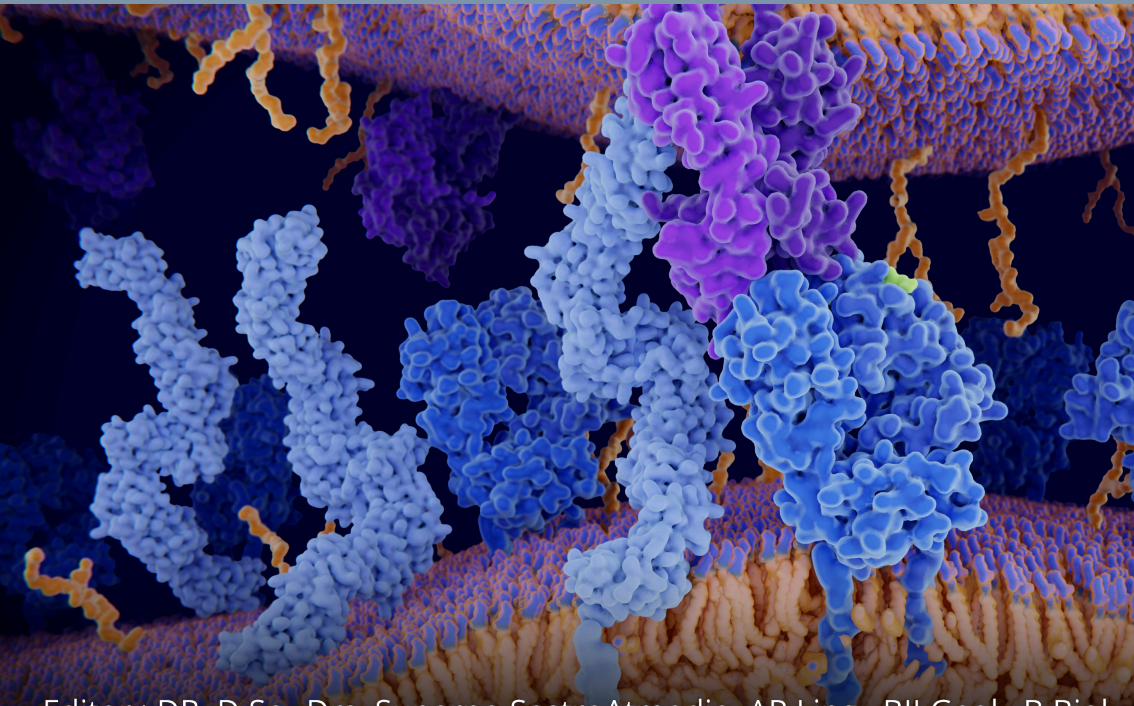


BIOKIMIA DASAR (TEORI DAN ESENSINYA)

TIM PENULIS :

**Nasri, Linda Hevira, Syahraini Ritonga, Iksen, Erlinda Ningsih, Musrifah Tahar
Aliyah Fahmi, Alfiah Alif, Ayusti Dirga, Dessy Arisanty, Nurul Febriani Putri
Neng Mira Atjo, Hendri Satria Kamal Uyun**



**Editor : DR. D.Sc., Drs. Sunarno SastroAtmodjo, AP.Ling., BII.Geol., B.Biol.,
S.E., S.H., S.T., S.AP., S.IP., S.Pd., S.Sos., S.IKom., M.M., M.Sc., M.Si.**

BIOKIMA DASAR (TEORI DAN ESENSINYA)

**Nasri
Linda Hevira
Syahraini Ritonga
Iksen
Erlinda Ningsih
Musrifah Tahar
Aliyah Fahmi
Alfiah Alif
Ayusti Dirga
Dessy Arisanty
Nurul Febriani Putri
Neng Mira Atjo
Hendri Satria Kamal Uyun**



GET PRESS INDONESIA

BIOKIMA DASAR (TEORI DAN ESENSINYA)

Penulis :

Nasri
Linda Hevira
Syahraini Ritonga
Iksen
Erlinda Ningsih
Musrifah Tahar
Aliyah Fahmi
Alfiah Alif
Ayusti Dirga
Dessy Arisanty
Nurul Febriani Putri
Neng Mira Atjo
Hendri Satria Kamal Uyun

ISBN : 978-623-125-760-4

Editor : DR., D.Sc., Drs., Sunarno SastroAtmodjo, S.E., S.H.,
S.T., S.AP., S.IP., S.Sos., S.IKom., M.M., M.Sc., M.Si.

Penyunting : Ari Yanto., M.Pd

Desain Sampul : Atyka Trianisa, S.Pd.

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat

Website : www.getpress.co.id

Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, April 2025

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Biokimia Dasar (Teori Dan Esensinya) ini.

Buku Ini Membahas Konsep Dasar Biokimia, Sifat Fisik dan Kimia Bahan, Biomelekul Dalam Organisme, Struktur dan Komposisi Sel, Struktur, Fungsi dan Metabolisme Karbohidrat, Proses dan Produk Fotosintesis, Lipid, Membran, Serta Metabolisme Lipida, Asam Amino, Protein, Serta Metabolisme Nitrogen,. Struktur, Fungsi dan Klasifikasi Enzim, Asam Nukleat, Replikasi dan Transkripsi DNA, Siklus ATP dan Bioenergetika Sel, Vitamin dan Unsur Mikro, Air dan Fungsinya.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, April 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
BAB 1 KONSEP DASAR BIOKIMIA	1
1.1 Pendahuluan	1
1.1.1 Defenisi Biokimia.....	1
1.1.2 Ruang Lingkup Biokimia	2
1.1.3 Sejarah Perkembangan Biokimia	3
1.1.4 Hubungan Biokimia dengan Ilmu Lain.....	4
1.2 Manfaat Biokimia	5
1.2.1 Biokimia dalam Kedokteran.....	5
1.2.2 Biokimia dalam Farmasi.....	6
1.2.3 Biokimia dalam Pertanian	7
1.2.4 Biokimia dalam Industri Pangan	8
1.3 Biomolekul Esensial	9
1.3.1 Air dan Sifat-Sifatnya	10
1.3.2 Asam Amino dan Protein	10
1.3.3 Karbohidrat.....	11
1.3.4 Lipid.....	12
1.3.5 Asam Nukleat.....	13
1.4 Struktur dan Fungsi Protein	14
1.4.1 Struktur Primer, Sekunder, Tersier, dan Kuartener	14
1.4.2 Fungsi Enzimatik dan Katalisis.....	16
1.4.3 Interaksi Protein dan Ligand.....	17
1.5 Metabolisme Dasar	18
1.5.1 Konsep Dasar Metabolisme	19
1.5.2 Katabolisme : Glikolisis dan Siklus Krebs	20
1.5.3 Anabolisme : Sintesis Asam Lemak dan Protein.....	21
1.5.4 ATP dan Bioenergetika.....	22
DAFTAR PUSTAKA.....	23
BAB 2 SIFAT FISIK DAN KIMIA BAHAN	27
2.1 Sifat Fisika Bahan.....	28

2.2 Hubungan Sifat Fisika Bahan dengan Proses Biologis.....	29
2.3 Sifat Kimia Bahan	31
2.4 Hubungan Sifat Kimia bahan dalam proses biologis.....	33
DAFTAR PUSTAKA	37
BAB 3 BIