada protein (glikoprotein) dan lipid (glikolipid) membentuk struktur permukaan sel yang berfungsi sebagai penanda biologis. Struktur ini terlibat dalam pengenalan sel, adhesi sel, respons imun, fertilisasi, dan interaksi antara patogen dengan sel inang. Mekanisme ini dikenal sebagai "sugar code" atau kode gula, yaitu sistem informasi biologis yang dimediasi oleh struktur karbohidrat spesifik pada permukaan sel (Nelson & Cox, 2021).

Dalam sistem imun, karbohidrat berkontribusi terhadap pengenalan antigen dan pembentukan respons imun. Contohnya adalah antigen golongan darah ABO yang ditentukan oleh variasi struktur oligosakarida pada permukaan eritrosit. Perbedaan struktur karbohidrat tersebut memungkinkan sistem imun membedakan sel tubuh sendiri dengan sel asing (Varki et al., 2022).

Lebih lanjut, karbohidrat berperan dalam regulasi fungsi protein melalui proses glikosilasi. Modifikasi ini memengaruhi stabilitas protein, aktivitas biologis, transport intraseluler, dan interaksi antarmolekul. Oleh karena itu, perubahan pola glikosilasi sering dikaitkan dengan berbagai penyakit, termasuk kanker, diabetes melitus, dan penyakit inflamasi kronis (Varki et al., 2022).

Dengan demikian, karbohidrat tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi, tetapi juga berperan penting dalam penyimpanan energi, pembentukan struktur biologis, komunikasi antar sel, regulasi sistem imun, serta pengendalian berbagai proses fisiologis yang mendukung kehidupan organisme.

C. Penggolongan Karbohidrat

Karbohidrat merupakan kelompok biomolekul yang sangat beragam, baik dari segi struktur maupun fungsi biologisnya. Berdasarkan jumlah unit monosakarida yang menyusunnya, karbohidrat dapat dikelompokkan menjadi monosakarida, disakarida, oligosakarida, dan polisakarida. Penggolongan ini penting karena berkaitan dengan sifat fisik, karakteristik kimia, serta peran fisiologis masing-masing jenis karbohidrat dalam organisme hidup (Berg et al., 2019; Ferrier, 2021).

1. Monosakarida

Monosakarida adalah bentuk karbohidrat paling sederhana yang tidak dapat dihidrolisis

menjadi molekul karbohidrat yang lebih kecil. Secara kimia, monosakarida merupakan senyawa polihidroksi aldehida atau polihidroksi keton yang mengandung tiga hingga tujuh atom karbon. Berdasarkan gugus karbonilnya, monosakarida dibedakan menjadi aldosa dan ketosa, sedangkan berdasarkan jumlah atom karbonnya dibedakan menjadi triosa, tetrosa, pentosa, heksosa, dan heptosa (Berg et al., 2019).

Monosakarida memiliki peran penting sebagai sumber energi utama bagi sel. Glukosa merupakan monosakarida yang paling banyak digunakan dalam metabolisme energi melalui proses glikolisis dan respirasi seluler. Selain itu, monosakarida juga berfungsi sebagai prekursor dalam sintesis berbagai biomolekul penting, seperti asam nukleat, glikoprotein, glikolipid, dan polisakarida (Voet et al., 2019).

2. Disakarida

Disakarida adalah karbohidrat yang tersusun atas dua molekul monosakarida yang dihubungkan oleh ikatan glikosidik. Pembentukan ikatan ini terjadi melalui reaksi kondensasi yang menghasilkan pelepasan satu molekul air. Disakarida yang umum ditemukan dalam bahan pangan antara lain sukrosa, laktosa, dan maltosa. Sukrosa tersusun atas glukosa dan fruktosa, laktosa terdiri atas glukosa dan galaktosa, sedangkan maltosa tersusun atas dua molekul glukosa (Ferrier, 2021).

Fungsi utama disakarida adalah sebagai sumber energi. Dalam tubuh, disakarida harus dihidrolisis terlebih dahulu oleh enzim pencernaan menjadi monosakarida agar dapat diserap oleh usus dan dimanfaatkan dalam berbagai proses metabolisme. Oleh karena itu, disakarida berperan sebagai bentuk transpor dan penyimpanan energi jangka pendek dalam berbagai organisme (Berg et al., 2019).

3. Oligosakarida

Oligosakarida merupakan karbohidrat yang terdiri atas tiga hingga sekitar dua puluh unit monosakarida yang saling berikatan melalui ikatan glikosidik. Oligosakarida dapat ditemukan dalam bentuk bebas maupun terikat pada protein dan lipid membentuk glikoprotein serta glikolipid pada permukaan sel (Varki et al., 2022).

Berbeda dengan monosakarida dan disakarida yang terutama berfungsi sebagai sumber energi, oligosakarida memiliki peran yang lebih kompleks dalam sistem biologis. Oligosakarida berfungsi dalam pengenalan sel, komunikasi antarsel, adhesi sel, serta regulasi respons imun. Selain itu, beberapa oligosakarida seperti fruktooligosakarida (FOS) dan galaktooligosakarida (GOS) berfungsi sebagai prebiotik yang dapat merangsang pertumbuhan mikroorganisme menguntungkan di saluran pencernaan (Bode, 2012).

4. Polisakarida

Polisakarida merupakan polimer karbohidrat yang tersusun atas puluhan hingga ribuan unit monosakarida yang dihubungkan oleh ikatan glikosidik. Berdasarkan komposisi penyusunnya, polisakarida dibedakan menjadi homopolisakarida yang tersusun atas satu jenis monosakarida dan heteropolisakarida yang tersusun atas lebih dari satu jenis monosakarida (Voet et al., 2019).

Polisakarida memiliki berbagai fungsi biologis yang penting. Pati pada tumbuhan dan glikogen pada hewan berfungsi sebagai cadangan energi, sedangkan selulosa pada dinding sel tumbuhan dan kitin pada eksoskeleton arthropoda berfungsi sebagai komponen struktural. Selain itu, beberapa heteropolisakarida seperti asam hialuronat dan kondroitin sulfat berperan dalam pembentukan matriks ekstraseluler, pelumasan sendi, serta menjaga integritas jaringan ikat (Dumitriu, 2004; Varki et al., 2022).

Struktur polisakarida yang kompleks memungkinkan molekul ini tidak hanya berfungsi sebagai penyimpan energi dan komponen struktural, tetapi juga terlibat dalam berbagai proses biologis seperti perlindungan sel, pengaturan hidrasi jaringan, dan interaksi antarmolekul dalam sistem biologis (Voet et al., 2019).

D. Latihan Soal

1. Karbohidrat secara kimiawi didefinisikan sebagai
 - A. Senyawa yang hanya tersusun atas karbon dan hydrogen
 - B. Senyawa polihidroksi aldehida atau polihidroksi keton beserta turunannya
 - C. Senyawa yang hanya berfungsi sebagai sumber energi
 - D. Senyawa penyusun protein dan asam nukleat
 - E. Senyawa yang tidak mengandung oksigen
2. Berikut yang termasuk contoh monosakarida adalah
 - A. Sukrosa, maltosa, dan laktosa
 - B. Pati, glikogen, dan selulosa
 - C. Glukosa, fruktosa, dan galaktosa
 - D. Kitin, selulosa, dan glikogen
 - E. Sukrosa, glukosa, dan pati
3. Fungsi utama karbohidrat dalam tubuh adalah sebagai
 - A. Katalis reaksi kimia
 - B. Penyusun hormon steroid
 - C. Pengangkut oksigen
 - D. Sumber energi
 - E. Pembentuk antibody
4. Cadangan energi pada hewan terutama disimpan dalam bentuk
 - A. Selulosa
 - B. Kitin
 - C. Pati
 - D. Glikogen

- E. Sukrosa
- 5. Polisakarida yang berfungsi sebagai komponen utama dinding sel tumbuhan adalah
 - A. Glikogen
 - B. Selulosa
 - C. Pati
 - D. Maltose
 - E. Sukrosa
- 6. Disakarida yang tersusun atas glukosa dan fruktosa adalah
 - A. Maltose
 - B. Laktosa
 - C. Sukrosa
 - D. Selulosa
 - E. Kitin
- 7. Oligosakarida yang terikat pada protein dan lipid di permukaan sel berperan dalam
 - A. Sintesis ATP
 - B. Pengangkutan oksigen
 - C. Pengenalan dan komunikasi antarsel
 - D. Pembentukan asam amino
 - E. Produksi hormon steroid
- 8. Antigen golongan darah ABO ditentukan oleh perbedaan
 - A. Struktur protein plasma
 - B. Struktur asam amino hemoglobin
 - C. Struktur lipid membrane
 - D. Struktur oligosakarida pada permukaan eritrosit
 - E. Struktur DNA inti sel
- 9. Monosakarida berdasarkan gugus karbonilnya dibedakan menjadi

- A. Pentose dan heksosa
 - B. Triosa dan tetrosa
 - C. Homopolisakarida dan heteropolisakarida
 - D. α dan β anomer
 - E. aldose dan ketosa
10. Fruktooligosakarida (FOS) dan galaktooligosakarida (GOS) dikenal memiliki fungsi sebagai
- A. Hormon pertumbuhan
 - B. Prebiotik yang merangsang pertumbuhan mikroorganisme menguntungkan
 - C. Enzim pencernaan
 - D. Pigmen biologis
 - E. Cadangan energi utama hewan

BAB 4

PROTEIN DAN ASAM AMINO

A. Pendahuluan

1. Tujuan Pembelajaran

Mahasiswa akan mampu memahami gagasan mendasar tentang protein dan asam amino serta peran mereka dalam sistem biologis, termasuk susunan kimia, struktur, dan fungsi tubuh.

2. Capaian Pembelajaran

- a. Menjelaskan struktur dan klasifikasi asam amino.
- b. Menguraikan struktur, sifat, dan fungsi serta metabolisme protein dan asam amino.
- c. Mengidentifikasi pemeriksaan laboratorium yang berkaitan dengan protein.
- d. Menganalisis hubungan kelainan protein dengan penyakit klinis.

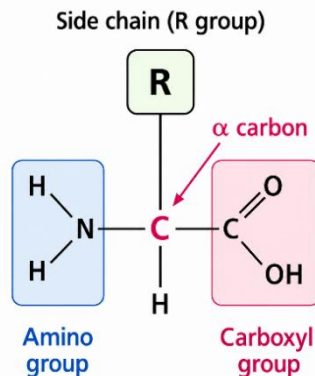
Protein adalah salah satu biomolekul utama dan penting bagi kehidupan. Protein merupakan polimer dengan rantai panjang dari sejumlah monomer-monomer asam amino yang berfungsi sebagai penyusun struktur sel, enzim, hormon, antibodi, serta pengatur berbagai proses metabolisme tubuh. di bidang Teknologi Laboratorium Medis (TLM) pengenalan protein dan asam amino sangat penting karena banyak pemeriksaan laboratorium klinik berhubungan dengan metabolisme protein seperti pemeriksaan

albumin, globulin, protein total, bahkan analisis enzim.

B. Asam Amino

1. Definisi Asam Amino

Senyawa organik yang mengintegrasikan gugus amina (-NH_2) dan gugus karboksil (-COOH) dalam strukturnya disebut sebagai asam amino. Peran utamanya adalah sebagai komponen pembangun protein, di mana setiap monomer dihubungkan oleh ikatan peptida. Formula atau struktur dasar dari asam amino ini dapat digambarkan melalui susunan berikut:



Gambar 4.1 Struktur Asam Amino

Struktur dasar asam amino terdiri atas atom karbon alfa (α) yang berikatan langsung dengan gugus fungsi amino (-NH_2) dan karboksil (-COOH). Perbedaan pada gugus R atau rantai samping yang terikat pada karbon alfa inilah yang memberikan karakteristik unik bagi masing-masing asam amino. Di alam, terdapat dua puluh jenis asam amino yang menyusun makromolekul protein, yang mana

klasifikasinya dibagi menjadi kelompok esensial dan non-esensial tergantung pada kemampuan tubuh organisme untuk mensintesisnya.

2. Klasifikasi Asam Amino

a. Berdasarkan Kebutuhan Tubuh

1) Asam amino esensial

Kelompok asam amino esensial merupakan jenis asam amino yang tidak mampu diproduksi oleh metabolisme tubuh secara internal. Oleh karena itu, pemenuhannya sangat bergantung pada asupan nutrisi dari makanan atau minuman yang kita konsumsi. Beberapa contoh asam amino esensial yang penting bagi tubuh adalah fenilalanin, lisin, isoleusin, leusin, metionin, treonin, valin, dan triptofan.

2) Asam Amino Non-esensial

Kebalikan dari kelompok esensial, asam amino non-esensial merupakan jenis asam amino yang dapat disintesis secara mandiri oleh metabolisme tubuh, sehingga tidak mutlak harus didapatkan dari sumber eksternal. Senyawa-senyawa ini memiliki karakteristik umum berupa kelarutan yang tinggi di dalam air. Beberapa contoh asam amino yang masuk dalam kategori non-esensial ini meliputi: Alanin, asparagin, glisin dan asam glutamat

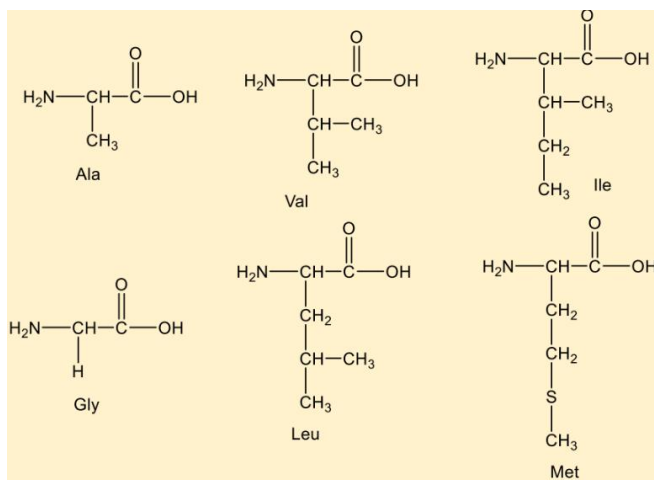
b. Berdasarkan Sifat Gugus R

Asam amino diklasifikasikan tergantung pada sifat gugus R (rantai sampingnya), karena gugus R menentukan sifat kimia dan fisika asam amino, kelarutan, polaritas dalam air, reaktivitas kimia, dan fungsi biologis. Sifat gugus R juga berperan penting dalam menentukan struktur tersier protein dan interaksi mereka secara umum dengan molekul lain.

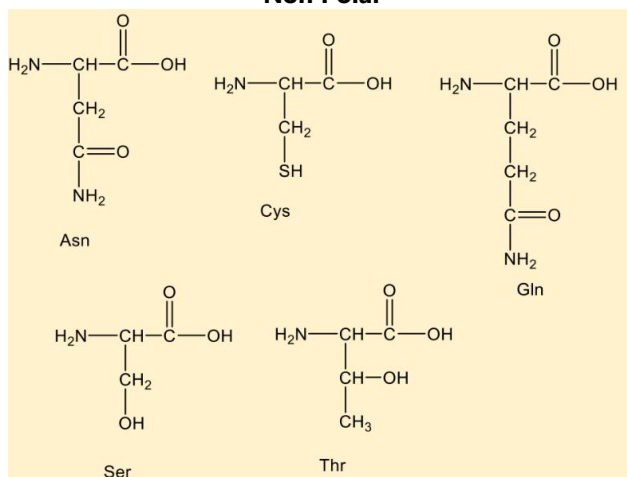
Berdasarkan klasifikasi tersebut, asam amino dibagi menjadi 4 kelompok utama berdasarkan sifat rantai sampingnya (gugus R): asam amino polar, non polar, asam amino bermuatan negatif (asam), dan bermuatan positif (basa). Kelompok-kelompok ini dapat dijelaskan dalam Tabel dari keempat kategori tersebut.

Tabel 4.1 Kelompok Asam Amino Berdasarkan Karakteristik Rantai Samping (Gugus R)

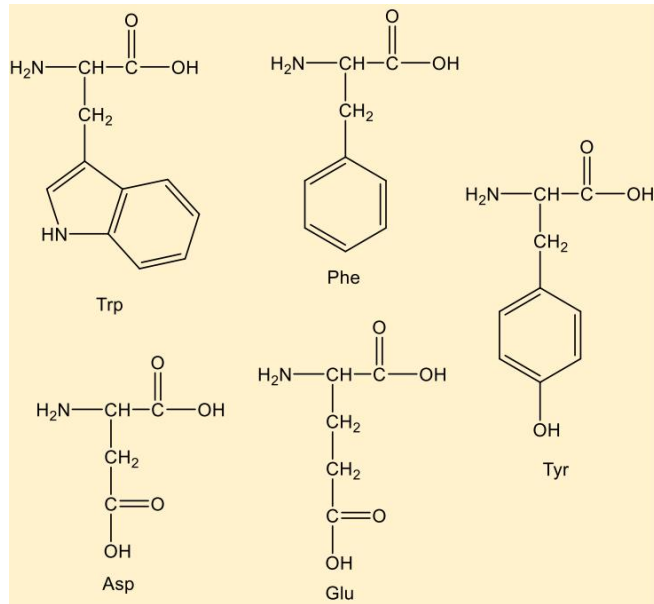
Kelompok Asam Amino	Sifat	Contoh
Nonpolar	Hidrofobik	Alanin, Valin, Leusin, Isoluesin, Glisin, Leusin, Metionin.
Polar	Hidrofilik	Serin, Treonin, Asparagin, Glutamin, Sistein
Bermuatan negatif	Asam	Asam Asparpat, Asam Glutamate, fenilalanin, Tirosin, Tryptofan.
Bermuatan positif	Basa	Arginin, Histidin, Lisin, Prolin



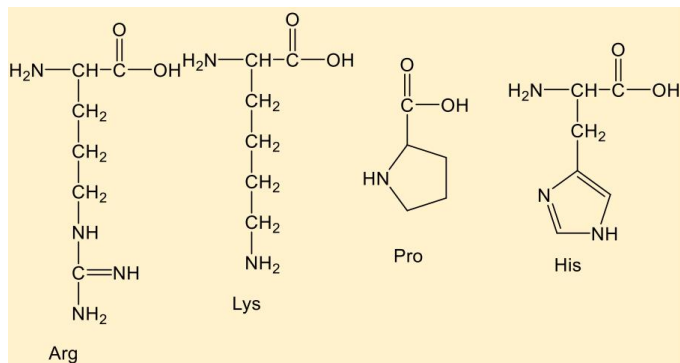
Gambar 4.2 Struktur Asam Amino Berdasarkan Sifat Non Polar



Gambar 43 Struktur Asam Amino Berdasarkan Sifat Polar



Gambar 4.4 Struktur Asam Amino Bersifat Asam



Gambar 4.5 Struktur Asam Amino Bersifat Basa

C. Protein

1. Definisi Protein

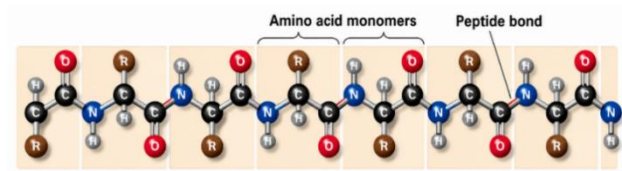
Sebagai makromolekul yang mengandung unsur nitrogen (N), protein memegang peranan krusial dalam menopang berbagai fungsi fisiologis yang mendukung

kehidupan. Struktur molekul protein tersusun atas rangkaian asam amino yang saling bertautan melalui ikatan peptida. Berdasarkan panjang rantainya, polimer ini dibedakan menjadi dipeptida (dua asam amino), oligopeptida (tiga hingga sepuluh asam amino), dan polipeptida (lebih dari sepuluh asam amino). Keberagaman bentuk protein di alam sangat dipengaruhi oleh jumlah serta sebaran asam amino penyusunnya. Secara umum, komposisi massa elemental protein terdiri atas 50–55% karbon (C), 20–23% oksigen (O), 12–19% nitrogen (N), 6–7% hidrogen (H), dan 0,2–0,3% sulfur (S).

2. Struktur Protein

a. Struktur Primer

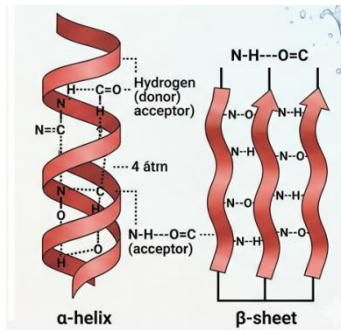
Struktur primer merupakan susunan linier asam amino penyusun rantai utama protein yang dihubungkan oleh ikatan peptida berdasarkan kode genetik dari DNA. Ikatan antar-asam amino ini terbentuk melalui reaksi kondensasi yang mempertemukan gugus karboksil dan gugus amino dari dua molekul asam amino yang bersebelahan. Rangkaian polipeptida ini nantinya akan melipat menjadi protein fungsional. Pada fase akhir, urutan asam amino primer inilah yang menjadi faktor penentu utama bagi bentuk tiga dimensi (folding) sekaligus fungsi spesifik dari protein tersebut.



Gambar 4.6 Struktur Primer

b. Struktur Sekunder

Struktur sekunder protein dapat terbentuk karena adanya interaksi berupa ikatan hidrogen sepanjang tulang punggung peptida, tepatnya antara hidrogen pada gugus amina dengan oksigen pada gugus karbonil. Di dalam makromolekul protein, struktur sekunder ini umumnya mengekspresikan diri dalam dua geometri utama, yakni bentuk α -heliks dan β -sheets.

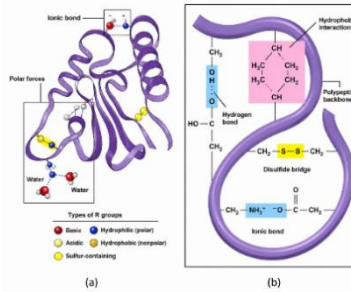


Gambar 4.7 Struktur Sekunder

c. Struktur Tersier

Di tingkat tersier, protein melipat sedemikian rupa membentuk satu rangkaian polipeptida tunggal yang di dalamnya memuat modifikasi dari beraneka bentuk struktur sekunder. Terjadinya pelipatan menjadi struktur tersier ini didorong oleh beberapa jenis ikatan spesifik

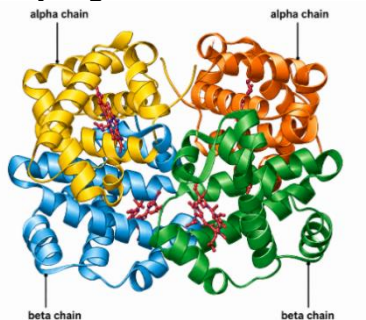
antar-rantai samping asam amino. Ikatan-ikatan tersebut di antaranya adalah jembatan disulfida, interaksi hidrofobik, ikatan ionik, serta ikatan hidrogen.



Gambar 8. (a) Struktur Tersier, (b) Ikatan Yang Membentuk Stuktur Tersier

d. Struktur Kuartener

Dua atau lebih rantai polipeptida yang memiliki struktur tersier yang membentuk multisubunit membentuk struktur kuartener. Protein subunit dapat terdiri dari subunit yang berbeda atau rantai polipeptida yang sama.



Gambar 4.9 Struktur Kuartener

3. Fungsi Protein

- Struktural: sebagai penyusun utama jaringan seperti otot dan kulit, serta beberapa struktur lain seperti rambut

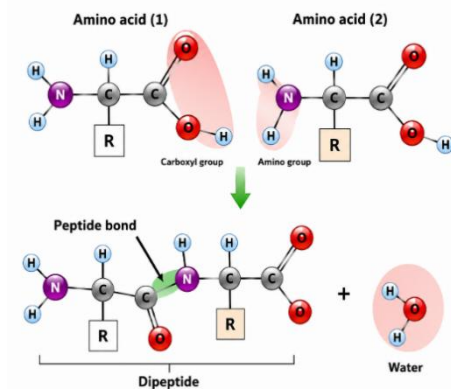
(kolagen) yang memberikan dukungan, dan kuku di mana keratin merupakan polimer utama.

- b. Fungsi Transportasi: menyediakan media dan sederhana, sebagai pengangkut bahan dari satu organ ke organ lainnya, seperti menampung albumin sebagai pengangkut nutrisi (seng, kalsium, vitamin B6), hemoglobin yang tidak efektif dalam mentransfer gas oksigen bersama zat besi.
 - c. Protein memiliki peran pengaturan dalam proses biokimia tubuh, termasuk yang melibatkan enzim. Tubuh menggunakan enzim untuk pencernaan, metabolisme, energi sisa, konversi nutrisi menjadi bahan bakar, dan perkembangan otot dan jaringan.
 - d. Hormon termasuk insulin, glikogen, dan hormon antidiuretik (ADH) berfungsi sebagai pembawa pesan dan informasi antar sel.
4. Klasifikasi Protein berdasarkan jenis konformasinya
- a. Protein Fibrous berupa rantai polimer panjang yang disusun sejajar atau hampir sejajar satu sama lain untuk menghasilkan serat atau lembaran panjang. Susunan ini tidak larut dalam air. Protein fibrous ini komponen dasar jaringan struktural seperti tendon, kolagen, rambut, kuku, kulit dan bulu
 - b. Protein Globular adalah rantai polimer protein yang melipat seperti bola. Protein

globular larut dalam air dan relative bergerak di dalam sel. Contohnya adalah hemoglobin, hormon, enzim tripsin, dan albumin

5. Ikatan Peptida

Secara kimiawi, ikatan peptida diklasifikasikan sebagai ikatan amida kovalen yang dihasilkan dari reaksi antara gugus fungsi karboksil milik suatu asam amino dengan gugus amina dari asam amino berikutnya. Pembentukan ikatan ini melalui reaksi kondensasi (pelepasan H_2O) dan merupakan ikatan utama dalam menghubungkan asam amino membentuk suatu protein.



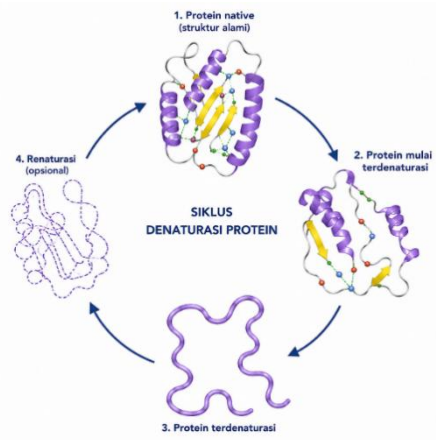
Gambar 4.10 Pembentukan Ikatan Peptida

D. Denaturasi Protein

Denaturasi protein adalah perubahan struktural yang mengakibatkan hilangnya fungsi biologis protein tersebut. Pemulihan fungsi biologis menjadi protein atau asam nukleat dalam keadaan denaturasi disebut sebagai renaturasi. Denaturasi protein dapat disebabkan oleh panas, pH ekstrem,

penambahan garam/bahan kimia, dan agitasi mekanis.

Dampak dari denaturasi protein meliputi rusaknya ikatan hidrogen, interaksi hidrofobik terganggu dan yang utama hilangnya fungsi dari protein tersebut.



Gambar 4.11 Proses Denaturasi dan Renaturasi Protein

E. Aplikasi Klinik yang Menerapkan Konsep denaturasi Protein

1. Kerusakan Enzim

Denaturasi protein mengakibatkan perubahan struktur tiga dimensi enzim sehingga menjadikan sisi aktif enzim rusak dan tidak dapat bekerja secara optimal. Dalam bidang klinik kerusakan enzim ini mengganggu proses metabolisme tubuh. Contohnya kerusakan enzim pada hati

2. Sebagai indikator penyakit (Diagnostik)

Perubahan struktur pada protein sering digunakan sebagai indikator adanya penyakit

tertentu yang dibuktikan dari hasil pemeriksaan laboratorium.

Contohnya : Kerusakan organ ginjal dideteksi adanya jumlah protein pada urin (proteinuria)

3. Analisis Laboratorium

Pada Laboratorium klinik, konsep denaturasi protein banyak diaplikasikan untuk pemisahan, identifikasi dan analisis biomolekul. Proses denaturasi pada protein dapat membantu membuka struktur protein sehingga proses analisis lebih mudah.

Contohnya: Pemeriksaan SDS-Page, PCR

F. Rangkuman

Sebagai makromolekul esensial dalam sistem biologi, protein dan unit penyusunnya, yaitu asam amino, memegang peranan krusial dalam menjaga keberlangsungan fungsi fisiologis tubuh. Asam amino sendiri merupakan molekul organik yang secara struktural diidentifikasi melalui keberadaan gugus fungsi amino dan karboksil. Melalui perantaraan ikatan peptida, monomer-monomer asam amino ini saling bertautan membentuk rantai polimer yang kemudian melipat ke dalam empat tingkatan konformasi, meliputi struktur primer, sekunder, tersier, hingga kuartener. Di dalam organisme hidup, protein memanifestasikan fungsinya secara luas, mulai dari elemen struktural jaringan, molekul pengangkut (carrier), biokatalis (enzim), pembawa pesan kimiawi (hormon), hingga pengontrol jalur metabolisme. Protein juga dapat

mengalami perubahan struktural yang menyebabkan hilangnya fungsi biologis (denaturasi). Konsep denaturasi protein dapat diterapkan dalam bidang klinik dan laboratorium seperti SDS-page dan PCR.

G. Latihan Soal

1. Asam amino tersusun dari gugus ...
 - A. Fosfat dan hidroksi
 - B. Karbonil dan aldehyd
 - C. Amino dan karboksil
 - D. Ester dan alkohol
 - E. Amina dan ester
2. Dibawah ini yang termasuk asam amino esensial adalah...
 - A. Glisin
 - B. Valin
 - C. Alanin
 - D. Asparagin
 - E. Asam Glutamate
3. Asam amino yang bersifat hidrofobik termasuk pada kelompok...
 - A. Polar
 - B. Asam
 - C. Basa
 - D. Non Polar
 - E. Larut
4. Ikatan yang terbentuk antar asama amino satu dengan lainnya disebut ...
 - A. Ikatan non kovalen
 - B. Ikatan hidrogen
 - C. Ikatan peptida

- D. Ikatan kovalon
- E. Ikatan
- 5. Stuktur protein yang berbentuk linier asam amino disebut struktur...
 - A. Kompleks
 - B. Kuarterner
 - C. Tersier
 - D. Sekunder
 - E. Primer
- 6. Struktur utama sekunder pada protein meliputi
 - A. α -heliks dan β -heliks
 - B. β -heliks dan β -sheet
 - C. β -strands dan β -sheet
 - D. α -heliks
 - E. β -strands dan α -heliks
- 7. Berikut faktor yang mempengaruhi denaturasi protein...
 - A. Asam dan basa
 - B. Tekanan ekstream
 - C. Kerusakan enzim
 - D. Penambahan vitamin
 - E. Panas dan pH ekstream
- 8. Protein yang berbentuk globular dan larut dalam air disebut ...
 - A. Albumin
 - B. Kolagen
 - C. Keratin
 - D. Elastin
 - E. Vitamin
- 9. Pada pemeriksaan labortaorium yang mengaplikasikan denaturasi protein contohnya ...

- A. Pemeriksaan golongan darah
 - B. Pemeriksaan urin
 - C. Hitung eritrosit
 - D. SDS-Page
 - E. Hitung trombosit
10. Proteinuria (adanya protein dalam urin) dapat menjadi indikator kerusakan pada organ...
- A. Ginjal
 - B. Jantung
 - C. Pankreas
 - D. Lambung
 - E. Paru-paru

BAB 5

ENZIM

A. Pendahuluan

1. Tujuan Pembelajaran

Setelah mengikuti pembelajaran, mahasiswa diharapkan mampu:

- a. Menjelaskan konsep dasar enzim sebagai katalis biologis dalam kajian Biokimia
- b. Menjelaskan mekanisme kerja enzim dalam reaksi biokimia
- c. Menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi aktivitas enzim
- d. Menginterpretasikan hubungan antara enzim dan proses metabolisme dalam sel

2. Capaian pembelajaran

Setelah mengikuti pembelajaran pada topik tersebut, mahasiswa diharapkan mampu:

- a. Menguraikan mekanisme kerja enzim (lock and key & induced)
- b. Menganalisis pengaruh suhu, pH, dan inhibitor terhadap aktivitas enzim
- c. Menghubungkan peran enzim dengan jalur metabolisme

B. Mekanisme Kerja Enzim

Enzim merupakan polimer biologis sebagai katalis dalam reaksi kimia yang terjadi dalam proses biokimia. Reaksi berlangsung di dalam sel maupun di luar sel guna mengubah *nutrient*, dengan begitu akan dapat menyediakan energi dan

chemical building blocks (Juniarti, 2023). Tanpa katalisis enzimatik, sebagian besar reaksi biokimia sangat lambat sehingga tidak akan terjadi dalam kondisi suhu dan tekanan ringan yang sesuai dengan kehidupan. Enzim mempercepat laju reaksi tersebut hingga lebih dari satu juta kali lipat (Geoffrey M Cooper, 2018).

Enzim bekerja dengan berikatan dengan molekul substrat dan membentuk senyawa intermediat selama berlangsungnya reaksi kimia organik. Adanya enzim membuat energi aktivasi yang diperlukan menjadi lebih rendah, sehingga reaksi dapat terjadi lebih cepat. Hal ini karena reaksi dengan energi aktivasi yang tinggi umumnya memerlukan waktu lebih lama untuk berlangsung. Meskipun pada tahap awal katalis dapat mengalami perubahan, pada akhir reaksi molekul katalis akan kembali ke bentuk semula. (Sumbono, 2021).

Mekanisme kerja enzim memiliki sifat yang sangat khusus. Dengan kata lain, setiap enzim hanya akan bekerja pada jenis senyawa atau reaksi kimia tertentu saja. Kekhususan ini tidak hanya berkaitan dengan reaksi yang dikatalisis, tetapi juga dengan substrat yang terlibat. Hal tersebut terjadi karena setiap enzim memiliki struktur kimia yang berbeda dan bersifat tetap. Proses katalisis oleh enzim diawali ketika enzim dan substrat membentuk kompleks enzim-substrat yang berada pada keadaan transisi. Pada tahap ini, molekul substrat berikatan dengan bagian tertentu dari enzim yang dikenal sebagai sisi aktif (*active site*),

yaitu area tempat reaksi berlangsung (Wahyuni, 2017).

Pengikatan substrat ke sisi aktif enzim merupakan interaksi yang sangat spesifik. Sisi aktif adalah celah atau alur pada permukaan enzim, biasanya terdiri dari asam amino dari berbagai bagian rantai polipeptida yang disatukan dalam struktur tersier protein. Substrat awalnya berikatan dengan sisi aktif melalui interaksi nonkovalen. Setelah substrat terikat pada sisi aktif enzim, berbagai mekanisme dapat mempercepat konversinya menjadi produk reaksi. Aktivitas katalitik enzim (E) melibatkan pengikatan substrat (S) untuk membentuk kompleks Enzim-Substrat (ES). Saat terikat pada sisi aktif enzim, substrat diubah menjadi produk reaksi, yang kemudian dilepaskan dari enzim. Reaksi yang dikatalisis enzim dapat ditulis sebagai berikut:



Pengaruh enzim pada reaksi menyebabkan perubahan energi yang harus terjadi selama konversi S menjadi P. Enzim bekerja dengan mengurangi energi aktivasi, sehingga meningkatkan laju reaksi (Cooper, G.M & Adam, K.W. 2000).

Adanya enzim akan sangat meningkatkan reaksi. Peningkatan kecepatan reaksi ini sangat besar sampai mencapai 10¹² kali kecepatan reaksi tanpa adanya enzim. Sebagai contoh, Fosforilasi glukosa oleh enzim Heksokinase 10¹⁰ kali lebih cepat jika dibandingkan dengan keadaan tanpa enzim, oksidasi alkohol oleh enzim alkohol

dehydrogenase berlangsung 2.108 kali lebih cepat dibandingkan dengan keadaan tanpa enzim. Semuanya dalam derajat keasaman dan suhu yang sama dengan yang terdapat didalam tubuh (Sadikin. M, 2012).

Enzim bekerja dengan cara berikatan pada permukaan molekul yang akan bereaksi, sehingga reaksi dapat berlangsung lebih cepat. Hal ini terjadi karena enzim membantu menurunkan energi aktivasi yang dibutuhkan dalam reaksi, sehingga proses reaksi menjadi lebih mudah untuk berlangsung (Nurdiana, 2022). Sebagian besar reaksi biokimia melibatkan interaksi antara dua atau lebih substrat yang berbeda. Misalnya, pembentukan melibatkan penggabungan dua asam amino

Antaraksi antara enzim dengan substrat dapat dijelaskan melalui analogi berikut:

1. *Lock and Key*

Model lubang dan Anak Kunci atau model cetakan (*template*) yang kaku oleh Emil Fischer masih digunakan untuk memahami beberapa sifat enzim, misalnya pengikatan dua atau lebih substrat secara berurutan (Robert K Murray, Daryl K Granner. Petter A Mayes, 1999).

2. *Penyesuaian Terinduksi (Induced Fit)*

Proses dimana konfigurasi enzim dan substrat dimodifikasi oleh pengikatan substrat. Hal ini ditujukan untuk meningkatkan kecocokan dengan substrat dan membuat ikatan antara enzim dan substrat menjadi lebih reaktif (Nurdiana, 2022). Konformasi substrat

diubah sehingga lebih menyerupai konformasi keadaan transisi. Keadaan transisi distabilkan oleh pengikatan yang kuat ke enzim, sehingga menurunkan energi aktivasi yang dibutuhkan. Pengikatan substrat menginduksi penyesuaian pada enzim sehingga meningkatkan kecocokan antara keduanya dan mendorong molekul kompleks enzim-enzim substrat ada dalam kondisi yang lebih reaktif. Dalam model penyesuaian terinduksi, pengikatan substrat mendistorsi konformasi substrat dan enzim (Cooper, G.M. Adam, K.W, 2000).

C. Faktor yang Mempengaruhi Aktivitas Enzim

Terdapat beberapa faktor yang memengaruhi kerja enzim. Faktor-faktor tersebut umumnya berkaitan dengan sifat enzim yang tersusun atas protein, sehingga aktivitasnya cukup peka terhadap perubahan kondisi tertentu.

1. Suhu

Aktivitas enzim meningkat seiring dengan kenaikan suhu. Laju reaksi hanya meningkat sampai suhu tertentu, yang dikenal sebagai suhu optimum. Pada suhu ini, aktivitas enzim mencapai tingkat tertinggi. Apabila suhu terus dinaikkan melewati titik optimum, struktur enzim mulai rusak (*denaturasi*), sehingga kemampuan enzim untuk mengikat substrat dan mengkatalisis reaksi menurun secara drastis. Akibatnya, laju reaksi akan menurun tajam. Selain itu, dalam penyimpanan jangka panjang,

enzim biasanya disimpan pada suhu sekitar 5°C atau lebih rendah agar aktivitasnya tetap terjaga.

Beberapa enzim dapat kehilangan aktivitasnya ketika dibekukan, sehingga kondisi penyimpanannya perlu disesuaikan dengan karakteristik masing-masing enzim. Pada suhu yang berada di bawah suhu optimal, misalnya sekitar 0°C, aktivitas enzim umumnya menurun atau bahkan menjadi tidak aktif. Pada manusia, enzim bekerja paling baik pada kisaran suhu 35-40°C karena mendekati suhu normal tubuh. Berbeda dengan itu, bakteri yang hidup di lingkungan bersuhu tinggi, seperti sumber air panas, memiliki enzim yang mampu bekerja optimal pada suhu sekitar 70°C (Jonesti, 2026).

2. Derajat keasaman (pH)

Enzim bereaksi pada tingkat pH tertentu yang dinamakan dengan pH Optimum. Setiap enzim memiliki pH optimum, yaitu kondisi pH Ketika reaksi yang dikatalisis berlangsung paling cepat. Perubahan kecil dari pH optimum dapat menurunkan aktivitas enzim karena memengaruhi ionisasi gugup pada sisi aktif enzim. Perbedaan pH optimum terjadi karena setiap enzim bekerja pada lingkungan yang berbeda. Misalnya, enzim pepsin pada system pencernaan mampu bekerja dalam kondisi sangat aman di lambung, yaitu sekitar pH 2,0 (Wahyuni S, 2017).

3. Konsentrasi Enzim

Kecepatan reaksi yang menggunakan enzim akan juga akan bergantung pada

konsentrasi enzim tersebut. Pada jumlah substrat tertentu, semakin tinggi konsentrasi enzim maka akan semakin cepat pula reaksi berlangsung dan semakin banyak produk yang terbentuk. Namun, setelah beberapa waktu jumlah substrat akan berkurang sehingga pembentukan produk oleh enzim ikut menurun dan tidak lagi meningkat secara sebanding (Mohammad S, 2012).

4. Konsentrasi Substrat

Jika konsentrasi enzim tetap, penambahan substrat dapat meningkatkan kecepatan reaksi sampai batas tertentu. Setelah semua aktif enzim terisi oleh substrat, enzim menjadi jenuh sehingga penambahan substrat tidak lagi meningkatkan laju reaksi (Nurkhozin, 2017).

5. Pengaruh Inhibitor

Pengaruh inhibitor dapat menyebabkan terhambatnya reaksi yang melibatkan enzim sebagai katalis. Hambatan ini muncul ketika proses pengikatan substrat pada enzim terganggu, sehingga reaksi tidak dapat berlangsung secara optimal. Zat atau ion yang menyebabkan gangguan tersebut disebut inhibitor. Inhibitor dapat berasal dari berbagai senyawa, termasuk zat asing seperti obat-obatan maupun racun. Dalam kondisi tertentu efeknya dapat dimanfaatkan untuk tujuan terapi, tetapi pada kondisi lain juga dapat menimbulkan dampak berbahaya bahkan mematikan. Berdasarkan sifat kerjanya, inhibisi

enzim dibagi menjadi dua jenis, yaitu irreversible dan reversible. Inhibisi irreversible menyebabkan perubahan permanen pada enzim target, sedangkan inhibisi reversible tidak menimbulkan perubahan tetap. Inhibisi reversible masih dapat dibagi menjadi kompetitif dan nonkompetitif (Wahyuni, S, 2017).

D. Peran Enzim Dalam Mempercepat Reaksi Biokimia di Dalam Sel

Keberadaan enzim memungkinkan proses-proses seperti pencernaan, sintesis biomolekul, dan produksi energi berlangsung secara cepat dan efisien dalam kondisi normal tubuh. Dengan adanya enzim, reaksi yang semula membutuhkan waktu lama dapat berlangsung dalam hitungan detik bahkan milidetik. Keberadaan enzim sangat penting bagi kelangsungan metabolisme sel dan kehidupan organisme (Wahyudiati, 2017).

Sebagai biokatalisator, enzim berperan dalam hampir seluruh aktivitas sel karena terlibat dalam berbagai reaksi biokimia di dalam tubuh. Salah satu peran utama enzim adalah mempercepat berlangsungnya reaksi biokimia melalui beberapa mekanisme berikut:

1. Menurunkan energi aktivasi

Setiap reaksi kimia memerlukan sejumlah energi awal yang dikenal sebagai energi aktivasi. Enzim membantu mempercepat reaksi dengan menurunkan kebutuhan energi tersebut, sehingga reaksi lebih mudah berlangsung. Proses ini terjadi melalui stabilisasi transition

state pada kompleks enzim-substrat. Secara umum, mekanisme katalitik enzim meliputi beberapa cara, yaitu a) *proximity and orientation*, b) *electrostatic effects*, c) *acid-base catalysis*, serta d) *covalent catalysis* (Ferdinal, 2005).

2. Mengatur proses metabolisme

Enzim memiliki peran penting dalam mengatur berbagai reaksi kimia yang berlangsung di dalam sistem biologis atau yang dikenal sebagai proses metabolisme. Metabolisme mencakup proses penyusunan, penguraian, hingga perubahan biomolekul yang dibutuhkan sel untuk tumbuh dan menjalankan fungsinya. Beberapa jenis enzim, seperti protease, lipase, dan nuclease, berfungsi memecah protein menjadi asam amino, lipid menjadi asam lemak dan gliserol, serta asam nukleat menjadi nukleotida. Melalui proses tersebut, zat-zat hasil pemecahan dapat dimanfaatkan kembali secara lebih efisien dalam mendukung aktivitas metabolisme maupun pembentukan biomolekul baru (Fanani, SN, 2025).

3. Membantu Proses pencernaan

Pada proses pencernaan, makanan diubah dari bentuk kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana dengan melibatkan berbagai organ tubuh dan enzim pencernaan untuk dimetabolisme. Proses ini melibatkan tahap mekanik dan tahap kimiawi oleh enzim. Contohnya Amilase mengubah pati menjadi

maltose, Pepsin memecah protein menjadi peptide dan Lipase memecah lemak menjadi asam lemak dan gliserol (Widawati, 2026)

4. Berperan dalam Produksi Energi.

Enzim memiliki peran penting dalam proses pembentukan energi di dalam sel. Pada respirasi seluler, energi yang tersimpan dalam molekul glukosa akan diubah menjadi ATP, yaitu bentuk energi yang dapat langsung digunakan oleh sel untuk menjalankan berbagai aktivitas. Proses respirasi seluler berlangsung melalui tiga tahapan utama, yakni glikolisis, siklus Krebs, dan rantai transpor elektron. Dalam tahap glikolisis, beberapa enzim seperti heksokinase dan fosfofruktokinase berperan membantu proses awal pemecahan glukosa menjadi senyawa antara yang nantinya akan diproses lebih lanjut untuk menghasilkan energi. Di mitokondria, siklus Krebs melibatkan enzim seperti suksinat dehidrogenase untuk menghasilkan NADH dan FADH₂ sebagai pembawa electron. Selanjutnya pada rantai transport electron, enzim sitokrom oksidase berperan dalam pemindahan electron yang menghasilkan energi untuk pembentukan ATP. Seluruh tahapan tersebut dikendalikan oleh aktivitas enzim agar produksi energi berlangsung optimal (Wisnuwati, 2019).

5. Membangun Biomolekul penting

Enzim berperan dalam proses pembentukan maupun penguraian berbagai biomolekul penting, seperti protein, lipid, dan

asam nukleat. Molekul-molekul berukuran besar tersebut perlu dipecah menjadi komponen yang lebih sederhana agar dapat digunakan kembali dalam proses pertumbuhan dan perbaikan sel. Enzim protease berfungsi menguraikan protein menjadi asam amino yang selanjutnya dimanfaatkan untuk menyusun protein baru. Sementara itu, enzim lipase memecah lipid menjadi asam lemak dan gliserol, sedangkan enzim nuclease menguraikan asam nukleat menjadi nukleotida (Fanani, SN, 2025).

E. Latihan Soal

1. Molekul yang bekerja pada enzim disebut ...
 - A. Produk
 - B. Substrat
 - C. Inhibitor
 - D. Kofaktor
 - E. Koenzim
2. Kompleks enzim-substrat terbentuk ketika ...
 - A. Produk meninggalkan enzim
 - B. Substrat berikatan dengan situs aktif enzim
 - C. Enzim mengalami denaturasi
 - D. Koenzim dilepaskan
 - E. Energi aktivasi meningkat
3. Peran enzim dalam reaksi biokimia adalah ...
 - A. Menurunkan energi aktivasi
 - B. Meningkatkan energi aktivasi
 - C. Menghentikan reaksi metabolisme
 - D. Mengurangi jumlah substrat secara permanen
 - E. Mengubah produk menjadi energi

4. pH optimum enzim adalah kondisi ketika ...
 - A. Enzim berhenti bekerja
 - B. Produk tidak terbentuk
 - C. Aktivitas enzim mencapai maksimum
 - D. Energi aktivasi meningkat
 - E. Substrat habis seluruhnya
5. Jika konsentrasi substrat meningkat terus sementara jumlah enzim tetap, maka laju reaksi akan ...
 - A. Menurun menjadi nol
 - B. Tetap meningkat tanpa batas
 - C. Stabil setelah semua sisi aktif jenuh
 - D. Menghasilkan inhibitor
 - E. Mengubah enzim menjadi produk
6. Pada model induced fit, sisi aktif enzim ...
 - A. Tidak mengalami perubahan bentuk
 - B. Menyesuaikan bentuk dengan substrat
 - C. Selalu lebih kecil dari substrat
 - D. Berubah menjadi produk
 - E. Tidak berikatan dengan substrat
7. Salah satu faktor yang memengaruhi aktivitas enzim adalah ...
 - A. Alkohol
 - B. Koenzim
 - C. Garam
 - D. Kofaktor
 - E. Suhu
8. Aktivitas enzim dapat menurun pada suhu tinggi karena ...
 - A. Enzim kehilangan energi
 - B. Substrat berubah menjadi inhibitor
 - C. Struktur enzim mengalami kerusakan

- D. Produk tidak terbentuk
 - E. Konsentrasi enzim meningkat
9. Model "lock and key" menjelaskan bahwa ...
- A. Enzim dapat berubah bentuk bebas
 - B. Semua substrat cocok dengan semua enzim
 - C. Enzim menyesuaikan dengan bentuk substrat
 - D. Produk mengubah bentuk enzim
 - E. Substrat sesuai dengan bentuk sisi aktif enzim
10. Hasil akhir dari reaksi enzimatik disebut ...
- A. Substrat
 - B. Kofaktor
 - C. Koenzim
 - D. Apoenzim
 - E. Produk

BAB 6

STRUKTUR DAN FUNGSI ASAM NUKLEAT

A. Pendahuluan

1. Tujuan Pembelajaran

Mahasiswa mampu memahami struktur, komponen, serta fungsi asam nukleat, menjelaskan metabolisme purin dan pirimidin, serta mengidentifikasi gangguan yang berkaitan dengan metabolisme asam nukleat pada makhluk hidup.

2. Capaian Pembelajaran

Setelah mengikuti pembelajaran pada topik ini diharapkan mahasiswa mampu:

- a. Memahami struktur, fungsi, dan peranan asam nukleat dalam sistem biologis.
- b. Menjelaskan proses metabolisme purin dan pirimidin dalam tubuh.
- c. Mendeskripsikan proses biosintesis, jalur penyelamatan, dan katabolisme nukleotida.
- d. Menganalisis mekanisme kerja obat yang berkaitan dengan metabolisme asam nukleat.
- e. Mengidentifikasi berbagai gangguan metabolisme purin dan pirimidin serta kaitannya dengan kondisi klinis.

B. Peran Biomedis

Meskipun manusia mengonsumsi makanan yang kaya akan nukleoprotein, purin, dan pirimidin, senyawa-senyawa tersebut tidak serta merta digunakan untuk membentuk asam nukleat dalam tubuh. Tubuh manusia dapat mensintesis asam nukleat, ATP, NAD⁺, koenzim A, dan berbagai senyawa penting lainnya melalui zat antara amfibolik. Namun, beberapa analog purin atau pirimidin, termasuk sejumlah obat antikanker, dapat disisipkan ke dalam DNA melalui proses injeksi. Proses biosintesis ribonukleotida purin dan trifosfat pirimidin (NTP) serta trifosfat deoksiribonukleotida (dNTP) berlangsung dengan sangat teratur. Mekanisme umpan balik berfungsi untuk memastikan bahwa sintesis molekul-molekul tersebut terjadi dalam jumlah dan waktu yang sesuai dengan kebutuhan fisiologis tubuh, seperti saat proses pembelahan sel. Gangguan dalam metabolisme purin dapat menyebabkan berbagai penyakit pada manusia, antara lain gout, sindrom Lesch–Nyhan, defisiensi adenosin deaminase, dan defisiensi purin nukleosida fosforilase. **Purin & Pirimidin Tidak Esensial Secara Dietetik**

Jaringan tubuh manusia yang normal memiliki kemampuan untuk memproduksi purin dan pirimidin dari senyawa amfibolik sesuai dengan kebutuhan fisiologis yang bervariasi. Oleh karena itu, asam nukleat dan nukleotida yang diperoleh dari makanan tidak dianggap sebagai zat esensial dalam pola makan. Setelah melalui proses pencernaan dalam saluran pencernaan, mononukleotida akan

diserap atau diuraikan menjadi basa purin dan pirimidin. Basa purin kemudian dioksidasi menjadi asam urat yang bisa diserap kembali atau dikeluarkan melalui urin.

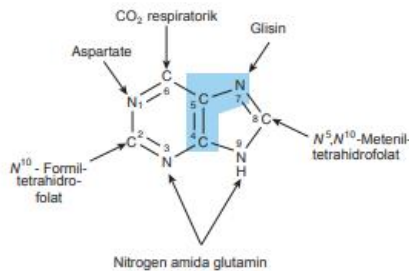
C. Biosintesis Nukleotida Purin

Hampir semua organisme hidup, kecuali beberapa protozoa parasit tertentu, dapat melakukan sintesis nukleotida purin dan pirimidin. Proses pembentukan senyawa ini dari senyawa amfibolik berlangsung dengan kecepatan yang sangat teratur untuk memenuhi tuntutan fungsi sel. Untuk menjaga stabilitas internal, sel-sel memiliki mekanisme pengaturan di dalamnya yang mampu mendeteksi dan mengendalikan jumlah nukleotida trifosfat (NTP) di dalam sel, terutama selama fase pertumbuhan atau regenerasi jaringan ketika pembelahan sel terjadi dengan cepat. Dengan demikian, sintesis nukleotida purin dan pirimidin *in vivo* dilakukan sesuai dengan kebutuhan fisiologis tubuh.

Penelitian awal tentang biosintesis nukleotida dilakukan dengan menggunakan burung, kemudian dilanjutkan dengan bakteri *Escherichia coli*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa prekursor isotopik asam urat yang diberikan kepada burung dara menjadi sumber bagi setiap atom dalam basa purin, sehingga mendorong penelitian lebih lanjut tentang senyawa antara yang terlibat dalam biosintesis purin. Selain itu, jaringan unggas juga digunakan sebagai sumber gen klon yang mengkode enzim-enzim biosintesis purin serta

protein pengatur yang mengontrol laju pembentukan purin.

Gambar 61 menunjukkan sumber atom nitrogen dan karbon pada cincin purin. Atom nomor 4, 5, dan 7 berasal dari glisin.



Gambar 61 Sumber Atom Nitrogen Dan Karbon Pada Cincin Purin.

Terdapat tiga jalur utama yang berperan dalam biosintesis nukleotida purin, yaitu:

1. Sintesis de novo dari zat antara amfibolik.
2. Fosforibosilasi purin.
3. Fosforilasi nukleosida purin.

D. Deoksiribonukleosida Urasil & Sitosin "Diselamatkan"

Adenin, guanin, dan hipoksantin yang dilepaskan selama proses penggantian asam nukleat, khususnya RNA transfer, dapat digunakan kembali untuk membentuk nukleosida trifosfat melalui mekanisme yang disebut jalur penyelamatan. Dalam sel mamalia, basa pirimidin bebas jarang didaur ulang secara langsung. Namun, reaksi penyelamatan dapat mengubah ribonukleosida pirimidin seperti uridin dan sitidin, serta deoksiribonukleosida pirimidin seperti timidin

dan deoksisitidin, menjadi bentuk nukleotidanya masing-masing.

Beberapa reaksi yang berlangsung adalah:

1. Guanin + PRPP $\rightarrow$ GMP + PPi
2. Hipoksantin + PRPP $\rightarrow$ IMP + PPi

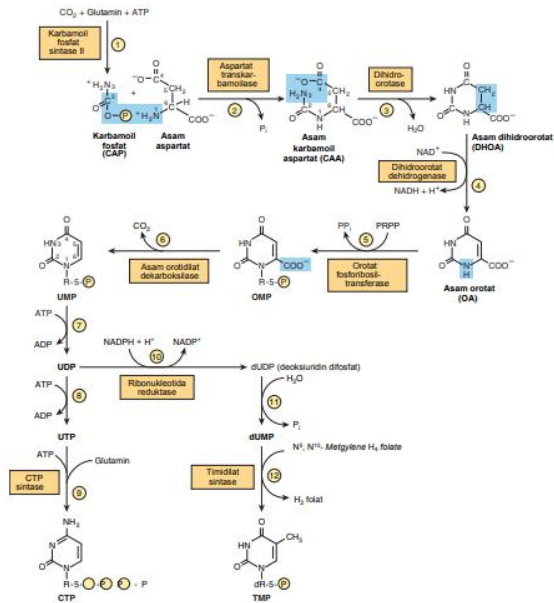
Enzim fosforiltransferase (kinase) memiliki peran untuk memindahkan gugus γ -fosfat dari ATP ke difosfat pada 2'-deoksisitidin, 2'-deoksiguanosin, dan 2'-deoksiadenosin sehingga terbentuk nukleosida trifosfat. Reaksi tersebut meliputi:

1. NDP + ATP $\rightarrow$ NTP + ADP
2. dNDP + ATP $\rightarrow$ dNTP + ADP

E. Metotreksat Menghambat Reduksi Dihidrofolat

Reaksi yang dikatalisis oleh enzim timidilat sintase (EC 2.1.1.45) merupakan satu-satunya tahap dalam biosintesis nukleotida pirimidin yang memerlukan turunan tetrahidrofolat. Pada proses ini, gugus metilen dari N⁵,N¹⁰-metilen-tetrahidrofolat direduksi menjadi gugus metil yang kemudian dipindahkan ke posisi ke-5 cincin pirimidin. Bersamaan dengan itu, tetrahidrofolat mengalami oksidasi menjadi dihidrofolat.

Agar sintesis pirimidin tetap berlangsung, dihidrofolat harus direduksi kembali menjadi tetrahidrofolat melalui bantuan enzim dihidrofolat reduktase (EC 1.5.1.3). Proses reduksi tersebut dapat dihambat oleh metotreksat. Oleh karena itu, sel-sel yang aktif membelah dan membutuhkan sintesis TMP dalam jumlah besar sangat sensitif terhadap inhibitor dihidrofolat reduktase, termasuk obat antikanker metotreksat.



Gambar 6.2 Jalur Biosintesis Nukleotida Pirimidin.

F. Gout Adalah Gangguan Metabolik Katabolisme Purin

Berbagai kelainan genetik pada enzim PRPP sintase dapat menyebabkan gejala klinis yang berkaitan dengan gout. Kelainan ini mungkin meliputi peningkatan nilai V_{max} , peningkatan afinitas terhadap ribosa-5-fosfat, atau ketahanan terhadap penghambatan umpan balik. Akibat kondisi ini, produksi dan pengeluaran katabolit purin menjadi sangat meningkat. Ketika kadar asam urat dalam serum melebihi batas kelarutannya, kristal natrium urat akan mengendap di jaringan lunak dan persendian, yang kemudian memicu inflamasi serta artritis gout. Namun demikian, mayoritas kasus gout sebenarnya berhubungan

dengan masalah pengaturan pengeluaran asam urat oleh ginjal.

1. Hipourisemia

Hipourisemia yang disertai dengan peningkatan pengeluaran hipoksantin dan xantin dapat terjadi akibat kekurangan enzim xantin oksidase (EC 1. 17. 3. 2). Kondisi ini dapat disebabkan oleh kelainan genetik atau kerusakan hati yang parah. Dalam kasus defisiensi enzim yang akut, pasien mungkin mengalami xantinuria dan pembentukan batu xantin (litiasis xantin).

2. Defisiensi Adenosin Deaminase dan Nukleosida Purin Fosforilase

Defisiensi adenosin deaminase berkaitan dengan masalah sistem kekebalan tubuh yang menyebabkan penurunan jumlah dan fungsi limfosit T serta limfosit B. Konsekuensinya, penderita mengalami gangguan berat pada sistem imun. Tanpa terapi penggantian enzim atau transplantasi sumsum tulang, bayi yang mengalami kondisi ini sering kali meninggal akibat infeksi yang serius.

Sementara itu, defisiensi nukleosida purin fosforilase (EC 2. 4. 2. 1) terutama menyebabkan gangguan yang signifikan pada sel T, sedangkan fungsi sel B relatif tetap terjaga. Gangguan imun ini terjadi akibat penumpukan dGTP dan dATP yang menghambat kerja ribonukleotida reduktase, sehingga jumlah prekursor DNA berkurang. Berbagai gangguan

metabolisme purin ini dirangkum dalam Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Kelainan Metabolik Metabolisme Purin dan Pirimidin

Enzim yang Cacat	Nomor Katalog Enzim	Referensi OMIM	Tanda dan Gejala Utama	Gambar dan Reaksi
Metabolisme Purin				
Hipoxantin-guanin fosforibosil transferase	2.4.2.8	308000	Sindrom Lesch-Nyhan Uriemia, mutilasi diri	33-4 ②
PRPP sintase	2.7.6.1	311860	Gout, artritis gout	33-2 ①
Adenosin deaminase	3.5.4.6	102700	Sistem imun sangat terganggu	33-1 ①
Nukleosida purin fosforilase	2.4.2.1	164050	Kelainan autoimun, infeksi jinak dan oportunist	33-11 ②
Metabolisme Pirimidin				
Dihidropirimidin dehidrogenase	1.3.1.2	274270	Dapat terjadi toksisitas terhadap 5-fluorourasil, juga substrat untuk dehidrogenase ini	33-12 ②
Orotat fosforibosil transferase dan asam orotidilat dekarboksilase	2.4.2.10 dan 4.1.1.23	258900	Asiduria asam orotat tipe 1; anemia megaloblastik	33-9 ③ dan ④
Asam orotidilat dekarboksilase	4.1.1.23	258920	Asiduria orotat Tipe 2	33-9 ③

G. Katabolisme Pirimidin Memproduksi Metabolit Larut Air

Berbeda dengan hasil katabolisme purin yang sulit larut dalam air, proses katabolisme pirimidin menghasilkan senyawa yang sangat mudah larut, seperti CO_2 , NH_3 , β -alanin, dan β -aminoisobutirat. Dalam tubuh manusia, β -aminoisobutirat mengalami reaksi transaminasi menjadi metilmalonat semialdehida, yang kemudian diubah menjadi suksinil-KoA. Peningkatan ekskresi β -aminoisobutirat dapat ditemukan pada pasien leukemia serta individu yang terpapar radiasi sinar-X dalam dosis tinggi akibat meningkatnya kerusakan DNA. Namun, sebagian besar individu keturunan Cina atau Jepang secara alami juga mengeluarkan β -aminoisobutirat dalam jumlah tinggi. Gangguan metabolisme β -alanin dan β -aminoisobutirat umumnya disebabkan oleh kelainan enzim yang terlibat dalam katabolisme pirimidin. Salah satu kelainan tersebut adalah

asiduria β -hidroksibutirat, yang terjadi akibat defisiensi total atau parsial dari enzim dihidropirimidin dehidrogenase (EC 1. 3. 1. 2). Penyakit genetik ini mencerminkan tidak adanya aktivitas enzim tersebut. Kelainan lain dalam katabolisme pirimidin dikenal sebagai kombinasi urasiluria–timinuria, yang juga termasuk gangguan metabolisme asam β -amino disebabkan oleh adanya hambatan dalam pembentukan β -alanin dan β -aminoisobutirat. Jika penyakit ini disebabkan oleh kelainan genetik, penderita dapat mengalami komplikasi neurologis yang berat. Sementara itu, bentuk non-genetik dapat dipicu oleh penggunaan obat antikanker 5-fluorourasil pada pasien yang memiliki kadar enzim dihidropirimidin dehidrogenase yang rendah.

Pseudouridin Diekskresikan Tanpa Mengalami Perubahan

Tubuh manusia tidak memiliki enzim yang dapat mengkatalisasi proses hidrolisis maupun fosforolisis pseudouridin (ψ) yang berasal dari degradasi RNA. Oleh karena itu, nukleotida yang tidak biasa ini akan diekskresikan melalui urin dalam bentuk utuh tanpa mengalami perubahan metabolik. Pseudouridin pertama kali berhasil diisolasi dari urin manusia.

H. Latihan Soal

1. Mengapa asam nukleat dan nukleotida yang berasal dari makanan dianggap bersifat nonesensial secara dietetik?

- A. Karena tubuh manusia tidak memerlukan purin dan pirimidin
 - B. Karena jaringan tubuh manusia dapat mensintesis purin dan pirimidin sendiri sesuai kebutuhan fisiologis
 - C. Karena semua purin dari makanan langsung diekskresikan tanpa digunakan tubuh
 - D. Karena nukleotida hanya diperoleh dari makanan berprotein tinggi
 - E. Karena asam urat tidak dapat dibentuk dalam tubuh
2. Berikut ini yang termasuk proses biosintesis nukleotida purin adalah ...
- A. Glikolisis, fosforilasi oksidatif, dan siklus Krebs
 - B. Transkripsi, translasi, dan replikasi
 - C. Sintesis de novo, fosforibosilasi purin, dan fosforilasi nukleosida purin
 - D. Oksidasi purin, reduksi pirimidin, dan gluconeogenesis
 - E. Sintesis protein, fosforilasi protein, dan degradasi protein
3. Enzim PRPP sintase dalam biosintesis purin de novo dihambat melalui mekanisme umpan balik oleh ...
- A. ATP dan GTP
 - B. AMP, ADP, GMP, dan GDP
 - C. IMP dan XMP
 - D. Glisin dan glutamin
 - E. Ribosa 5-fosfat dan ATP
4. Mekanisme regulasi silang pada perubahan IMP menjadi AMP dan GMP bertujuan untuk ...

- A. Mempercepat degradasi purin menjadi asam urat
 - B. Menghambat pembentukan semua nukleotida purin
 - C. Menjaga keseimbangan biosintesis nukleosida trifosfat purin
 - D. Meningkatkan sintesis pirimidin dalam sel
 - E. Mengubah AMP menjadi GMP secara langsung
5. Defisiensi adenosin deaminase dapat menyebabkan ...
- A. Imunodefisiensi berat akibat gangguan fungsi sel T dan sel B
 - B. Peningkatan produksi β -alanin
 - C. Asiduria ototat tipe II
 - D. Peningkatan ekskresi pseudouridin
 - E. Penurunan pembentukan CO_2
6. Pseudouridin pada manusia diekskresikan melalui urin tanpa mengalami perubahan karena ...
- A. Pseudouridin tidak terbentuk dari RNA
 - B. Pseudouridin diubah langsung menjadi asam urat
 - C. Ginjal tidak mampu menyaring pseudouridin
 - D. Tidak ada enzim manusia yang mengatalisis hidrolisis atau fosforolisis pseudouridin
 - E. Pseudouridin tidak larut dalam air
7. Asiduria ototat tipe II disebabkan oleh ...
- A. Defisiensi ototat fosforibosiltransferase dan ototidilat dekarboksilase
 - B. Defisiensi adenosin deaminase

- C. Defisiensi dihidropirimidin dehydrogenase
 - D. Defisiensi ornitin transkarbamoilase
 - E. Defisiensi orotidilat dekarboksilase saja
8. Fungsi utama kompleks ribonukleotida reduktase adalah ...
- A. Mengubah PRPP menjadi IMP
 - B. Menghambat sintesis DNA
 - C. Mereduksi ribonukleosida difosfat (NDP) menjadi deoksiribonukleosida difosfat (dNDP)
 - D. Mengubah GMP menjadi AMP
 - E. Mengkatalisis pembentukan urea
9. Enzim yang mengatalisis reaksi awal biosintesis nukleotida pirimidin adalah ...
- A. Karbamoil fosfat sintase II sitosolik
 - B. Timidilat sintase
 - C. Adenilosuksinat sintase
 - D. Ribonukleotida reduktase
 - E. Dihidrofolat reduktase
10. Metotreksat dapat menghambat sintesis pirimidin karena ...
- A. Menghambat pembentukan PRPP
 - B. Menghambat kerja timidilat sintase
 - C. Menghambat pembentukan ATP
 - D. Menghambat sintesis GMP
 - E. Menghambat dihidrofolat reduktase sehingga dihidrofolat tidak dapat direduksi kembali menjadi tetrahidrofolat

BAB 7

METABOLISME KARBOHIDRAT

A. Pendahuluan

1. Tujuan Pembelajaran

Mahasiswa mampu memahami, menjelaskan, dan menganalisis proses metabolisme Karbohidrat serta kaitannya dengan fungsi fisiologis dan gangguan kesehatan manusia.

2. Capaian Pembelajaran

Setelah mengikuti pembelajaran pada topik ini diharapkan mahasiswa mampu:

- a. Menjelaskan pengertian dan fungsi metabolisme karbohidrat dalam tubuh.
- b. Menjelaskan proses pencernaan, absorpsi, dan transportasi karbohidrat.
- c. Mendeskripsikan tahapan glikolisis beserta enzim dan hasil akhirnya.
- d. Menjelaskan proses pembentukan energi melalui siklus Krebs dan rantai transpor elektron.
- e. Menjelaskan mekanisme glikogenesis dan glikogenolisis.
- f. Menjelaskan proses glukoneogenesis dan jalur pentosa fosfat.

Salah satu proses biokimia penting yang memastikan kehidupan sel dan keseimbangan energi tubuh adalah metabolisme karbohidrat. Karbohidrat berfungsi sebagai sumber energi utama bagi sebagian besar jaringan tubuh, terutama

eritrosit, otot rangka, dan otak. Karbohidrat dicerna menjadi monosakarida, terutama glukosa, setelah dikonsumsi. Kemudian, di usus halus, mereka diserap dan didistribusikan ke jaringan tubuh lainnya untuk digunakan dalam proses pembentukan energi. Untuk memenuhi kebutuhan energi tubuh dalam berbagai kondisi fisiologis, glukosa dimetabolisme dalam sel melalui berbagai proses, termasuk glikolisis, siklus asam sitrat, glikogenesis, glikogenolisis, dan glukoneogenesis (Nelson & Cox, 2021)

Metabolisme karbohidrat secara fisiologis tidak hanya menghasilkan adenosin trifosfat (ATP) sebagai energi, tetapi juga menyediakan prekursor biosintesis untuk senyawa lain seperti nukleotida, asam lemak, dan asam amino nonesensial. Selain itu, karbohidrat berperan penting dalam menjaga homeostasis glukosa darah melalui regulasi hormonal yang mencakup glukagon, epinefrin, kortisol, dan insulin. Diabetes melitus, hipoglikemia, obesitas, dan sindrom metabolik adalah beberapa gangguan metabolisme yang semakin meningkat di banyak negara, termasuk Indonesia, karena ketidakseimbangan dalam regulasi metabolisme karbohidrat (Ferrier, 2022).

B. Pencernaan dan Absorpsi Karbohidrat

Pencernaan dan absorpsi karbohidrat merupakan langkah pertama yang sangat penting dalam metabolisme karbohidrat karena menentukan ketersediaan glukosa sebagai sumber energi tubuh. Agar usus halus dapat menyerap

karbohidrat dalam bentuk polisakarida, disakarida, atau monosakarida, proses pemecahannya harus dimulai. Enzim amilase saliva, juga dikenal sebagai ptialin, yang diproduksi oleh kelenjar ludah, memulai proses pencernaan karbohidrat di rongga mulut. Enzim ini menghidrolisis pati menjadi molekul yang lebih kecil seperti dekstrin dan maltosa. Namun, karena pH asam lambung rendah, aktivitas amilase saliva akan terhenti untuk sementara (Rodwell et al., 2021)

Amilase pankreas yang disekresikan ke duodenum membantu pencernaan karbohidrat di usus halus. Enzim ini lebih kuat daripada amilase saliva dalam memecah polisakarida menjadi oligosakarida dan disakarida. Selanjutnya, enzim disakaridase pada brush border usus halus, seperti maltase, sukrase, dan laktase, mengubah disakarida menjadi monosakarida seperti glukosa, galaktosa, dan fruktosa, yang dapat diserap oleh enterosit usus (Nelson & Cox, 2021). Keberadaan enzim-enzim tersebut sangat penting dalam menjaga efisiensi penyerapan nutrisi. Defisiensi salah satu enzim, seperti laktase, dapat menyebabkan intoleransi laktosa yang ditandai dengan diare, perut kembung, dan nyeri abdomen setelah konsumsi susu atau produk olahannya.

Di jejunum, absorpsi monosakarida terutama terjadi melalui mekanisme transpor aktif dan difusi terfasilitasi. Transporter yang terhubung natrium-glukosa-1 (SGLT-1) menyerap glukosa dan galaktosa dengan memanfaatkan gradien natrium. Di sisi lain, transporter glukosa-5 (GLUT-5)

memfasilitasi penyerapan fruktosa melalui difusi. Monosakarida akan masuk ke enterosit dan kemudian dibawa ke sirkulasi darah melalui membran basolateral sel usus melalui GLUT-2 (Ferrier, 2022).

C. Glikolisis

Jalur utama metabolisme glukosa, yang terdapat di sitoplasma sel dan menghasilkan adenosin trifosfat (ATP) ialah Glikolisis. Jalur ini merupakan proses awal dalam pemanfaatan karbohidrat tubuh dan dapat terjadi baik dalam kondisi anaerob maupun aerob. Secara umum, glikolisis menghasilkan dua molekul piruvat dari satu molekul glukosa melalui berbagai reaksi enzimatik yang terstruktur. Selain menghasilkan piruvat, proses ini juga menghasilkan ATP dan NADH, yang merupakan komponen penting metabolisme energi sel (Nelson & Cox, 2021).

Glikolisis terjadi dalam dua tahap secara biokimia: tahap investasi energi dan tahap pembentukan energi. Pada tahap investasi energi, sel menggunakan dua molekul ATP untuk mengaktivasi glukosa agar dapat dipecahkan lebih lanjut. Beberapa enzim penting, termasuk heksokinase, fosfoglukosa isomerase, dan fosfofruktokinase-1 (PFK-1), terlibat dalam proses ini. Karena aktivitasnya sangat dipengaruhi oleh energi sel, enzim PFK-1 dikenal sebagai enzim regulator utama glikolisis. Kerjanya dihambat oleh kadar ATP yang tinggi, tetapi peningkatan AMP dan fruktosa-2,6-bifosfat akan mengaktifasi enzim

tersebut, menyebabkan peningkatan laju glikolisis (Ferrier, 2022).

Senyawa intermediat yang dihasilkan dari pemecahan glukosa akan dioksidasi selama fase pembentukan energi dan menghasilkan ATP melalui fosforilasi tingkat substrat. Cara ini menghasilkan empat molekul ATP dan dua molekul NADH, sehingga keuntungan bersih glikolisis untuk setiap molekul glukosa adalah dua ATP. Piruvat, produk akhir glikolisis, memiliki kehidupan metabolik yang berbeda tergantung pada jumlah oksigen yang tersedia. Dalam kondisi aerob, piruvat masuk ke mitokondria dan diubah menjadi asetil-KoA untuk memulai siklus asam sitrat. Dalam kondisi anaerob, enzim laktat dehidrogenase menghasilkan NAD⁺ kembali dan piruvat direduksi menjadi laktat (Rodwell et al., 2021).

Studi menunjukkan bahwa resistensi insulin pada diabetes melitus dapat menghentikan sel untuk mengambil glukosa, yang mengakibatkan penurunan proses glikolisis dan peningkatan kadar glukosa darah (Petersen et al., 2017).

D. Oksidasi Piruvat dan Siklus Asam Sitrat (Siklus Krebs)

Metabolisme karbohidrat melibatkan oksidasi piruvat dan siklus asam sitrat, yang keduanya menghasilkan energi di dalam mitokondria secara aerob. Setelah glikolisis terjadi di sitoplasma, piruvat akan memasuki mitokondria untuk dioksidasi menjadi asetil-koenzim A (asetil-KoA). Reaksi ini dikatalisis oleh kompleks enzim piruvat

dehidrogenase, yang membutuhkan beberapa koenzim penting, seperti tiamin pirofosfat, asam lipoat, koenzim A, flavin adenin dinukleotida (FAD), dan nikotinamida adenin dinukleotida (NAD⁺) (Nelson & Cox, 2021).

Kompleks piruvat dehidrogenase bertanggung jawab untuk menghubungkan glikolisis dan siklus asam sitrat. Kebutuhan energi sel mengatur aktivitas enzim ini. Aktivitas kompleks piruvat dehidrogenase dihambat oleh konsentrasi tinggi ATP, asetil-KoA, dan NADH. Di sisi lain, peningkatan ADP dan piruvat akan merangsang aktivitasnya. Gangguan pada enzim ini dapat menyebabkan akumulasi piruvat yang kemudian diubah menjadi laktat sehingga menimbulkan asidosis laktat, suatu kondisi yang dapat mengganggu fungsi jaringan tubuh terutama sistem saraf pusat (Ferrier, 2022).

Asetil-KoA masuk ke siklus asam sitrat atau Krebs di matriks mitokondria. Siklus ini pertama kali dijelaskan oleh Hans Adolf Krebs pada tahun 1937 dan berfungsi sebagai pusat metabolisme energi aerob karena menghasilkan molekul berenergi tinggi seperti NADH, FADH₂, dan guanosi trifosfat (GTP). Pada awal siklus, enzim sitrat sintase dikatalisis untuk menggabungkan asetil-KoA dengan oksaloasetat untuk membentuk sitrat. Kemudian terjadi berbagai reaksi yang mengoksidasi, dekarboksilasi, dan mengembalikan oksaloasetat, yang memungkinkan siklus berlanjut (Rodwell et al., 2021).

Siklus asam sitrat tidak hanya menghasilkan energi, tetapi juga menyediakan intermediet yang penting untuk biosintesis berbagai molekul, seperti heme, asam lemak, dan asam amino. Akibatnya, siklus ini bersifat amfibolik karena melibatkan anabolisme dan katabolisme pada saat yang sama. Dalam teori bioenergetika, NADH dan FADH₂ yang berasal dari siklus Krebs akan memasuki rantai transpor elektron di membran mitokondria, yang menghasilkan banyak ATP. Dengan demikian, siklus asam sitrat menjadi pusat integrasi metabolisme karbohidrat, lemak, dan protein (Berg et al., 2019).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa gangguan fungsi mitokondria dan siklus Krebs berkaitan erat dengan penyakit metabolik dan degeneratif. Menurut Martínez-Reyes dan Chandel (2020) perubahan metabolisme mitokondria dapat memengaruhi proliferasi sel, stres oksidatif, dan perkembangan kanker. Selain itu, disfungsi enzim siklus Krebs diketahui berhubungan dengan penyakit neurodegeneratif dan diabetes melitus akibat penurunan produksi energi seluler.

E. Rantai Transpor Elektron dan Fosforilasi Oksidatif

Rantai transpor elektron dan fosforilasi oksidatif adalah tahap akhir metabolisme energi aerob di mitokondria. Proses ini berfungsi untuk menghasilkan sebagian besar adenosin trifosfat (ATP) dalam tubuh melalui transfer elektron dari NADH dan FADH₂, yang dibuat dalam glikolisis, oksidasi piruvat, dan siklus asam sitrat. Elektron

yang dibawa oleh NADH dan FADH₂ akan secara bertahap ditransfer melalui berbagai kompleks protein pada membran mitokondria hingga akhirnya diterima oleh oksigen sebagai akseptor elektron terakhir dan menghasilkan air (Nelson & Cox, 2021).

Empat kompleks utama membentuk rantai transpor elektron: Kompleks I menerima elektron dari NADH dehidrogenase, Kompleks II menerima elektron dari suksinat dehidrogenase, Kompleks III menerima sitokrom bc₁, dan Kompleks IV menerima sitokrom c oksidase. Proton (H⁺) dipompa dari matriks mitokondria ke ruang intermembran selama perpindahan elektron. Hal ini menyebabkan gradien elektrokimia terbentuk. ATP sintase pada Kompleks V kemudian menggunakan gradien proton ini untuk menghasilkan ATP dari ADP dan fosfat anorganik. Proses ini disebut fosforilasi oksidatif (Ferrier, 2022).

Beberapa zat dapat menghambat rantai transpor elektron. Misalnya, sianida dan karbon monoksida menghentikan Kompleks IV, yang mencegah oksigen menerima elektron. Oleh karena itu, produksi ATP berhenti, yang dapat menyebabkan kematian sel yang cepat. Selain itu, senyawa uncoupler, seperti 2,4-dinitrofenol, menghentikan proses transfer elektron dari sintesis ATP, menghasilkan pelepasan panas energi (Berg et al., 2019).

Penelitian modern menunjukkan bahwa gangguan fungsi rantai transpor elektron berkaitan erat dengan berbagai penyakit degeneratif dan

metabolik. Disfungsi mitokondria dapat menyebabkan penurunan produksi ATP dan peningkatan pembentukan reactive oxygen species (ROS) yang memicu stres oksidatif. Menurut penelitian oleh Spinelli dan Haigis (2018), peningkatan ROS akibat gangguan rantai transpor elektron berperan dalam perkembangan penyakit neurodegeneratif, diabetes melitus, kanker, dan penuaan sel.

F. Glikogenesis

Pembentukan glikogen dari glukosa, yang terutama terjadi di hati dan otot rangka, dikenal sebagai glikogenesis. Jalur metabolisme ini menyimpan glukosa yang berlebihan dalam bentuk glikogen, yang dapat digunakan kembali tubuh saat membutuhkan energi. Kadar glukosa darah meningkat setelah mengonsumsi makanan yang mengandung karbohidrat, sehingga hormon insulin merangsang sel hati dan otot untuk menyerap glukosa dan mengubahnya menjadi glikogen. Proses ini penting untuk menjaga homeostasis kadar glukosa darah dan mencegah hiperglikemia setelah makan (Nelson & Cox, 2021).

Secara biokimia, glikogenesis dimulai dengan enzim heksokinase atau glukokinase memfosforilasi glukosa menjadi glukosa-6-fosfat. Kemudian, enzim fosfoglukomutase mengubah glukosa-6-fosfat menjadi glukosa-1-fosfat, yang kemudian bereaksi dengan uridin trifosfat (UTP) untuk membentuk UDP-glukosa, yang merupakan donor glukosa aktif untuk sintesis glikogen. Dalam proses ini, enzim

utama adalah glikogen sintase, yang bertanggung jawab untuk membentuk ikatan α -1,4-glikosidik pada rantai glikogen. Selain itu, enzyme branching juga bertanggung jawab untuk membentuk cabang melalui ikatan α -1,6-glikosidik, yang membuat struktur glikogen bercabang dan lebih mudah digerakkan ketika diperlukan (Ferrier, 2022).

Hormon dan status energi tubuh sangat memengaruhi regulasi glikogenesis. Dengan meningkatkan aktivitas glikogen sintase dan meningkatkan masuknya glukosa ke dalam sel melalui transporter GLUT-4, insulin adalah hormon utama yang merangsang glikogenesis. Sebaliknya, hormon glukagon dan epinefrin menghambat glikogenesis saat tubuh membutuhkan lebih banyak glukosa, seperti saat puasa atau stres (Rodwell et al., 2021).

Aktivitas fisik memiliki pengaruh besar terhadap penyimpanan glikogen otot. Latihan fisik secara teratur dapat meningkatkan sensitivitas insulin dan kapasitas penyimpanan glikogen pada otot rangka. Menurut penelitian oleh Hawley et al. (2014), peningkatan cadangan glikogen otot berhubungan dengan peningkatan performa fisik dan ketahanan tubuh selama aktivitas olahraga. Oleh karena itu, glikogenesis memiliki peran penting tidak hanya dalam metabolisme normal, tetapi juga dalam adaptasi tubuh terhadap aktivitas fisik dan kondisi patologis.

G. Glikogenolisis

Pemecahan glikogen menjadi glukosa atau glukosa-1-fosfat untuk memenuhi kebutuhan energi tubuh disebut glikogenolisis. Jalur metabolisme ini terutama terjadi di hati dan otot rangka. Pada hati, glikogenolisis membantu mempertahankan kadar glukosa darah selama puasa atau ketika asupan makanan berkurang. Pada otot rangka, glikogenolisis memberikan energi cepat untuk kontraksi otot selama aktivitas fisik. Tubuh memerlukan proses ini untuk menjaga keseimbangan energinya, terutama saat ada peningkatan kebutuhan energi atau penurunan kadar glukosa darah (Nelson & Cox, 2021).

Enzim glikogen fosforilase memulai glikogenolisis dengan memecahkan ikatan α -1,4-glikosidik pada glikogen, menghasilkan glukosa-1-fosfat. Ketika enzim mencapai titik percabangan glikogen, enzim akan memotong ikatan α -1,6-glikosidik, memungkinkan pemecahan glikogen berlanjut. Setelah terbentuk, glukosa-1-fosfat diubah menjadi glukosa-6-fosfat oleh enzim fosfoglukomutase pada hati, yang kemudian melepaskannya ke dalam aliran darah. Namun, karena otot rangka tidak memiliki enzim glukosa-6-fosfatase, glukosa-6-fosfat langsung digunakan dalam proses glikolisis untuk menghasilkan energi (Ferrier, 2022).

Hormon dan kondisi fisiologis tubuh memengaruhi regulasi glikogenolisis. Epinephrin meningkatkan glikogenolisis di otot dan hati selama stres atau aktivitas fisik, sedangkan hormon

glukagon merangsang glikogenolisis di hati ketika kadar glukosa darah menurun. Ketika hormon ini diaktifkan, siklik adenosin monofosfat (cAMP) dibuat. Ini kemudian mengaktifkan protein kinase A, yang memicu aktifitas glikogen fosforilase. (Rodwell et al., 2021).

Penelitian oleh Lucia et al. (2008) menunjukkan bahwa pasien penyakit McArdle mengalami penurunan kapasitas produksi energi akibat ketidakmampuan memobilisasi cadangan glikogen otot secara optimal. Selain itu, gangguan regulasi glikogenolisis pada diabetes melitus juga dapat menyebabkan peningkatan produksi glukosa oleh hati sehingga memperburuk hiperglikemia (Petersen et al., 2017).

H. Glukoneogenesis

Pembentukan glukosa dari bahan nonkarbohidrat dikenal sebagai glukoneogenesis, yang terutama terjadi di hati dan sebagian di ginjal. Jalur metabolisme ini sangat penting untuk menjaga kadar glukosa darah, terutama saat tubuh puasa, kelaparan, berolahraga, atau mengalami kondisi di mana cadangan glikogen mulai berkurang. Jaringan seperti otak, eritrosit, dan medula ginjal sangat membutuhkan glukosa yang dihasilkan melalui glukoneogenesis (Nelson & Cox, 2021).

Glukoneogenesis bukan sekadar kebalikan dari glikolisis karena memerlukan enzim tertentu untuk melewati beberapa tahapan glikolisis yang tidak dapat diulang. Salah satu prekursor utama

glukoneogenesis adalah laktat, alanin, dan gliserol. Laktat berasal dari metabolisme anaerob di otot dan eritrosit, alanin berasal dari pembakaran protein otot, dan gliserol berasal dari pemecahan trigliserida pada jaringan adiposa. Setelah enzim piruvat karboksilase mengubah piruvat menjadi oksaloasetat, proses fosfoenolpiruvat karboksikinase (PEPCK) akan terjadi. Enzim fruktosa-1,6-bifosfatase dan glukosa-6-fosfatase membantu proses selanjutnya hingga terbentuk glukosa (Ferrier, 2022).

Status energi tubuh dan hormon sangat memengaruhi regulasi glukoneogenesis. Selain regulasi hormonal, kadar asetil-KoA dan ATP yang tinggi juga merangsang glukoneogenesis karena menunjukkan bahwa kebutuhan energi sel telah terpenuhi, sehingga metabolit dapat diarahkan untuk menghasilkan glukosa. Saat kadar glukosa darah rendah, hormon glukagon dan kortisol meningkatkan glukoneogenesis, sedangkan insulin menghambat jalur ini ketika glukosa darah meningkat setelah makan (Rodwell et al., 2021).

Siklus Cori dan alanin berhubungan dengan glukoneogenesis. Pada siklus Cori, laktat yang dibuat oleh otot selama glikolisis anaerob dibawa ke hati untuk diubah menjadi glukosa melalui glukoneogenesis, yang kemudian dikirim kembali ke otot sebagai sumber energi. Pada siklus alanin, alanin dibawa ke hati untuk diubah menjadi piruvat, yang kemudian digunakan dalam pembentukan glukoneogenesis. Dalam kedua siklus ini, organ

bekerja sama untuk mempertahankan homeostasis energi tubuh (Berg et al., 2019).

Penelitian oleh Petersen et al. (2017) menjelaskan bahwa peningkatan ekspresi enzim glukoneogenesis seperti PEPCK dan glukosa-6-fosfatase berkontribusi terhadap tingginya kadar glukosa darah pada penderita diabetes. Selain itu, penelitian lain menunjukkan bahwa puasa intermiten dan aktivitas fisik dapat memengaruhi jalur glukoneogenesis melalui perubahan sensitivitas insulin dan metabolisme energi tubuh (Rui, 2014).

I. Jalur Pentosa Fosfat (Pentose Phosphate Pathway)

Jalur pentosa fosfat, juga dikenal sebagai jalur pentose fosfat (PPP), adalah jalur metabolisme alternatif glukosa. Fungsi utama jalur ini adalah menghasilkan ribosa-5-fosfat dan nikotinamida adenin dinukleotida fosfat tereduksi (NADPH), yang penting untuk biosintesis asam lemak, sintesis kolesterol, dan mekanisme pertahanan antioksidan sel. Jalur pentosa fosfat lebih banyak membantu proses anabolisme dan melindungi sel dari stres oksidatif daripada glikolisis, yang berkonsentrasi pada produksi ATP (Nelson & Cox, 2021).

Jalur pentosa fosfat melewati dua fase utama: fase oksidatif dan nonoksidatif. Glukosa-6-fosfat dioksidasi menghasilkan NADPH dan ribulosa-5-fosfat selama fase oksidatif. Enzim utama glukosa-6-fosfat dehidrogenase (G6PD) adalah enzim yang mengatur jalur pentosa fosfat secara keseluruhan.

NADPH membantu mempertahankan glutathione dalam bentuk tereduksi, melindungi sel dari kerusakan yang disebabkan oleh radikal bebas dan reaktif jenis oksigen (ROS) (Ferrier, 2022).

Jalur pentosa fosfat sangat aktif pada jaringan yang aktif menghasilkan lemak dan steroid, seperti kelenjar adrenal, kelenjar mammae, jaringan adiposa, dan hati. Selain itu, karena eritrosit sangat bergantung pada jalur ini karena mereka tidak memiliki mitokondria, NADPH diperlukan untuk melindungi membran sel dari stres oksidatif dan melindungi hemoglobin dan membran eritrosit dari oksidasi. Oleh karena itu, gangguan pada jalur pentosa fosfat dapat menyebabkan kerusakan eritrosit dan hemolisis.(Rodwell et al., 2021).

J. Latihan Soal

1. Fungsi utama karbohidrat bagi tubuh adalah sebagai
 - A. Penyusun hormon steroid
 - B. Sumber energi utama
 - C. Pembentuk antibodi
 - D. Penghasil vitamin
 - E. Penyusun enzim
2. Enzim yang memulai pencernaan karbohidrat di rongga mulut adalah
 - A. Pepsin
 - B. Tripsin
 - C. Maltase
 - D. Lipase
 - E. Amilase saliva

3. Lokasi berlangsungnya glikolisis di dalam sel adalah
 - A. Nukleus
 - B. Mitokondria
 - C. Sitoplasma
 - D. Ribosom
 - E. Retikulum endoplasma
4. Produk yang dihasilkan dalam siklus Krebs adalah berikut ini, kecuali
 - A. NADH
 - B. FADH_2
 - C. GTP
 - D. CO_2
 - E. Glukosa
5. Piruvat diubah menjadi asetil-KoA di dalam
 - A. Sitoplasma
 - B. Nukleus
 - C. Ribosom
 - D. Mitokondria
 - E. Lisosom
6. ATP sintase berfungsi untuk
 - A. Menguraikan ATP
 - B. Membentuk ATP
 - C. Menghasilkan glukosa
 - D. Memecah protein
 - E. Mengubah laktat menjadi piruvat
7. Glikogenesis adalah proses
 - A. Pemecahan glikogen
 - B. Pembentukan glukosa
 - C. Pembentukan glikogen
 - D. Pemecahan glukosa
 - E. Pembentukan asam amino

8. Enzim utama yang memecah glikogen adalah
 - A. Heksokinase
 - B. Fosfofruktokinase
 - C. Glikogen fosforilase
 - D. Glukokinase
 - E. Aldolase
9. Glukoneogenesis adalah proses pembentukan glukosa dari
 - A. Monosakarida
 - B. Polisakarida
 - C. Senyawa nonkarbohidrat
 - D. Vitamin
 - E. Mineral
10. Fungsi utama jalur pentosa fosfat adalah menghasilkan
 - A. ATP dan laktat
 - B. NADPH dan ribosa-5-fosfat
 - C. Asam amino
 - D. Asetil-KoA
 - E. Glikogen

BAB 8

METABOLISME PROTEIN

A. Pendahuluan

1. Tujuan Pembelajaran

Mahasiswa mampu memahami, menguraikan, dan menjelaskan proses metabolisme protein, mulai dari pencernaan, absorpsi, katabolisme, siklus urea, sintesis, dan peran hormon.

2. Capaian Pembelajaran

Melalui pembelajaran pada topik ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- a. Menjelaskan konsep dasar metabolisme protein dan peran protein.
- b. Menjelaskan proses pencernaan, absorpsi, transport, dan pemanfaatan protein.
- c. Menjelaskan jalur metabolisme asam amino yang meliputi transaminasi, deaminasi, dan pembentukan amonia.
- d. Menjelaskan mekanisme siklus urea sebagai proses detoksifikasi nitrogen dalam tubuh.
- e. Menjelaskan proses sintesis dan regulasinya.
- f. Menjelaskan peran hormon pada protein.

B. Konsep Metabolisme Protein

1. Definisi Metabolisme Protein

Metabolisme protein adalah seluruh proses biokimia yang melibatkan pencernaan, penyerapan, sintesis, pemecahan, dan pemanfaatan protein dalam tubuh. Protein yang

diperoleh dari makanan akan dipecah menjadi asam amino, kemudian digunakan untuk membentuk protein baru yang diperlukan untuk pertumbuhan, pemeliharaan, dan perbaikan jaringan tubuh. Asam amino juga dapat berkontribusi dalam penyediaan energi saat cadangan energi dari karbohidrat dan lemak tidak mampu memenuhi kebutuhan tubuh.. Metabolisme protein berlangsung secara dinamis dan terus-menerus melalui proses sintesis (anabolisme) dan degradasi (katabolisme) protein. Keseimbangan antara kedua proses tersebut sangat penting untuk menjaga homeostasis dan fungsi normal tubuh.

2. Fungsi Protein dalam Tubuh

Protein merupakan salah satu makronutrien yang berperan penting dalam menjalankan berbagai fungsi fisiologis tubuh.

- a. Protein berperan utama dalam pembentukan, pertumbuhan, serta pemeliharaan berbagai jaringan tubuh, seperti otot, kulit, tulang, dan organ-organ lainnya, serta membantu proses pertumbuhan dan regenerasi sel yang rusak.
- b. Selain fungsi struktural, protein berfungsi sebagai enzim yang mempercepat berbagai reaksi metabolisme dalam tubuh.
- c. Banyak hormon, seperti insulin dan hormon pertumbuhan, tersusun atas protein atau peptida yang berfungsi mengatur berbagai aktivitas fisiologis.

- d. Protein mendukung kerja sistem imun dengan menjadi komponen utama pembentukan antibodi yang berfungsi melawan infeksi dan penyakit.
 - e. Protein juga berfungsi sebagai pengangkut berbagai zat dalam tubuh, seperti hemoglobin yang membawa oksigen dari paru-paru ke seluruh jaringan tubuh.
 - f. Protein turut berperan dalam mempertahankan keseimbangan cairan tubuh, tekanan osmotik, serta keseimbangan asam-basa.
 - g. Dalam kondisi tertentu, protein dapat digunakan untuk sumber energi dengan menghasilkan sekitar 4 kilokalori per gram.
3. Peran Asam Amino

Sebagai unit penyusun protein, asam amino berfungsi penting dalam mendukung berbagai aktivitas metabolik di dalam tubuh. Setelah protein dicerna, asam amino dapat diserap dalam usus dan didistribusikan ke berbagai jaringan untuk digunakan dalam sintesis protein baru. Tubuh memerlukan asam amino untuk membentuk enzim, antibodi, hormon, dan berbagai senyawa biologis lainnya.

Berdasarkan kemampuannya untuk disintesis oleh tubuh, asam amino dibedakan menjadi asam amino esensial dan nonesensial. Asam amino esensial tidak dapat disintesis oleh tubuh dalam jumlah yang memadai sehingga harus diperoleh melalui konsumsi makanan,

sedangkan asam amino nonesensial dapat disintesis oleh tubuh.

Selain berperan sebagai bahan pembentuk protein, asam amino turut berperan sebagai bahan baku dalam sintesis berbagai molekul yang diperlukan untuk menunjang fungsi tubuh seperti neurotransmitter, hormon, dan nukleotida. Ketika tubuh memerlukan energi lebih banyak atau mengalami defisit energi, asam amino dapat dipecah dan digunakan untuk menghasilkan energi melalui beragam mekanisme metabolisme. Oleh karena itu, asam amino memiliki peran sentral dalam mendukung pertumbuhan, pemeliharaan fungsi sel, dan keseimbangan metabolisme tubuh.

C. Pencernaan dan Absorpsi Protein

Pencernaan protein dimulai di lambung dengan bantuan HCl dan enzim pepsin, kemudian berlanjut di usus halus dengan bantuan enzim pankreas dan enzim mukosa usus. Proses pencernaan protein melibatkan beberapa enzim yang bekerja secara berurutan yaitu: Pepsin, Tripsin, Kimotripsin, Karboksipeptidase, Aminopeptidase dan Dipeptidase. Hasil akhir pencernaan berupa asam amino diserap melalui dinding usus halus dan dibawa ke hati melalui aliran darah melalui proses absorpsi atau penyerapan yang terjadi di jejunum dan ileum, yaitu bagian dari usus halus yang memiliki banyak vili dan mikrovili. Setelah diserap, asam amino masuk ke pembuluh darah kapiler pada vili usus dan dibawa melalui vena porta hepatica

menuju hati. Di hati, asam amino dapat dimanfaatkan untuk berbagai fungsi penting seperti: sintesis protein tubuh, disimpan sementara dalam bentuk senyawa tertentu, diubah menjadi sumber energi apabila diperlukan, digunakan untuk pembentukan hormon, enzim, dan antibodi.

D. Katabolisme Asam Amino

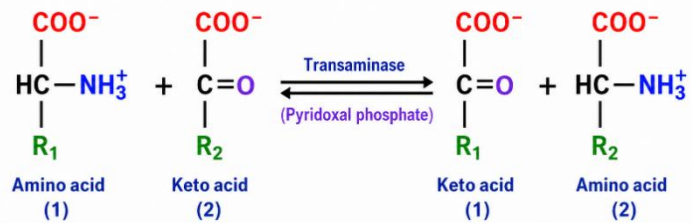
Asam amino berperan sebagai bahan dasar dalam pembentukan protein tubuh serta menjadi prekursor berbagai senyawa penting. Ketika jumlah asam amino yang dikonsumsi melebihi kebutuhan tubuh, asam amino akan mengalami proses katabolisme dan dimanfaatkan sebagai sumber energi. Berbeda dengan karbohidrat yang dapat disimpan dalam tubuh dalam bentuk glikogen sebagai cadangan energi, kelebihan asam amino hasil metabolisme protein tidak dapat disimpan secara khusus. Oleh karena itu, apabila jumlah asam amino melebihi kebutuhan tubuh, asam amino tersebut akan dipecah melalui proses katabolisme untuk menghasilkan energi atau diubah menjadi senyawa lain yang dapat digunakan atau disimpan oleh tubuh. Katabolisme asam amino melibatkan tiga tahap utama, yaitu transaminasi, deaminasi oksidatif, dan pembentukan amonia.

1. Transaminasi

Transaminasi adalah proses pemindahan gugus amino dari suatu asam amino ke senyawa asam keto. Reaksi ini merupakan langkah awal dalam katabolisme asam amino

dan memungkinkan tubuh untuk membentuk asam amino baru sesuai kebutuhan.

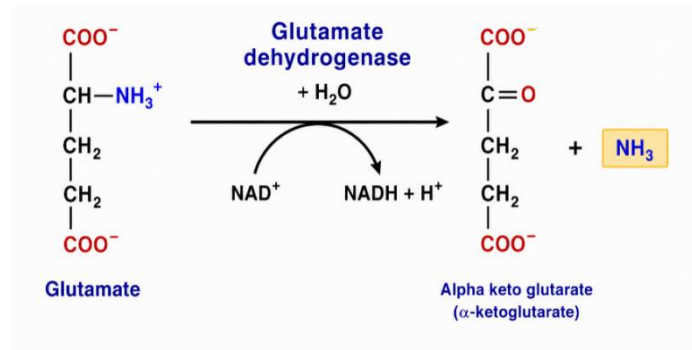
Pada proses ini, gugus amino dari suatu asam amino dipindahkan ke α -ketoglutarat sehingga menghasilkan glutamat dan asam keto baru. Reaksi transaminasi dikatalisis oleh enzim aminotransferase (transaminase) dengan bantuan koenzim piridoksal fosfat.



Gambar 8.1. Reaksi Transaminasi

2. Deaminasi Oksidatif

Proses deaminasi terjadi ketika gugus amino pada asam amino dilepaskan, sehingga terbentuk amonia (NH_3) dan kerangka karbon dalam bentuk asam keto. Proses ini terutama terjadi di hati setelah gugus amino dikumpulkan dalam bentuk glutamat. Jenis deaminasi yang paling umum adalah deaminasi oksidatif, yang dikatalisis oleh enzim glutamat dehidrogenase. Pada reaksi ini, glutamat melepaskan gugus aminonya sehingga terbentuk α -ketoglutarat dan amonia. Setelah gugus amino dilepaskan, sisa molekul berupa asam keto dapat diproses lebih lanjut seperti kedalam siklus Krebs untuk menghasilkan energi. Selain itu, juga dapat diubah menjadi glukosa melalui glukoneogenesis atau dikonversi menjadi asam lemak untuk disimpan sebagai lemak tubuh.



Gambar 8.2. Reaksi Deaminasi Oksidatif

3. Pembentukan Amonia

Amonia (NH_3) merupakan hasil utama dari pemecahan gugus amino selama proses deaminasi. Senyawa ini bersifat toksik, terutama bagi sistem saraf, sehingga tidak boleh menumpuk dalam tubuh. Amonia dapat berasal dari: proses deaminasi asam amino di hati, pemecahan protein oleh bakteri usus, katabolisme senyawa yang mengandung nitrogen seperti purin dan pirimidin. Karena bersifat racun, amonia segera dibawa ke hati untuk diubah menjadi urea melalui siklus urea.

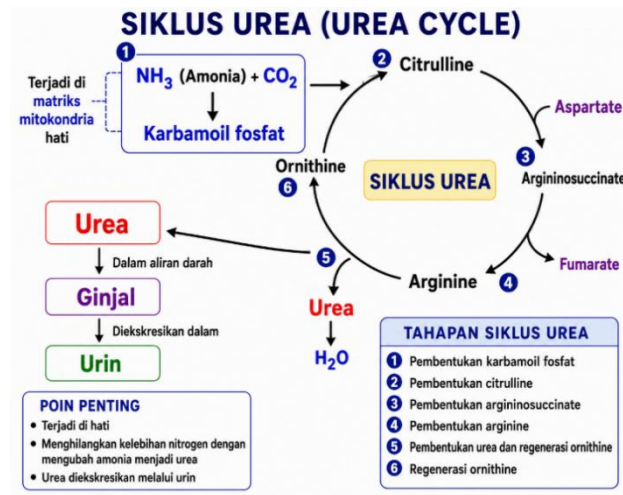
E. Siklus Urea

Siklus urea adalah rangkaian reaksi biokimia yang terjadi di hati untuk mengubah amonia (NH_3), yang bersifat toksik, menjadi urea yang lebih aman bagi tubuh. Urea kemudian diangkut melalui darah ke ginjal untuk dikeluarkan bersama urin. Siklus ini merupakan mekanisme utama tubuh dalam membuang kelebihan nitrogen hasil metabolisme protein. Siklus urea sangat penting karena mencegah keracunan amonia, menjaga

keseimbangan nitrogen, mendukung metabolisme protein, serta mempertahankan fungsi normal hati dan ginjal. Dengan demikian, siklus urea merupakan mekanisme utama detoksifikasi nitrogen dalam tubuh manusia.

1. Pembentukan Urea

Ketika protein dan asam amino dipecah, gugus amino akan dilepaskan melalui proses deaminasi dan menghasilkan amonia (NH_3). Karena amonia bersifat racun, terutama bagi sistem saraf, tubuh harus segera mengubahnya menjadi senyawa yang tidak berbahaya. Proses pembentukan urea berlangsung di hati melalui beberapa tahapan yang dikenal sebagai Siklus Urea (Siklus Ornithin). Siklus ini melibatkan senyawa antara seperti ornithin, sitrulin, argininosuksinat, dan arginin. Secara sederhana, amonia dan karbon dioksida akan bergabung membentuk urea yang kemudian dilepaskan ke dalam aliran darah.



Gambar 8.3. Siklus Urea

Reaksi keseluruhan siklus urea dapat digambarkan sebagai berikut:

- a. Amonia dan karbon dioksida membentuk karbamoil fosfat.
- b. Karbamoil fosfat bergabung dengan ornithin membentuk sitrulin.
- c. Sitrulin bereaksi dengan aspartat membentuk argininosuksinat.
- d. Argininosuksinat dipecah menjadi arginin dan fumarat.
- e. Arginin dihidrolisis menghasilkan urea dan ornithin.
- f. Ornithin digunakan kembali untuk memulai siklus berikutnya.

Proses ini berlangsung terus-menerus selama terjadi pemecahan protein dalam tubuh.

2. Pembuangan Nitrogen dari Tubuh

Nitrogen merupakan unsur utama penyusun asam amino dan protein. Ketika protein dipecah, nitrogen tidak dapat digunakan sebagai sumber energi sehingga harus dikeluarkan dari tubuh. Siklus urea berperan penting dalam mengubah nitrogen yang berasal dari amonia menjadi urea yang kemudian akan masuk ke aliran darah, diangkut menuju ginjal, disaring oleh glomerulus, dan dikeluarkan bersama urin. Sebagian kecil nitrogen juga dikeluarkan melalui keringat, feses, rambut dan kuku yang mengalami pertumbuhan. Namun, sekitar 80–90% nitrogen hasil metabolisme protein dibuang dalam bentuk urea melalui urin. Dengan demikian,

siklus urea menjadi jalur utama pembuangan nitrogen pada manusia.

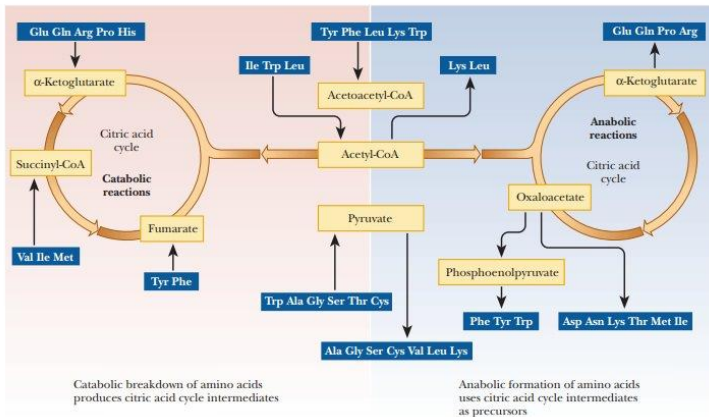
F. Anabolisme Asam Amino

Anabolisme asam amino adalah proses pembentukan atau sintesis asam amino dan protein dari senyawa yang lebih sederhana. Proses ini merupakan bagian dari metabolisme yang bersifat membangun (biosintesis) dan memerlukan energi untuk menghasilkan molekul yang lebih kompleks. Anabolisme asam amino berperan penting dalam pertumbuhan, perbaikan jaringan, pembentukan enzim, hormon, antibodi, serta berbagai komponen struktural dan fungsional tubuh. Asam amino yang tersedia akan dirangkai menjadi protein melalui proses sintesis protein yang melibatkan: 1) Transkripsi DNA menjadi mRNA; 2) Translasi mRNA di ribosom; 3) Pembentukan rantai polipeptida yang kemudian menjadi protein fungsional. Berdasarkan kemampuan tubuh untuk mensintesisnya, asam amino dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu asam amino esensial dan asam amino nonesensial.

1. Asam amino nonesensial dapat dibuat sendiri oleh tubuh melalui berbagai proses metabolisme, sehingga tidak harus diperoleh dari makanan. Kelompok ini meliputi: valin, leusin, fenilalanin, triptofan, metionin, treonin, isoleusin, lisin, dan arginin.
2. Asam amino esensial merupakan jenis asam amino yang tidak dapat disintesis oleh tubuh dalam jumlah yang memadai sehingga harus diperoleh melalui asupan makanan. Kelompok

ini meliputi: alanin, sistein, glisin, tirosin, aspartat, glutamat, prolin, serin, dan asparagin.

Metabolisme asam amino memiliki hubungan yang erat dengan siklus asam sitrat (siklus Krebs), serta senyawa penting seperti piruvat dan asetil-KoA. Siklus asam sitrat disebut sebagai jalur amfibolik karena berperan dalam dua proses sekaligus, yaitu anabolisme (pembentukan senyawa) dan katabolisme (pemecahan senyawa). Dalam proses anabolisme, beberapa senyawa antara yang dihasilkan dalam siklus asam sitrat digunakan sebagai bahan baku untuk sintesis asam amino. Sebaliknya, dalam proses katabolisme, asam amino yang jumlahnya berlebihan atau tidak dibutuhkan oleh tubuh akan mengalami proses penguraian. Kerangka karbon hasil pemecahan asam amino kemudian masuk ke dalam siklus asam sitrat sebagai sumber energi atau diubah menjadi senyawa lain yang dapat dimanfaatkan oleh tubuh, dan nitrogen yang dilepaskan dari asam amino akan diubah menjadi urea dan dikeluarkan melalui urine. Dengan demikian, siklus asam sitrat berfungsi sebagai penghubung penting antara pembentukan dan pemecahan asam amino dalam tubuh. Berikut gambar reaksi katabolik dan anabolik asam amino pada siklus asam sitrat. (Murray et al; 2009).



Gambar 8.4. Hubungan Antara Metabolisme Asam Amino Dan Siklus Asam Sitrat
(Sumber: <https://img.brainkart.com/imagebk28/4dcUFJ8.jpg>)

G. Peran Hormon Pada Protein

Berbagai hormon terlibat dalam proses metabolisme asam amino, baik dalam sintesis, degradasi, maupun pemanfaatannya oleh tubuh, antara lain:

1. Insulin

Insulin merupakan hormon yang dihasilkan oleh sel β pankreas sebagai respons terhadap meningkatnya kadar glukosa dalam darah setelah konsumsi makanan. Selain mengatur metabolisme karbohidrat, insulin juga mempunyai efek penting terhadap metabolisme protein.

2. Glukagon

Glukagon adalah hormon yang diproduksi oleh sel α pankreas. Hormon ini dilepaskan ketika kadar glukosa darah menurun, misalnya saat puasa atau kelaparan.

3. Hormon Pertumbuhan (Growth Hormone)

Produksi hormon pertumbuhan terjadi di kelenjar hipofisis anterior, dan hormon ini berperan penting dalam mendukung pertumbuhan fisik selama masa anak-anak dan remaja.

4. Kortisol

Kortisol adalah hormon steroid yang diproduksi oleh korteks adrenal. Hormon ini sering disebut sebagai hormon stres karena produksinya meningkat saat tubuh mengalami stres fisik maupun psikologis.

Tabel 8.1. Peran Hormon pada Protein

Hormon	Peran	Sifat
Insulin	Meningkatkan sintesis protein dan menghambat pemecahan protein	Anabolik
Glukagon	Meningkatkan penggunaan asam amino untuk glukoneogenesis	Katabolik
Hormon Pertumbuhan (GH)	Meningkatkan sintesis protein dan pertumbuhan jaringan	Anabolik
Kortisol	Meningkatkan pemecahan protein untuk penyediaan energi	Katabolik

Insulin dan hormon pertumbuhan berperan sebagai hormon anabolik yang meningkatkan sintesis protein dan pertumbuhan jaringan. Sebaliknya glukagon dan kortisol membantu menyediakan energi dengan meningkatkan pemanfaatan atau pemecahan protein (katabolik), terutama pada

kondisi puasa dan stres. Keseimbangan kerja hormon-hormon tersebut sangat penting untuk menjaga keseimbangan protein tubuh, mendukung pertumbuhan dan perbaikan jaringan, serta memenuhi kebutuhan energi.

H. Latihan Soal

1. Metabolisme protein adalah proses yang melibatkan beberapa tahapan dalam tubuh. Berikut yang termasuk dalam metabolisme protein adalah
 - A. Pencernaan, penyerapan, sintesis, dan pemecahan protein
 - B. Pembentukan glukosa dan penyimpanan lemak
 - C. Penyerapan vitamin dan mineral saja
 - D. Pembentukan hormon steroid saja
 - E. Penyimpanan protein di dalam jaringan adiposa
2. Pernyataan yang paling tepat mengenai peran asam amino dalam tubuh adalah
 - A. Asam amino hanya berfungsi sebagai sumber energi.
 - B. Asam amino hanya digunakan untuk pembentukan otot.
 - C. Asam amino merupakan unit penyusun protein dan dapat menjadi prekursor berbagai molekul penting seperti hormon dan neurotransmitter.
 - D. Semua asam amino harus diperoleh dari makanan.

- E. Asam amino tidak berperan dalam sintesis protein.
- 3. Sebagian besar proses absorpsi (penyerapan) asam amino hasil pencernaan protein terjadi di
 - A. Lambung
 - B. Kolon
 - C. Jejunum dan ileum
 - D. Duodenum
 - E. Rektum
- 4. Ketika jumlah asam amino dalam tubuh melebihi kebutuhan, maka asam amino tersebut akan
 - A. Disimpan dalam bentuk glikogen
 - B. Disimpan dalam bentuk protein otot secara permanen
 - C. Dibuang langsung melalui urine tanpa proses metabolisme
 - D. Mengalami katabolisme untuk menghasilkan energi atau diubah menjadi senyawa lain
 - E. Diubah menjadi vitamin
- 5. Transaminasi merupakan tahap awal katabolisme asam amino yang ditandai dengan
 - A. Pelepasan gugus amino menghasilkan amonia bebas
 - B. Pemindahan gugus amino dari asam amino ke asam keto
 - C. Pembentukan urea di hati
 - D. Perubahan glukosa menjadi asam amino
 - E. Penyimpanan asam amino dalam hati

6. Pada proses deaminasi oksidatif, glutamat akan diubah menjadi
 - A. Piruvat dan ATP
 - B. Oksaloasetat dan karbon dioksida
 - C. α -ketoglutarat dan amonia (NH_3)
 - D. Glukosa dan urea
 - E. Asetil-KoA dan asam laktat
7. Fungsi utama siklus urea dalam tubuh adalah
 - A. Mengubah glukosa menjadi glikogen
 - B. Mengubah amonia yang bersifat toksik menjadi urea yang lebih aman untuk dikeluarkan dari tubuh
 - C. Mengubah asam amino menjadi protein
 - D. Menghasilkan energi dari lemak
 - E. Menyimpan nitrogen di dalam hati
8. Pada tahap akhir siklus urea, arginin dihidrolisis untuk menghasilkan
 - A. Karbamoil fosfat dan sitrulin
 - B. Aspartat dan fumarate
 - C. Urea dan ornithin
 - D. Amonia dan karbon dioksida
 - E. Glutamat dan α -ketoglutarat
9. Mengapa siklus asam sitrat (siklus Krebs) disebut sebagai jalur amfibolik?
 - A. Karena hanya berfungsi dalam pemecahan asam amino
 - B. Karena hanya berfungsi dalam pembentukan asam amino
 - C. Karena berperan dalam pembentukan urea dan ekskresi nitrogen
 - D. Karena berfungsi dalam proses anabolisme dan katabolisme sekaligus

- E. Karena hanya menghasilkan energi dalam bentuk ATP
10. Kortisol dikategorikan sebagai hormon katabolik karena berfungsi untuk
- A. Meningkatkan sintesis protein dalam otot
 - B. Menghambat penggunaan asam amino
 - C. Meningkatkan pemecahan protein untuk penyediaan energi
 - D. Menurunkan kadar glukosa darah
 - E. Meningkatkan penyerapan asam amino oleh sel

BAB 9

BIOENERGETIKA DAN PRODUKSI ENERGI

A. Pendahuluan

Kehidupan merupakan proses yang sangat dinamis dan memerlukan pasokan energi secara terus-menerus untuk mempertahankan struktur seluler, melakukan transportasi zat, serta menjalankan kontraksi mekanis. Dalam konteks farmasi, pemahaman mengenai bagaimana sel memperoleh, mengubah, dan menggunakan energi yang dikenal sebagai Bioenergetika. Tanpa aliran energi yang teratur, fungsi fisiologis akan terhenti, yang sering kali berujung pada kondisi patologis atau kematian sel. Bioenergetika mempelajari penerapan prinsip-prinsip termodinamika dalam sistem biologis. Fokus utamanya adalah peran Adenosin Trifosfat (ATP).

1. Tujuan Pembelajaran

- a. Memahami Prinsip Termodinamika Biologi.
- b. Mengidentifikasi Senyawa Fosfat Berenergi Tinggi.
- c. Menganalisis Reaksi Oksidasi-Reduksi Biologis.
- d. Menjelaskan Rantai Transpor Elektron (RTE).
- e. Memahami Mekanisme Fosforilasi Oksidatif.
- f. Menghubungkan Bioenergetika dengan Bidang Farmasi.

2. Capaian Pembelajaran

Di akhir pembelajaran tema ini, mahasiswa akan memiliki kompetensi sebagai berikut:

- a. Mahasiswa mampu mengintegrasikan konsep termodinamika.
- b. Mahasiswa mampu menguraikan tahapan produksi energi di mitokondria secara sistematis.
- c. Mahasiswa mampu menganalisis dampak gangguan pada rantai transpor elektron terhadap homeostasis tubuh dan menjelaskan mekanisme biokimia di balik keracunan zat penghambat respirasi seluler.
- d. Mahasiswa memiliki kemampuan kritis dalam menghubungkan status energi sel dengan efikasi atau metabolisme obat-obatan tertentu (Pharmacobiochemical linkage).

B. Konsep Dasar Bioenergetika

Metabolisme adalah serangkaian reaksi yang saling terkait dan menopang kehidupan yang terjadi dalam organisme hidup. Metabolisme seluler terdiri dari jalur kimia linier dan siklik, yang sering dihubungkan oleh zat perantara bersama dan reaksi yang terhubung secara kinetik. Untuk menjaga keseimbangan kimia kehidupan, metabolisme menghubungkan reaksi spontan yang memecah molekul makanan dan melepaskan energi (katabolisme) dengan proses non-spontan yang mengonsumsi energi dan mensintesis asam nukleat, protein, karbohidrat, dan lipid (anabolisme). Oleh

karena itu, jalur metabolisme modern dibangun dari dan ditopang oleh dua fitur yang saling terkait dan komplementer: fitur biosintetik, yaitu kemampuan untuk mengubah bahan kimia sederhana dan kompleks menjadi blok bangunan biologis, dan fitur bioenergetik: kemampuan untuk menghasilkan dan mengendalikan aliran energi yang menopang sintesis tersebut (Aleksandrova & Bonfio, 2022)

C. ATP: Mata Uang Energi Sel

Metabolisme energi adalah rangkaian reaksi yang menghasilkan molekul perantara seperti ATP dan NAD(P)H, yang kita sebut agen penghubung, karena diperlukan untuk menghubungkan jalur katabolik (penghasil energi) dengan proses anabolik (pengonsumsi energi). Metabolisme tidak dapat terjadi tanpa reaksi penghubung. Sebagian besar sel hidup memperoleh energi yang mereka butuhkan dengan mengoksidasi molekul bahan bakar organik (yang pada akhirnya dihasilkan oleh fotosintesis) untuk membentuk air, CO₂, dan produk lain yang didaur ulang di lingkungan (Bettendorff, 2022).

ATP sering disebut sebagai "mata uang energi" sel. ATP berperan penting dalam sebagian besar proses transfer energi biokimia sebagai perantara antara reaksi penghasil energi dan reaksi yang membutuhkan energi, sama seperti NADH dan NADPH yang merupakan perantara dalam penggabungan redoks. ATP adalah molekul berenergi tinggi yang paling umum di dunia biologi. Secara tradisional diasumsikan bahwa hal ini karena

ATP mengandung dua ikatan fosfoanhidrida yang disebut berenergi tinggi (Bettendorff & Wins, 2026).

D. Oksidasi Biologis

Oksidasi biologis adalah proses pelepasan elektron atau hidrogen dari molekul nutrisi yang dikatalisis oleh enzim oksidoreduktase dan koenzim (seperti NAD⁺, FAD) untuk menghasilkan energi dalam sel. Enzim ini mencakup dehidrogenase, oksidase, hidroperoksidase, dan oksigenase, yang bekerja sama dalam rantai respirasi untuk memindahkan elektron ke oksigen atau akseptor lain. Dalam sistem seluler, oksidasi tidak selalu berarti penggabungan dengan oksigen, melainkan pelepasan hidrogen (dehidrogenasi) atau pelepasan elektron. Energi yang dihasilkan dari proses ini tidak dilepaskan sebagai panas yang tidak terkendali, melainkan ditangkap dalam bentuk ikatan kimia berenergi tinggi (ATP).

1. Enzim Oksidoreduktase (EC 1), mengkatalis reaksi reduksi oksidasi. Donor hydrogen atau donor electron Adalah salah satu substratnya. mengkatalisa reaksi oksidasi dan reduksi, misalnya alkohol: oksidoreduktase NAD mengkatalisa oksidasi alkohol menjadi aldehid. Enzim ini melepaskan 2 buah elektron seperti 2 buah hidrogen dari alkohol untuk menghasilkan aldehid.
2. Koenzim dalam Oksidasi Biologi, adalah molekul organik non-protein yang membantu enzim memindahkan elektron atau gugus kimia selama respirasi seluler untuk menghasilkan

energi (ATP). Koenzim utama termasuk NAD, FAD, dan Koenzim Q10, yang bertindak sebagai pembawa elektron sementara, terutama dalam siklus Krebs dan rantai transpor elektron (Mignani et al., 2021)

3. Proses Oksidasi dan Produksi Energi, dalam sistem biologi energi diperoleh melalui oksidasi molekul bahan bakar (karbohidrat, lipid, dan protein). Proses ini melibatkan pemindahan elektron dari molekul organik ke koenzim pembawa elektron (NAD^+ dan FAD), yang kemudian diteruskan ke oksigen melalui Rantai Transpor Elektron (RTE). Energi bebas yang dilepaskan selama aliran elektron ini digunakan untuk mensintesis Adenosin Trifosfat (ATP) (Nolfi-Donagan et al., 2020a).

E. Rantai Transpor Elektron (RTE)

Rantai transpor elektron merupakan komponen sentral respirasi seluler, yang bertanggung jawab untuk mentransfer elektron dari molekul donor ke akseptor akhir, disertai dengan pembentukan gradien proton untuk mendorong sintesis ATP. Pada sel otot jantung, lebih dari 95% respirasi seluler disumbangkan oleh RTE. RTE menerima elektron dari NADH dan dari suksinat, dengan NADH bertindak sebagai donor elektron awal untuk kompleks I, dan suksinat menyumbangkan elektron ke kompleks II (suksinat dehidrogenase) di mana FADH_2 berfungsi sebagai pembawa elektron internal. Sumber elektron ini

masing-masing terkait dengan siklus TCA dan β -oksidasi (Nolfi-Donagan et al., 2020b).

F. Fosforilasi Oksidatif

Fosforilasi oksidatif adalah proses seluler yang memanfaatkan reduksi oksigen untuk menghasilkan ikatan fosfat berenergi tinggi dalam bentuk adenosin trifosfat (ATP). Ini adalah serangkaian reaksi oksidasi-reduksi yang melibatkan transfer elektron dari NADH dan FADH₂ ke oksigen melalui beberapa kompleks protein, logam, dan lipid di mitokondria yang dikenal sebagai rantai transpor elektron. Rantai transpor elektron menggunakan NADH dan FADH₂ yang dihasilkan dari beberapa proses katabolik seluler. Selain itu, fosforilasi oksidatif menggunakan oksigen elemental sebagai agen pengoksidasi akhir (dan penerima elektron). Fungsi mitokondria dan rantai transpor elektron menjelaskan evolusi dan kemajuan kehidupan eukariotik aerobik, terutama jika dibandingkan dengan organisme anaerobic (Boyman et al., 2020).

Proses fosforilasi oksidatif melibatkan pemahaman konsep-konsep mendasar: elektronegativitas, sumber NADH dan FADH₂ tereduksi, dan anatomi mitokondria.

1. Elektronegativitas adalah kemampuan atom unsur untuk menarik pasangan elektron ikatan. Unsur-unsur dengan elektronegativitas tinggi dapat menarik elektron ke inti atomnya dengan lebih mudah. Fluorin dianggap sebagai unsur yang paling elektronegatif; namun,

oksigen juga sangat elektronegatif dan memiliki massa molekul rendah. Mengingat ketersediaannya yang lebih besar di atmosfer, oksigen unsur digunakan sebagai penerima elektron terakhir dalam fosforilasi oksidatif (Miranda-Quintana et al., 2016).

2. NAD⁺ (nikotinamida adenin dinukleotida) dan FAD⁺ (flavin adenin dinukleotida) adalah koenzim pembawa elektron bebas (tidak terikat membran) yang terdapat di sitoplasma sel dan matriks mitokondria. Keduanya direduksi dalam beberapa reaksi, terutama termasuk glikolisis, siklus asam trikarboksilat (asam sitrat), dan beta-oksidasi asam lemak. Reduksi NAD⁺ dan FAD⁺ menghasilkan NADH dan FADH₂ yang kaya energi yang diangkut ke mitokondria, mengirimkan elektron berenergi tinggi ke kompleks protein dalam rantai transpor elektron (Pehar et al., 2018).
3. Mitokondria terdiri dari membran dalam dan luar, keduanya tersusun dari lapisan ganda fosfolipid dan protein membran integral yang terlibat dalam aksi enzimatik dan transpor molekuler. Membran dalam memiliki proyeksi seperti lipatan yang menghadap ke dalam yang dikenal sebagai krista yang sangat meningkatkan luas permukaan membran untuk memaksimalkan jumlah produksi energi. Kompleks protein yang terlibat dalam rantai transpor elektron tersebar di sepanjang membran ini. Membran dalam menyelubungi matriks, yang menampung DNA mitokondria,

ribosom, dan sejumlah besar enzim dan metabolit. Ruang antara membran dalam dan luar dikenal sebagai ruang antar membran; ini adalah tempat pengendapan ion hidrogen untuk kompleks protein dalam rantai transpor elektron. Peningkatan konsentrasi ion hidrogen (ion H^+) (dan penurunan pH yang efektif) menghasilkan potensial membran di seluruh membran mitokondria bagian dalam (Bartolák-Suki et al., 2017).

G. Aspek Farmakologis dan Klinis

Aspek farmakologis dan klinis dari bioenergetika mencakup studi tentang bagaimana obat-obatan berinteraksi dengan proses produksi, transformasi, dan penggunaan energi seluler (terutama di mitokondria) untuk mendiagnosis, mengobati, dan mencegah penyakit.

1. Dasar Bioenergetika dalam Farmakologi

Target Terapi Mitokondria: Karena disfungsi mitokondria mendasari banyak penyakit, modulasi bioenergetik seluler menjadi pendekatan terapeutik menjanjikan untuk penyakit neurodegeneratif, kanker, dan infeksi.

Target Enzim Metabolisme: Pengembangan obat sering menargetkan enzim yang terlibat dalam metabolisme energi (misalnya, glikolisis atau rantai transpor elektron) untuk menghentikan sel yang tidak diinginkan, seperti sel kanker atau patogen (Swerdlow, 2016).

2. Aspek Klinis dan Aplikasi Terapeutik

Terapi Kanker dan Penyakit Metabolisme: Aktivasi atau penghambatan jalur energi (misalnya PKM2 pada sel kanker) dapat memperbaiki dinamika mitokondria atau menghambat pertumbuhan tumor. Penyakit Ginjal: Pemahaman bioenergetika nefron digunakan untuk mengembangkan biomarker baru dan terapi progresif untuk nefropati diabeti (Audzeyenka et al., 2022) . Penyakit Neurodegeneratif: Pendekatan terapeutik difokuskan pada perbaikan disfungsi mitokondria untuk mengatasi gangguan metabolisme energi di otak (Chevalier, 2023).

3. Farmakodinamika dan Bioenergetika

Mekanisme Kerja Obat: Farmakodinamika mempelajari bagaimana obat mempengaruhi fungsi seluler, termasuk bagaimana obat mengubah efisiensi transduksi energi dalam tubuh. Toksikologi: Pemahaman bioenergetika membantu memprediksi efek toksik obat yang mungkin mengganggu produksi ATP (Adenosin Trifosfat) seluler, yang berpotensi menyebabkan kerusakan jaringan (Suwahyuni Mus et al., 2025).

H. Latihan Soal

1. Fokus utama dari studi bioenergetika adalah...
 - A. Mempelajari struktur anatomi organ pencernaan.
 - B. Peran Adenosin Trifosfat (ATP) sebagai mata uang energi universal.

- C. Kecepatan absorpsi obat di dalam usus halus.
 - D. Sintesis protein pada retikulum endoplasma kasar.
 - E. Pengukuran kadar glukosa dalam darah secara in vitro.
2. Metabolisme yang mengonsumsi energi dan mensintesis molekul kompleks disebut sebagai...
- A. Katabolisme
 - B. Oksidasi
 - C. Anabolisme
 - D. Glikolisis
 - E. Fermentasi
3. Fungsi utama agen penghubung pada metabolisme energi adalah...
- A. Memisahkan jalur metabolisme linier dan siklik.
 - B. Menghentikan reaksi oksidasi yang terlalu cepat.
 - C. Menghubungkan jalur katabolik penghasil energi dengan proses anabolik.
 - D. Sebagai cadangan makanan permanen di dalam matriks mitokondria.
 - E. Mengatur pH sel agar tetap berada pada kondisi asam.
4. Enzim yang bertanggung jawab mengatalisis reaksi oksidasi-reduksi dengan cara memindahkan elektron atau hidrogen dari molekul nutrisi adalah...
- A. Hidrolase
 - B. Isomerase
 - C. Ligase

- D. Oksidoreduktase
 - E. Transferase
5. Molekul manakah yang bertindak sebagai donor elektron awal untuk Kompleks I pada RTE?
- A. Suksinat
 - B. FADH_2
 - C. NADH
 - D. Sitokrom C
 - E. Oksigen (O_2)
6. Struktur mitokondria berupa lipatan-lipatan pada membran dalam yang berfungsi meningkatkan luas permukaan untuk memaksimalkan produksi energi disebut...
- A. Matriks
 - B. Krista
 - C. Ribosom
 - D. Ruang antarmembran
 - E. DNA mitokondria
7. Mengapa oksigen (O_2) dipilih sebagai penerima elektron terakhir dalam proses fosforilasi oksidatif pada sistem biologi manusia?
- A. Karena oksigen memiliki elektronegativitas yang tinggi dan tersedia melimpah di atmosfer.
 - B. Karena oksigen adalah satu-satunya gas yang bisa masuk ke mitokondria.
 - C. Karena oksigen memiliki massa molekul yang paling berat di antara unsur lain.
 - D. Karena oksigen dapat mencegah terbentuknya gradien proton.
 - E. Karena oksigen berfungsi sebagai katalisator enzim sitoplasma.

8. Contoh zat yang bekerja sebagai penghambat metabolisme energi dengan menargetkan rantai transpor elektron adalah...
 - A. Parasetamol dan Ibuprofen
 - B. Sianida dan Karbon Monoksida
 - C. Amoksisilin dan Siprofloksasin
 - D. Vitamin C dan E
 - E. Glukosa dan Fruktosa
9. Pharmacobiochemical linkage adalah...
 - A. Harga obat dengan efektivitas terapinya.
 - B. Struktur kimia obat dengan kelarutannya dalam air.
 - C. Status energi sel dengan efikasi atau metabolisme obat-obatan tertentu.
 - D. Dosis obat dengan waktu paruh eliminasi di ginjal.
 - E. Efek samping obat dengan preferensi pasien.
10. Pendekatan terapeutik yang menjanjikan dengan memodulasi bioenergetika seluler ditujukan untuk penyakit berikut, kecuali...
 - A. Penyakit neurodegeneratif
 - B. Kanker
 - C. Nefropati diabetik (penyakit ginjal)
 - D. Infeksi patogen
 - E. Fraktur (patah tulang) akut

BAB 10

BIOKIMIA KLINIS DAN HUBUNGANNYA DENGAN PENYAKIT

A. Pendahuluan

1. Tujuan Pembelajaran
Mahasiswa mampu memahami biokimia klinis dan hubungannya dengan penyakit
2. Capaian Pembelajaran
Setelah mengikuti pembelajaran pada topik ini diharapkan mahasiswa mampu:
 - a. Menjelaskan dasar-dasar biokimia klinis
 - b. Menjelaskan biomarker biokimia dalam diagnosis penyakit
 - c. Menjelaskan profil biokimia untuk organ spesifik
 - d. Menjelaskan keterbatasan dan interpretasi hasil laboratorium

B. Dasar-Dasar Biokimia Klinis

Biokimia klinis merupakan cabang ilmu laboratorium kedokteran yang menerapkan prinsip-prinsip biokimia untuk diagnosis, pemantauan, dan pencegahan penyakit. Berbeda dengan biokimia umum yang berfokus pada pemahaman mekanisme molekuler kehidupan, biokimia klinis secara spesifik mengaplikasikan pengetahuan tersebut dalam konteks kesehatan manusia (Rej, 2004).

Dalam praktik klinis, pemeriksaan biokimia laboratorium menyediakan informasi penting tentang status kesehatan pasien. Hasil pemeriksaan

laboratorium mempengaruhi lebih dari 70% keputusan diagnosis dan tatalaksana medis (Abdulaziz Abdullah Felemban Latifah Khaled Ahmed Alfohaid, 2025) . Profesional laboratorium klinis bertanggung jawab melakukan pemeriksaan yang presisi dan reliabel untuk memastikan hasil akurat yang dapat diinterpretasi oleh klinisi dalam pengambilan keputusan terapi.

Tabel 10.1 Perbedaan Biokimia Umum Dan Biokimia Klinis

Aspek	Biokimia Umum	Biokimia Klinis
Fokus	Mekanisme molekuler kehidupan	Aplikasi diagnosis penyakit
Sampel	Berbagai organisme	Spesimen manusia (darah, urin, dll)
Tujuan	Pemahaman fundamental	Diagnosis, monitoring, prognosis
Output	Pengetahuan ilmiah	Hasil laboratorium klinis
Standarisasi	Variabel	Sangat terstandarisasi

Proses pemeriksaan laboratorium terdiri dari tiga fase utama:

1. Fase Pre-Analitik: Mencakup persiapan pasien, pengambilan sampel, transportasi, dan penyimpanan
2. Fase Analitik: Proses pengukuran dan analisis di laboratorium
3. Fase Post-Analitik: Validasi, interpretasi, dan pelaporan hasil

Upaya harmonisasi prosedur pre-analitik sangat penting untuk memastikan komparabilitas hasil antar laboratorium. EFLM (European Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine) telah mengembangkan pedoman untuk standarisasi prosedur pemeriksaan laboratorium di seluruh Eropa (Eric S Kilpatrick, 2018).

C. Biomarker Biokimia dalam Diagnosis Penyakit

Biomarker adalah indikator objektif yang dapat diukur dan dievaluasi sebagai penanda proses biologis normal, proses patologis, atau respons terhadap intervensi terapeutik. Dalam konteks COVID-19, berbagai systematic review dan meta-analisis telah mengkonfirmasi signifikansi biomarker dalam identifikasi pasien risiko tinggi dan prediksi luaran klinis (Semiz, 2022).

1. Enzim sebagai Biomarker

Enzim merupakan biomarker penting karena pelepasannya ke sirkulasi menandakan kerusakan sel atau jaringan spesifik:

Tabel 10.2 Biomarker Enzim Dan Kondisi Klinis

Enzim	Organ Target	Kondisi Klinis
AST (SGOT)	Hati, jantung, otot	Hepatitis, infark miokard
ALT (SGPT)	Hati	Hepatitis, kerusakan hati
ALP	Hati, tulang	Kolestasis, penyakit tulang
LDH	Multi-organ	Kerusakan jaringan umum
CK-MB	Jantung	Infark miokard akut
Troponin	Jantung	Nekrosis miokard

Penelitian menunjukkan bahwa perubahan aktivitas enzim hati (ALT, AST, ALP) dan enzim ginjal (BUN, kreatinin) dapat mengindikasikan keterlibatan hepatic dan renal dalam patofisiologi berbagai penyakit (Sonika Verma M. K. Srivastava, 2024).

2. Marker Inflamasi

Marker inflamasi sangat penting dalam menilai respons inflamasi sistemik. Pada pasien COVID-19, parameter inflamasi dan imunologis seperti C-reactive protein (CRP), prokalsitonin,

dan interleukin-6 (IL-6) menjadi biomarker esensial untuk stratifikasi risiko dan intervensi yang tepat (Semiz, 2022).

3. Marker Kardiak

Biomarker jantung mencakup troponin, CK-MB, dan myoglobin yang dapat digunakan untuk membantu identifikasi kerusakan miokard. Peningkatan troponin I dan CK-MB menandakan nekrosis kardiomyosit dan menjadi penanda penting untuk diagnosis sindrom koroner akut.

Tabel 10.3 Biomarker Utama Dan Interpretasi Klinis

Kategori	Biomarker	Nilai Normal*	Interpretasi Klinis
Hati	ALT	7-56 U/L	↑ Hepatitis, obat hepatotoksik
Hati	AST	10-40 U/L	↑ Kerusakan hati/jantung
Hati	Bilirubin Total	0.1-1.2 mg/dL	↑ Ikterus, hemolisis
Ginjal	Kreatinin	0.6-1.2 mg/dL	↑ Gangguan fungsi ginjal
Ginjal	BUN	7-20 mg/dL	↑ Uremia, dehidrasi
Jantung	Troponin I	<0.04 ng/mL	↑ Infark miokard
Jantung	CK-MB	0-25 U/L	↑ Kerusakan otot jantung
Inflamasi	CRP	<10 mg/L	↑ Infeksi, inflamasi
Lipid	Kolesterol Total	<200 mg/dL	↑ Risiko kardiovaskular

***Nilai normal dapat bervariasi antar laboratorium**

D. Profil Biokimia untuk Organ Spesifik

1. Profil Fungsi Hati (*Liver Function Test*)

Pemeriksaan fungsi hati mencakup serangkaian parameter yang mengevaluasi integritas hepatosit, kapasitas metabolik, dan fungsi ekskresi empedu.

Parameter Utama: - Transaminase (AST/ALT): Enzim intraselular yang meningkat saat terjadi kerusakan hepatosit - Alkaline Phosphatase (ALP): Meningkat pada kolestasis dan penyakit tulang - Bilirubin: Produk degradasi hemoglobin, meningkat pada gangguan ekskresi empedu - Albumin: Penanda fungsi sintesis hati

Pada pasien dengan penyakit ginjal kronik (CKD), ditemukan peningkatan signifikan enzim hati (ALT, AST) yang menunjukkan keterlibatan multi-organ dalam kondisi sistemik. Perubahan kadar ALT dan AST juga diamati pada kondisi pasca transplantasi dengan variasi bergantung pada komplikasi yang terjadi (A. Pang Wenbin Cao, 2025; Farhan, 2026).

2. Profil Fungsi Ginjal (*Renal Function Test*)

Evaluasi fungsi ginjal sangat penting mengingat peran ginjal dalam filtrasi, reabsorpsi, dan ekskresi metabolit.

Parameter Kunci: - Kreatinin Serum: Produk metabolisme kreatin otot, filtrasi glomerulus - Blood Urea Nitrogen (BUN): Produk akhir metabolisme protein - eGFR (estimated Glomerular Filtration Rate): Estimasi

laju filtrasi glomerulus - Asam Urat: Metabolit purin

Pada pasien CKD, peningkatan kreatinin, ureum, dan asam urat secara substansial dibandingkan kontrol disertai penurunan signifikan eGFR menunjukkan deteriorasi fungsi ginjal progresif (Farhan, 2026) . Nilai tekanan darah juga memiliki korelasi terbalik dengan eGFR ($r = -0.68$, $p = 0.01$), mengindikasikan hubungan erat antara hipertensi dan penurunan fungsi ginjal.

3. Profil Glukosa dan Pankreas (Diabetes Mellitus)

Diabetes mellitus adalah gangguan metabolik kronik yang ditandai dengan hiperglikemia akibat defek sekresi insulin, kerja insulin, atau keduanya (Basevi, 2011) . Hiperglikemia kronik dikaitkan dengan kerusakan jangka panjang, disfungsi, dan kegagalan berbagai organ terutama mata, ginjal, saraf, jantung, dan pembuluh darah.

Patofisiologi: Pada diabetes tipe 2, resistensi insulin dan disfungsi sel beta pankreas progresif merupakan mekanisme inti patofisiologi. Kondisi ini menyebabkan gangguan metabolisme karbohidrat, lemak, dan protein dengan manifestasi hiperglikemia persisten (A. K. Prajapati Ashish Kumar Jha, 2024).

Tabel 10.4 Biomarker Diagnostik Diabetes

Parameter	Kriteria Diagnosis	Keterangan
Glukosa Puasa (GDP)	≥ 126 mg/dL	Puasa minimal 8 jam
Glukosa	≥ 200 mg/dL + gejala	Poliuria,

Parameter	Kriteria Diagnosis	Keterangan
Darah Sewaktu		polidipsia, polifagia
OGTT 2 jam	≥ 200 mg/dL	Beban glukosa 75 gram
HbA1c	$\geq 6.5\%$	Rata-rata glukosa 2-3 bulan

HbA1c (hemoglobin terglikasi) berfungsi sebagai biomarker primer untuk menilai kadar glukosa darah rata-rata selama 2-3 bulan terakhir dan memonitor kontrol glikemik jangka panjang. Komplikasi diabetes meliputi ketoasidosis diabetikum, neuropati, nefropati, retinopati, dan penyakit kardiovaskular, dengan kontrol glikemik ketat menjadi esensial untuk meminimalkan dampaknya (A. Contini, 2025; M. A. Aldhduh Omran Ali Attir m, 2024).

Biomarker tambahan untuk evaluasi fungsi sel beta mencakup C-peptide dan HOMA (Homeostasis Model Assessment) yang memberikan informasi tentang sekresi insulin endogen dan resistensi insulin (A. K. Prajapati Ashish Kumar Jha, 2024).

4. Profil Jantung (Cardiac Profile)

Biomarker kardiak memegang peran krusial dalam diagnosis dan stratifikasi risiko penyakit kardiovaskular.

Tabel 10.5 Biomarker Kardiak Utama

Biomarker	Waktu Peningkatan	Puncak	Durasi Elevasi
Troponin I/T	3-6 jam	12-24 jam	7-14 hari
CK-MB	3-8 jam	12-24 jam	2-3 hari

Biomarker	Waktu Peningkatan	Puncak	Durasi Elevasi
Myoglobin	1-4 jam	6-9 jam	24 jam
LDH	12-24 jam	48-72 jam	10-14 hari

Troponin jantung (cTnI/cTnT) merupakan gold standard untuk diagnosis nekrosis miokard akut karena spesifisitas tinggi terhadap jaringan jantung (Matteo Antonio Sacco Helenia Mastrangelo, 2026). Marker peptida seperti BNP dan NT-proBNP memberikan informasi tambahan tentang disfungsi dan beban hemodinamik jantung.

Pada kasus COVID-19, biomarker kardiak termasuk troponin dan CK-MB telah terbukti meningkat pada pasien dengan komplikasi kardiovaskular, dikaitkan dengan mortalitas yang lebih tinggi.

E. Keterbatasan dan Interpretasi Hasil Laboratorium

1. Faktor Pre-Analitik

Fase pre-analitik merupakan sumber terbesar kesalahan laboratorium (sekitar 70%). Faktor-faktor yang mempengaruhi meliputi:

- a. Persiapan pasien: Puasa, aktivitas fisik, stres
- b. Teknik pengambilan sampel: Hemolisis, lipemia, ikterus
- c. Transportasi dan penyimpanan: Suhu, waktu, kontainer

Proteksi termal selama transportasi sampel sangat krusial untuk akurasi analitik. Validasi menunjukkan bahwa shipper dengan

perlindungan termal dapat mempertahankan stabilitas analit hingga 72 jam untuk sebagian besar aplikasi (Ulrich Y. Schaff Bradley B. Collier, 2025) . Tanpa proteksi termal, kadar hemolisis rata-rata dapat jauh melampaui ambang batas maksimum yang diizinkan untuk analyzer.

2. Variasi Biologis dan Analitik

Variasi hasil laboratorium terdiri dari:

- a. Variasi Biologis Intra-individual: Fluktuasi dalam satu individu
- b. Variasi Biologis Inter-individual: Perbedaan antar individu
- c. Variasi Analitik: Impresisi metode pengukuran

Studi EuBIVAS (European Biological Variation Study) telah menghasilkan estimasi variasi biologis berkualitas tinggi untuk 80 measurand yang berbeda, dengan hasil menunjukkan bahwa estimasi untuk beberapa analit seperti kreatinin dan troponin I lebih rendah dari yang dilaporkan sebelumnya (Anna Carobene Aasne K. Aarsand, 2021).

Tabel 10.6 Faktor Yang Mempengaruhi Akurasi Hasil Laboratorium

Fase	Faktor	Dampak
Pre-analitik	Hemolisis	Peningkatan palsu K ⁺ , LDH, AST
Pre-analitik	Lipemia	Interferensi spektrofotometri
Pre-analitik	Ikterus	Interferensi pada beberapa assay
Analitik	Autoantibodi	Hasil troponin, hormon palsu
Analitik	Makromolekul	Hormone/enzyme complexes

Fase	Faktor	Dampak
Post-analitik	Kesalahan transkripsi	Nilai salah dilaporkan

3. Prinsip Interpretasi Hasil Laboratorium

Interpretasi hasil laboratorium yang akurat memerlukan (J. Nevelos J. Nagy, 2018):

a. Korelasi Klinis Hasil laboratorium harus selalu diinterpretasi dalam konteks anamnesis, pemeriksaan fisik, dan temuan klinis lainnya. Tidak ada parameter laboratorium tunggal yang dapat secara akurat menyingkirkan atau mengkonfirmasi diagnosis tanpa korelasi klinis.

b. Nilai Rujukan yang Sesuai Pertimbangkan faktor-faktor yang mempengaruhi nilai rujukan: - Usia dan jenis kelamin - Etnis dan populasi - Kondisi fisiologis (kehamilan, puasa) - Metode pemeriksaan

Standarisasi nilai rujukan sangat penting karena masih terdapat perbedaan besar dalam metode analitik dan interval rujukan yang dapat mempengaruhi penilaian status kesehatan pasien secara signifikan (Zlata Flegar-Meštrić Sonja Perkov, 2016).

c. Reference Change Value (RCV) Perubahan hasil serial dianggap signifikan jika melebihi Reference Change Value yang memperhitungkan variasi biologis dan analitik:

$$RCV = \sqrt{2} \times Z \times \sqrt{(CV_a^2 + CV_i^2)}$$

Dimana: - CV_a = Koefisien variasi analitik -
 CV_i = Koefisien variasi biologis intra-individual - Z = Nilai Z untuk tingkat kepercayaan (1.96 untuk 95%)

4. Pendekatan Integratif

Sistem pendukung keputusan klinis berbasis machine learning semakin berperan dalam kedokteran laboratorium. Sistem ini dapat membantu profesional kesehatan dalam interpretasi hasil tes di seluruh fase pre-analitik, analitik, dan post-analitik. Namun, integrasi sistem ini menghadirkan tantangan seperti potensi ketidakpastian, algoritma "black-box", dan de-skilling profesional kesehatan.

Tabel 10.7 Ringkasan Interpretasi Profil Biokimia

Profil	Parameter Utama	Penyakit Terkait	Pertimbangan
Hati	ALT, AST, ALP, Bilirubin	Hepatitis, sirosis, kolestasis	Rasio AST/ALT penting
Ginjal	Kreatinin, BUN, eGFR	CKD, AKI, nefropati	Perhatikan massa otot
Diabetes	GDP, HbA1c, C-peptide	DM tipe 1, 2, gestasional	Kontrol jangka panjang
Jantung	Troponin, CK-MB, BNP	ACS, gagal jantung	Serial testing penting
Lipid	TC, LDL, HDL, TG	Dislipidemia aterosklerosis	Puasa diperlukan untuk TG

F. Latihan Soal

1. Seorang pasien laki-laki usia 45 tahun datang ke instalasi gawat darurat dengan keluhan nyeri perut hebat di kuadran kanan atas, disertai mual dan demam ringan. Dokter menganjurkan pemeriksaan laboratorium untuk menilai fungsi hati. Apa yang paling tepat menjadi dasar interpretasi hasil biokimia klinis dalam kasus ini?
 - A. Menilai status nutrisi pasien secara keseluruhan
 - B. Mengukur kadar glukosa darah sebagai indikator diabetes
 - C. Mengidentifikasi keberadaan enzim hati yang mengalami peningkatan
 - D. Menentukan keberadaan infeksi bakteri dalam darah
 - E. Mengukur jumlah sel darah putih sebagai reaksi radang
2. Dalam praktik laboratorium, seorang mahasiswa teknologi laboratorium medis (labtech) menemukan hasil tes enzim serum yang tidak sesuai dengan nilai patokan. Ia bingung karena hasil tersebut bisa menunjukkan gangguan hati, ginjal, atau otot. Apa yang paling tepat menjadi pendekatan awal dalam biokimia klinis?
 - A. Mengulangi semua tes tanpa perubahan metode
 - B. Memeriksa riwayat medis, gejala klinis, dan faktor risiko pasien
 - C. Langsung memberi tahu dokter bahwa pasien pasti menderita penyakit hati

- D. Mengabaikan hasil dan berharap nilai normal muncul di pengujian berikutnya
 - E. Menggunakan hasil yang lebih tinggi sebagai dasar diagnosis
3. Seorang perempuan usia 55 tahun dengan riwayat hipertensi dan diabetes melitus tipe 2 mengalami nyeri dada yang menjalar ke lengan kiri. Pemeriksaan laboratorium menunjukkan peningkatan troponin I. Apa makna peningkatan biomarker tersebut dalam kasus ini?
- A. Menunjukkan kerusakan sel otot rangka
 - B. Menandakan kerusakan jaringan ginjal
 - C. Mengindikasikan kerusakan miokardium akibat infark miokard
 - D. Menjadi tanda infeksi sistemik
 - E. Menunjukkan gangguan metabolisme karbohidrat
4. Seorang pasien dengan riwayat asma kronis yang baru saja menjalani operasi terbuka mengalami kegagalan pernapasan dan peningkatan kadar kreatinin serum. Pemeriksaan tambahan menunjukkan peningkatan LDH. Peningkatan LDH pada kondisi ini paling mungkin disebabkan oleh:
- A. Kerusakan sel hati akibat obat anestesi
 - B. Kegagalan ginjal akut karena iskemia
 - C. Hipoksemia menyebabkan kerusakan sel otot dan jaringan
 - D. Disfungsi kelenjar tiroid
 - E. Kerusakan saluran pencernaan akibat obat

5. Dalam kasus pasien dengan gangguan hati akut, pemeriksaan biokimia menunjukkan peningkatan AST, ALT, dan bilirubin. Apa fungsi utama dari AST dan ALT dalam klinis?
- A. Mengukur kadar insulin dan sekresi pankreas
 - B. Menilai fungsi ginjal melalui urea dan kreatinin
 - C. Menandai kerusakan sel hati dan regenerasi jaringan
 - D. Menunjukkan kadar elektrolit dalam darah
 - E. Mengindikasikan kekurangan vitamin B12
6. Seorang pasien pria 60 tahun mengalami edema tungkai bawah dan penurunan produksi urin. Pemeriksaan darah menunjukkan nilai BUN = 45 mg/dL dan kreatinin serum = 3,8 mg/dL. Apa yang paling tepat disimpulkan dari profil biokimia ini?
- A. Gangguan fungsi hati akut
 - B. Gangguan fungsi ginjal kronik
 - C. Hiperglikemia berat
 - D. Hipertensi maligna
 - E. Gangguan kardiovaskular akut
7. Seorang wanita usia 40 tahun dengan riwayat diabetes melitus tipe 2 menjalani pemeriksaan rutin. Hasil pemeriksaan menunjukkan kadar glukosa puasa 165 mg/dL, HbA1c 8,5%, dan trigliserida 280 mg/dL. Apa kondisi klinis yang paling mungkin berkaitan dengan profil biokimia ini?
- A. Sindrom metabolik
 - B. Penyakit Addison

- C. Penyakit Kawasaki
 - D. Hipotiroidisme
 - E. Hipokortisolisme
8. Seorang atlet muda berusia 22 tahun mengalami kelelahan dan nyeri otot setelah latihan intensif. Hasil pemeriksaan menunjukkan kenaikan signifikan CK-MB dan troponin. Apa yang paling mungkin menjadi alasan peningkatan ini?
- A. Infark miokard karena aterosklerosis
 - B. Kerusakan otot rangka akibat olahraga berat
 - C. Penyakit jantung bawaan
 - D. Disfungsi jantung kongestif
 - E. Infeksi viral jantung (miokarditis)
9. Seorang pasien laki-laki berusia 30 tahun dengan hasil pemeriksaan darah menunjukkan ALT = 120 U/L. Hasil ini dipicu oleh penggunaan obat anti-inflammatory (NSAIDs) dan riwayat minum alkohol moderat. Apa yang paling tepat dilakukan dalam interpretasi hasil ini?
- A. Mendiagnosis hepatitis akut tanpa evaluasi lebih lanjut
 - B. Mengabaikan hasil karena angka masih dalam batas normal
 - C. Mengevaluasi riwayat obat, alkohol, dan faktor klinis lainnya
 - D. Langsung menghentikan semua obat tanpa konsultasi dokter
 - E. Menganggap hasil ini hasil kebohongan laboratorium

10. Seorang pasien dengan gejala dehidrasi parah mengalami peningkatan kreatinin serum. Namun, setelah rehidrasi intravena, kreatinin turun ke normal. Apa yang paling tepat ditafsirkan dari fenomena ini?
- A. Penyakit ginjal kronis telah sembuh
 - B. Peningkatan kreatinin bersifat sementara karena dehidrasi
 - C. Tanda bahwa pasien menderita glomerulonefritis
 - D. Gejala awal kanker ginjal
 - E. Kerusakan saluran pencernaan akibat obat

DAFTAR PUSTAKA

- A. Contini, E. M. S. C. (2025). FISIOPATOLOGIA DO DIABETES MELLITUS. Revista Ft. <https://doi.org/10.69849/revistaft/pa10202502240634>
- A. K. Prajapati Ashish Kumar Jha, D. S. (2024). Biomarkers in diabetes mellitus: Advancements, challenges, and future perspectives. IP International Journal of Comprehensive and Advanced Pharmacology. <https://doi.org/10.18231/j.ijcaap.2024.012>
- A. Pang Wenbin Cao, X. C. L. S. X. Z. S. C. Y. Z. Y. S. E. J. (2025). Efficacy of iptacopan in treatment of transplant-associated thrombotic microangiopathy (TA-TMA) post-allogeneic hematopoietic stem cell transplantation: A case series analysis. Blood. <https://doi.org/10.1182/blood-2025-6648>
- Abdulaziz Abdullah Felemban Latifah Khaled Ahmed Alfohaid, S. A.-G. A. M. A. M. S. A. S. A. M. S. H. S. S. A. S. B. A. (2025). The Role of Clinical Laboratory Professionals and Diabetes Educators in Enhancing Diagnostic Accuracy and Patient Outcomes in Diabetes Management. Saudi Journal of Medical and Pharmaceutical Sciences. <https://doi.org/https://doi.org/10.36348/sjmps.2025.v11i07.020>

- Ahern, Rajagopal, T. (2014). Biochemistry Free For All. Toxicological Sciences, 137(2), 54–74. https://academic.oup.com/toxsci/article/1676330/Table_of_Contents
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2022). Molecular biology of the cell (7th ed.). Garland Science.
- Anna Carobene Aasne K. Aarsand, W. A. B. A. C. J. D. P. F. E. G. N. J. M. L. M. P. S. S. F. C. (2021). The European Biological Variation Study (EuBIVAS): a summary report. Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM). <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/cclm-2021-0370>
- Asriati, Hasan, H., Rahayu, M., Irnawati, Nasruddin, N. I., Syarifin, A. N. K., Wiralis, Nurhayati, E., Widiyanti, F. L., Abdulkadir, W. S., Baeda, A. G., & Yulianti, E. (2023). Biokimia Dasar. Eureka Media Aksara.
- Basevi, V. (2011). Diagnosis and Classification of Diabetes Mellitus. Diabetes Care. <https://doi.org/10.2337/dc11-S062>
- Baynes, J. W., & Dominiczak, M. H. (2019). Medical biochemistry (5th ed.). Elsevier.
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., Gatto, G. J., & Stryer, L. (2019). Biochemistry (9th ed.). W.H. Freeman and Company.

- Bode, L. (2012). Human milk oligosaccharides: Every baby needs a sugar mama. *Glycobiology*, 22(9), 1147–1162.
- Burtis, C. A., Bruns, D. E., & Rifai, N. (2023). *Tietz fundamentals of clinical chemistry and molecular diagnostics* (9th ed.). Elsevier.
- Campbell, N. A., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2020). *Campbell biology* (12th ed.). Pearson.
- Cech, T. R., & Steitz, J. A. (2021). The noncoding RNA revolution—Trashing old rules to forge new ones. *Cell*, 157(1), 77–94. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.09.020>
- Corley, M., Burns, M. C., & Yeo, G. W. (2021). The expanding universe of ribonucleoproteins. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 22(9), 641–656. <https://doi.org/10.1038/s41580-021-00391-8>
- Cox, M. M. (2022). *Lehninger Biochemistry: Core Concepts and Applications* (2nd ed.). New York: Macmillan Learning.
- Doudna, J. A. (2020). The promise and challenge of therapeutic genome editing. *Nature*, 578, 229–236. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1978-5>
- Dumitriu, S. (Ed.). (2004). *Polysaccharides: Structural Diversity and Functional Versatility*. New York: Marcel Dekker.

- Eric S Kilpatrick, S. S. (2018). An overview of EFLM harmonization activities in Europe. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/cclm-2018-0098>
- Fanani, SN. (2025). Peran enzim dalam proses metabolisme seluler pada tumbuhan.
- Farhan, A. O. (2026). Assessment of the Factors Influencing the Procession of Chronic Kidney Disease and their Relationship with Biochemical Markers and Blood Pressure. *Open Access Research Journal of Chemistry and Pharmacy*. <https://doi.org/10.53022/oarjcp.2026.8.1.0011>
- Febrina, R. A., Ginting, W. M., Sipahutar, D. M. B., & Sipayung, A. R. (2024). Identifikasi asam amino dan protein pada bahan makanan dengan menggunakan uji ninhidrin dan uji biuret. *Sains Indonesiana: Jurnal Ilmiah Nusantara*, 2(3), 10–15.
- Ferdinal, F. (2005). Enzim: Peranan Biologik , Transformasi Ganas dan Transduksi Sinyal. *Ebers Papyrus*, 11(1), 1–16.
- Ferrier, D. R. (2022). *Lippincott illustrated reviews: Biochemistry* (8th ed.). Wolters Kluwer.
- Garrett, R. H., & Grisham, C. M. (2017). *Biochemistry* (6th ed.). Cengage Learning.
- Geoffrey M Cooper. (2018). *The Cell: A Molecular Approach*.
- Hanum, G. R. (2017). *Biokimia dasar*. UMSIDA Press.

- Haoxing, Z., & System, C. (2018). Marks' Basic Medical Biochemistry.
- Hawley, J. A., Hargreaves, M., Joyner, M. J., & Zierath, J. R. (2014). Integrative biology of exercise. *Cell*, 159 (4), 738 – 749.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25417152>
- Hsu, P. D., Lander, E. S., & Zhang, F. (2020). Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering. *Cell*, 157(6), 1262–1278.
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.05.010>
- Ischak, N. I., Salimi, Y. K., & Botutihe, D. N. (2017). Buku Ajar: Biokimia Dasar. UNG Press.
- J. Nevelos J. Nagy, I. G. L. S. É. A. A. F. K. P. (2018). 59th National Congress of the Hungarian Society of Laboratory Medicine. Clinical Chemistry and Laboratory Medicine.
<https://doi.org/10.1515/cclm-2018-0718>
- Jackson, S. P., & Bartek, J. (2022). The DNA-damage response in human biology and disease. *Nature*, 461, 1071–1078.
<https://doi.org/10.1038/nature08467>
- Jasman, & Lawa, Y. (2017). Biokimia 1. PMIPA Press
- Jonesti, W. P. (n.d.). Enzim dan Aplikasinya.
- Julianto, T. S. (2015). Biokimia: Biomolekul Dalam Perspektif Al-Qur'an. Deepublish
- Juniarti. (2023). Mesin Molekuler Penggerak Kehidupan. Universitas YARSI

- Krebs, J. E., Goldstein, E. S., & Kilpatrick, S. T. (2020). Lewin's genes XII. Jones & Bartlett Learning.
- Lieberman, M., & Peet, A. (2018). Marks' basic medical biochemistry: A clinical approach (5th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Lodish, H., Berk, A., Kaiser, C. A., Krieger, M., Bretscher, A., Ploegh, H., Amon, A., & Scott, M. P. (2021). Molecular cell biology (9th ed.). W.H. Freeman.
- Lucia, A., Ruiz, J. R., Santalla, A., Nogales-Gadea, G., Rubio, J. C., García-Consuegra, I., Cabello, A., Pérez, M., Teijeira, S., Vieitez, I., Navarro, C., & Arenas, J. (2008). Genotypic and phenotypic features of McArdle disease: Insights from the Spanish national registry. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 79(3), 322–324. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22250184/>
- M. A. Aldhduh Omran Ali Attir m, J. M. H. A. A. I. I. (2024). Evaluation of Continuous Subcutaneous Insulin Infusion (CSII) as an Alternative Therapy for Type 1 Diabetes in Paediatric Patients: A Focus on HbA1c Levels. *Academic Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.64095/ajst.v4i1.83>
- Maliki Interdisciplinary Journal (MIJ) Volume 3, 2025
- Mardhatilah, D. (2017). *Biokimia*. Instiper Press. ISBN 978-602-61922-8-8.
- Martínez-Reyes, I., & Chandel, N. S. (2020). Mitochondrial TCA cycle metabolites control physiology and disease. *Nature Communications*,

11(1), 102.
<https://www.nature.com/articles/s41467-019-13668-3>

Matteo Antonio Sacco Helenia Mastrangelo, G. N. I. A. (2026). Post-Mortem Biomarkers in Sudden Cardiac Death: From Classical Biochemistry to Molecular Autopsy and Multi-Omics Forensic Approaches. *International Journal of Molecular Sciences*.

<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijms27020670>

McKee, T., & McKee, J. R. (2019). *Biochemistry: The molecular basis of life* (7th ed.). Oxford University Press.

Mohammad, S. (2012). *BIOKIMIA ENZIM*. Widiya Medika Mokodongan, R. S., Rokot, A., Sulasmi, Astuti, S. I., Pinontoan, S. P. M., Latifah, A., Muawanah, Fajri, H., Maretha, D. E., Doloking, H., Safitri, W., & Habibah, N. (2025). *Biokimia*. PT Media Pustaka Indo.

Murray, R. K., Bender, D. A., Botham, K. M., Kennelly, P. J., Rodwell, V. W., & Weil, P. A. (2021). *Harper's illustrated biochemistry* (32nd ed.). McGraw-Hill Education.

Nelson, D.L., & Cox, M.M. (2021). *Lehninger principles of biochemistry* (8th ed.). W.H. Freeman and Company

Nurdiana, 2022, *Fisiologi Tumbuhan*, Prenana, Jakarta

- Nurkhozin, M. S. (2017). Biokimia Enzim dan Metabolisme karbohidrat . Penerbit andi Yokyakarta
- Nurwahidah, A. T., Kumalasari, M. R., Subakir, Irmawan, M., Jumrah, E., Damayanti, P. N., Ikhsan, M., Chuchita, Rahmania, T. A., Oksal, E., Sari, F. D., Priastomo, Y., Pereiz, Z., & Utami, N. (2024). Dasar-dasar biokimia. CV. Science Tech Group.
- Palilingan, S. C. (2026). Struktur dan fungsi biomolekul: Asam amino dan protein. Tahta Media. ISBN 978-634-262-122-6.
- Petersen, M. C., Vatner, D. F., & Shulman, G. I. (2017). Regulation of hepatic glucose metabolism in health and disease. *Nature Reviews Endocrinology*, 13(10), 572–587. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28731034>
- Rafi, M. D. (2017). Textbook of Medical Biochemistry. New Delhi: Elsevier India.
- Reece, J.B. et al. (2010) CAMPBELL BIOLOGY. 9th edn. Edited by B. Wilbur. New York: Benjamin Cummings.
- Rej, R. (2004). Clinical Chemistry through Clinical Chemistry: A Journal Timeline. *Clinical Chemistry*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1373/clinchem.2004.042820>
- Robert K Murray, Daryl K Granner. Petter A Mayes, V. W. R. (1997). Biokimia Harper.

- Rodwell, V. W., Bender, D. A., Botham, K. M., Kennelly, P. J., & Weil, P. A. (2021). Harper's illustrated biochemistry (32nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Rui, L. (2014). Energy metabolism in the liver. *Comprehensive Physiology*, 4(1), 177–197. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24692138>
- Sadikin, HM. cetakan 2012, Biokimia Enzim, Widya Medika Jakarta
- Satyanarayana, U. et al. (2016). Biochemistry (4th edition). Elsevier, 4(1), 1–1568.
- Semiz, S. (2022). COVID19 biomarkers: What did we learn from systematic reviews? *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.1038908>
- Sonika Verma M. K. Srivastava, J. T. A. K. S. B. R. S. A. R. S. S. (2024). Investigation of Hepatozoon Canis Related Alterations in the Haemato Biochemical Profile of Dogs. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*. <https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i91333>
- Spinelli, J. B., & Haigis, M. C. (2018). The multifaceted contributions of mitochondria to cellular metabolism. *Nature Cell Biology*, 20(7), 745–754. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29950572>
- Statello, L., Guo, C. J., Chen, L. L., & Huarte, M. (2021). Gene regulation by long non-coding RNAs and its biological functions. *Nature Reviews Genetics*,

- 22, 96–118. <https://doi.org/10.1038/s41576-020-00315-9>
- Stryer, L., Berg, J. M., Gatto, G. J., Jr., & Tymoczko, J. L. (2019). *Biochemistry* (9th ed.). W.H. Freeman.
- Sukaryawan, M., & Sari, D. K. (2022). *Buku Ajar Biokimia 1 Berbasis Konstruktivisme 5 Fase Needham*. Bening Media Publishing.
- Sumarlin, L. O. (2023). *Biokimia: Dasar-dasar biomolekul dan konsep metabolisme*. PT Raja Grafindo Persada.
- Sumbono, A. (2021). *Enzim:Seri Biokimia Pangan Dasar* (Vol. 1, Number 0). DeepPublish, yogyakarta
- Ulrich Y. Schaff Bradley B. Collier, G. I. M. P. N. T. J. R. W. B. M. C. R. P. G. G. J. S. (2025). Validation of a Reusable, Thermally Protective Specimen Shipper for Decentralized Sample Collections. *The Journal of Applied Laboratory Medicine*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/jalm/jfaf052>
- Umar, C. B. P. (2023). Penyuluhan tentang pentingnya peranan protein dan asam amino bagi tubuh di Desa Negeri Lima. *Jurnal Pengabdian Ilmu Kesehatan (JPIKES)*,1(3),52-56. <https://doi.org/10.55606/jpikes.v1i3.1412>
- Varki, A., Cummings, R. D., Esko, J. D., Stanley, P., Hart, G. W., Aebi, M., et al. (2022). *Essentials of Glycobiology* (4th ed.). Cold Spring Harbor Laboratory Press.

- Vasudevan, D., S, S., & Vaidyanathan, K. (2005). Text book of medical laboratory technology. Metabolism of carbohydrates. (Jaypee Brothers Medical publisher) Sixth edition.
- Voet, D., Voet, J. G., & Pratt, C. W. (2019). Fundamentals of Biochemistry: Life at the Molecular Level. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Wahyudiati, D. (2017). Biokima. LEPPIM Mataram
- Wahyuni, S. (2017). Biokimia Enzim Dan Karbohidrat. UnimalPress
- Widawati. (n.d.). ILMU GIZI : Teori dan aplikasinya dalam kehidupan sehari-hari. (Pencernaan dan Metabolisme Zat Gizi). CV MMFFAST Publishing. Sawahlunto
- Wiener, D., & Schwartz, S. (2021). The epitranscriptome beyond m6A. *Molecular Cell*, 78(1), 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2020.12.014>
- Wisnuwati. (2019). Peran enzim dalam metabolisme tumbuhan.
- Wood, E. J. (1996). Harper's biochemistry 24th edition. In *Biochemical Education* (Vol. 24, Number 4). [https://doi.org/10.1016/s0307-4412\(97\)80776-5](https://doi.org/10.1016/s0307-4412(97)80776-5)
- Yanza, Y. R., Ramadhani, F., & Syarifah, H. (2023). Buku Ajar: Pengantar Biokimia. Ruang Karya Bersama.
- Yuanita, E., Aini, D. M., & Ningsih, B. N. S. (2025). Pengantar Ilmu Biokimia: Asam, Protein, Asam Nukleat Dan Enzim. LPPM Unram Press.

- Yuanita, E., Ningsih, B. N. S., Septiyana, M., Nizam, A., Wardani, D. I., & Ramadhani, R. A. (2025). Pengantar ilmu biokimia (Asam, protein, asam nukleat dan enzim). LPPM Unram Press. ISBN 978-623-8331-11-6.
- Zlata Flegar-Meštrić Sonja Perkov, A. R. (2016). Standardization in laboratory medicine: Adoption of common reference intervals to the Croatian population. *World Journal of Methodology*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5662/wjm.v6.i1>.

BIOGRAFI PENULIS

1. Dr. Dian Wuri Astuti, S.Si., M.Sc., CIRR



Lahir di Bantul, 28 April 1985. Penulis telah menyelesaikan pendidikan S1, S2, dan S3 di Kimia MIPA Universitas Gadjah Mada. Saat ini, penulis bekerja sebagai dosen di STIKES Guna Bangsa Yogyakarta. Penulis aktif dalam kegiatan Tri Dharma Perguruan Tinggi dengan rekam jejak publikasi hasil penelitian dan pengabdian masyarakat pada ID Scopus: 57201806604, ID Orcid: 0000-0001-9221-867X, ID Sinta: 258738

Karya Tulis:

1. Buku Biokimia: Senyawa Utama dalam Metabolisme
2. Buku Prediksi Soal UKOM Ahli TLM
3. Buku Implementasi dan Problematika Merdeka Belajar
4. Bunga Rampai Analisis Toksikologi dan Pemeriksaan NAPZA
5. Toksikologi Logam Berat: Dampak, Deteksi, dan Penanggulangannya dalam Kesehatan Lingkungan
6. Bunga Rampai Karya Inovasi Rekayasa Teknologi Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi

2. Khafsah Sangadah, M.Biomed.



Penulis adalah dosen pada Program Studi Gizi, Fakultas Psikologi dan Kesehatan, Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang (2025-sekarang). Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) Kimia dan (S2) Ilmu Biomedik konsentrasi Biokimia di Universitas Indonesia. Bidang minat dan keahliannya meliputi biokimia, biologi molekuler, metabolisme, serta penerapannya dalam bidang kesehatan dan gizi.

3. **Vicha Nur Fatanah, S.Si., M.Biomed,**



Penulis adalah dosen di Jurusan STR Teknologi Laboratorium Medis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Mandala Waluya. Lahir dan berdomisili di Kendari, saya memfokuskan karier akademik saya pada pengembangan ilmu kesehatan di bidang Biokimia Medis.

Pendidikan sarjana saya selesaikan di jurusan Kimia Universitas Halu Oleo (2013), kemudian melanjutkan studi magister dalam bidang Ilmu Biomedik di Universitas Gadjah Mada (2018).

Sebagai akademisi, saya berdedikasi untuk mengintegrasikan keahlian biokimia dalam pendidikan dan riset laboratorium medis guna mencetak tenaga kesehatan yang kompeten. Saya terbuka untuk kolaborasi penelitian yang berfokus pada analisis biokimia klinis dan pengembangan diagnostik kesehatan.

4. **Masfah Raudlotus Shofiyyah, S.Si., M.Si**



Masfah Raudlotus Shofiyyah, S.Si., M.Si lahir di Gresik pada 28 Oktober 1993. Ia menyelesaikan pendidikan S1 dan S2 Kimia di Universitas Airlangga. Saat ini, beliau berprofesi Dosen DIV Teknologi Laboratorium Medis

Universitas Sunan Gresik. Ia memiliki pengalaman dalam bidang pendidikan, penelitian, dan pengembangan ilmu laboratorium medis, fokus keahliannya meliputi analisis kimia, kimia kesehatan, toksikologi, serta aplikasi biomedis. Selain aktif dalam kegiatan akademik, ia juga berkontribusi dalam pengembangan bahan ajar, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat.

Karya Tulis:

1. Buku Ajar Keracunan dan Pemeriksaan Sianida
2. Buku Ajar Instrumentasi Laboratorium Medik
3. Buku Ajar Pengantar Laboratorium Medik
4. Modul Praktikum Instrumentasi Laboratorium Medik

5. **Dra, Dewi Kurniasih, M.Pd**



Lahir di Wonosobo Jawa Tengah pada 31 Agustus 1967. Menyelesaikan pendidikan S1 di jurusan Pendidikan MIPA dan S2 di Jurusan Teknologi Pendidikan MIPA Universitas Jambi.

Sampai saat ini penulis berprofesi sebagai Dosen di Jurusan Teknologi Laboratorium Medis Poltekkes Kemenkes Jambi. Penulis aktif dalam kegiatan Tri Dharma Perguruan tinggi. Selain dalam kegiatan akademik, penulis juga aktif berkontribusi dalam pengembangan bahan ajar.

Karya Tulis:

1. Bahan Ajar Kimia Organik
2. Bunga Rampai Biokimia
3. Bunga Rampai keseimbangan cairan elektrolit dan asam basa
4. Bunga Rampai Epidemiologi Lingkungan
5. Buku Kimia Dasar Sebuah Pendekatan Praktis dan Penyelesaian Soal Secara Komprehensif
6. Bunga Rampai K3
7. Bunga Rampai Toksikologi
8. Bunga Rampai Kimia Analisa

6. Muslina, S.Pd, S.Tr.Kes, M.Si



Lahir di Kenali Asam, 15 April 1973. Menyelesaikan pendidikan D4 STR di Poltekkes Kemenkes Jambi (lulus tahun 2025), S1 Biologi di Universitas Jambi (lulus tahun 2006), dan S2 Ilmu Lingkungan di Universitas Jambi (lulus tahun 2017). Sejak tahun 2018 s/d 2026 penulis sebagai dosen di Teknologi Laboratorium Medis Poltekkes Kemenkes Jambi.

7. **Erisa Febriyani,M.Si**



Lahir di Jambi, pada 24 Februari 1993. Menyelesaikan pendidikan S1 di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya dan S2 . di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Pertanian Bogor. Penulis pernah bekerja di Laboratorium Kesehatan Daerah Provinsi Jambi (2016), bekerja sebagai dosen di Poltekkes Kemenkes Jambi (2019-2021), Bekerja sebagai dosen di Poltekkes Kemenkes Palembang (2022-sekarang). Penulis aktif dalam kegiatan pengajaran, penelitian dan pengabdian kepada masyarakat serta seminar dan workshop di bidang kesehatan. Alamat email penulis erisa@poltekkespalembang.ac.id

Karya Tulis:

1. Buku Ajar Toksikologi

8. Rina Setyawati, S.Si., M.Pd



Pendidikan Iulusan S1 Kimia dari Universitas Sebelas Maret, Surakarta. Lulusan S2 Pendidikan Sains (konsentrasi: Kimia) dari Universitas Sebelas Maret, Surakarta. Bekerja di Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan KESOSI Jakarta sebagai Dosen. Email: rinasetya99@gmail.com

Karya Tulis:

1. Buku: Dasar-Dasar Kimia Analitik Untuk mahasiswa.
2. Buku: Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di Laboratorium Rumah Sakit.
3. Buku: Analisis Toksikologi Dan Pemeriksaan Napza.
4. Buku: Biokimia Klinik.

9. Renditya Ismiyati



Lahir di Pandeglang dan menempuh pendidikan Magister Farmasi di Universitas Islam Indonesia dengan fokus pada ilmu farmasi, khususnya Farmakologi - Bahan Alam.

Ketertarikannya pada penelitian tanaman obat mendorongnya untuk mendalami aspek farmakologi molekuler, toksikologi, serta interaksi obat herbal. Sebagai peneliti muda, Saya aktif dalam berbagai kegiatan akademik dan penelitian, serta memiliki minat untuk mengembangkan ilmu pengetahuan terkait pemanfaatan obat tradisional menjadi fitofarmaka yang aman, efektif, dan terstandar. Penulis bercita-cita dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan ilmu kefarmasian di Indonesia, khususnya dalam bidang Farmakologi-Bahan Alam.

10. Dr. Ratna Puspita, S.Si., M.Si.



Penulis menyelesaikan Program Doktor Ilmu Biomedik, Fakultas Kedokteran di Universitas Indonesia dengan disertasi terkait Stem Cells (sel punca) pada Juli 2025. Ratna menyelesaikan Pendidikan Program S1 di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Brawijaya dan S2 di Jurusan Biokimia FMIPA Institut Pertanian Bogor. Ratna merupakan dosen tetap Biokimia di Program Studi S1 Pendidikan Kedokteran, Fakultas Kedokteran, UPN Veteran Jakarta sejak 2020.

Selain sebagai dosen, Ratna juga aktif sebagai penyelia halal dan auditor halal (BNSP certified). Ratna juga merupakan instruktur (BNSP certified) pelatihan penyelia halal dan auditor halal di LPK Halal Institute. Ratna aktif sebagai Pendamping Proses Produk Halal (PPH). Kegiatan penelitian dan pengabdian masyarakat Ratna dapat diakses di laman Google Scholar "Ratna Puspita UPNVJ". E-mail: ratnapuspita@upnvj.ac.id

BIOGRAFI EDITOR

Wiwin Aprianie, S.Pd., M.Si



Editor merupakan akademisi dan peneliti di bidang kimia, biokimia, serta teknologi laboratorium medis. Berbekal pendidikan Sarjana Pendidikan Kimia dan Magister Kimia dengan peminatan Biokimia, editor telah mengembangkan kompetensi di bidang biokimia medik, kimia klinik, mikrobiologi, toksikologi, serta penelitian laboratorium. Saat ini, editor aktif sebagai dosen Program Studi Diploma III Analis Kesehatan di STIKes Borneo Cendekia Medika serta menjalankan berbagai kegiatan pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat.

Selain aktif dalam kegiatan pengajaran, editor juga memiliki pengalaman yang luas dalam penelitian dan publikasi ilmiah. Fokus penelitian editor meliputi biokimia, mikrobiologi, enzimologi, bahan alam, kimia klinik, serta pemanfaatan sumber daya hayati sebagai alternatif pengembangan teknologi kesehatan. Komitmen editor dalam pengembangan ilmu pengetahuan diwujudkan melalui keterlibatan dalam berbagai penelitian hibah nasional yang didanai oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, baik sebagai ketua maupun anggota tim peneliti.

Dalam perjalanan akademiknya, editor dipercaya sebagai ketua penelitian hibah nasional pada tahun 2026 melalui penelitian mengenai isolasi dan identifikasi bakteri asam laktat dari kombucha buah senduduk yang berpotensi sebagai inhibitor glukosidase secara in vitro. Selain itu, editor juga terlibat sebagai anggota pada berbagai penelitian hibah yang mengkaji pemanfaatan ekstrak tanaman lokal sebagai pewarna histopatologi alternatif serta eksplorasi minyak atsiri sebagai agen antibakteri. Editor juga aktif berperan sebagai reviewer pada Jurnal Borneo Cendekia Medika sejak tahun 2025.

Di bidang penelitian dan publikasi ilmiah, editor produktif menghasilkan berbagai karya yang dipublikasikan pada jurnal nasional maupun internasional. Topik penelitian yang dikembangkan meliputi produksi dan karakterisasi enzim lipase, isolasi bakteri lipolitik untuk produksi biodiesel, profil lipid pada pasien stroke, skrining kesehatan masyarakat, kadar asam urat, serta berbagai kajian biokimia dan kimia klinik. Karya ilmiah editor dipublikasikan pada berbagai jurnal bereputasi sebagai bentuk kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang kesehatan dan laboratorium medis.

Selain aktif sebagai peneliti, editor juga produktif menghasilkan buku ajar dan buku referensi di bidang laboratorium medis. Beberapa karya yang telah diterbitkan antara lain Biokimia Medik, Biokimia Medik dan Kimia Klinik, Laboratorium Patologi Klinik, Kimia Zat

Toksik, Biokimia Dasar untuk Mahasiswa Laboratorium Medis, serta Toksikologi Lingkungan dan Industri. Publikasi tersebut menjadi bentuk kontribusi editor dalam menyediakan sumber belajar yang berkualitas bagi mahasiswa maupun tenaga kesehatan.

Dengan perpaduan pengalaman sebagai dosen, peneliti, reviewer jurnal, dan penulis buku, editor terus berkomitmen mengembangkan pendidikan tinggi, penelitian, serta inovasi di bidang laboratorium medis dan ilmu kesehatan. Melalui berbagai aktivitas akademik dan ilmiah, editor bertekad untuk terus memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, peningkatan mutu pendidikan, serta kemajuan pelayanan kesehatan berbasis sains dan teknologi.

LAMPIRAN

Kunci Jawaban Soal Latihan

Bab 1:

1. C
2. B
3. C
4. D
5. A
6. B
7. B
8. C
9. E
10. E

Bab 2:

1. B
2. C
3. C
4. D
5. B
6. B
7. C
8. B
9. D
10. C

Bab 3:

1. B
2. C
3. D
4. D
5. B
6. C

7. C
8. D
9. E
10. B

Bab 4:

1. C
2. B
3. D
4. C
5. E
6. E
7. E
8. A
9. D
10. A

Bab 5:

1. B
2. B
3. A
4. C
5. C
6. B
7. E
8. C
9. E
10. D

Bab 6:

1. B
2. C
3. B
4. C
5. A
6. D
7. E

8. C

9. A

10. E

Bab 7:

1. B

2. E

3. C

4. E

5. D

6. B

7. C

8. C

9. C

10. B

Bab 8:

1. A

2. C

3. C

4. D

5. B

6. C

7. B

8. C

9. D

10. C

Bab 9:

1. B

2. C

3. C

4. D

5. C

6. B

7. A

8. B

9. C

10. E

Bab 10

1. C

2. B

3. C

4. C

5. C

6. B

7. A

8. B

9. C

10. B

SINOPSIS

Buku Biokimia membahas konsep dasar ilmu biokimia dan penerapannya dalam bidang kesehatan. Materi mencakup pengenalan biokimia, struktur air, sistem buffer, karbohidrat, protein, asam amino, enzim, serta asam nukleat. Buku ini juga menguraikan proses metabolisme karbohidrat dan protein, bioenergetika, produksi energi, serta biokimia klinis dalam memahami penyakit. Penyajian materi disusun secara sistematis untuk membantu pembaca memahami proses molekuler dalam tubuh, fungsi biomolekul, dan mekanisme reaksi biokimia yang mendukung kehidupan. Dilengkapi latihan soal, buku ini menjadi referensi bagi mahasiswa bidang kesehatan dalam memahami dasar biokimia serta aplikasinya pada ilmu kedokteran dan kesehatan modern.

BIOKIMIA

Buku Biokimia membahas konsep dasar ilmu biokimia dan penerapannya dalam bidang kesehatan. Materi mencakup pengenalan biokimia, struktur air, sistem buffer, karbohidrat, protein, asam amino, enzim, serta asam nukleat. Buku ini juga menguraikan proses metabolisme karbohidrat dan protein, bioenergetika, produksi energi, serta biokimia klinis dalam memahami penyakit. Penyajian materi disusun secara sistematis untuk membantu pembaca memahami proses molekuler dalam tubuh, fungsi biomolekul, dan mekanisme reaksi biokimia yang mendukung kehidupan. Dilengkapi latihan soal, buku ini menjadi referensi bagi mahasiswa bidang kesehatan dalam memahami dasar biokimia serta aplikasinya pada ilmu kedokteran dan kesehatan modern.



PENERBIT
PT. Mustika Sri Rosadi

Citra Indah City, Bukit Heliconia,
Kecamatan Jonggol, Kabupaten Bogor

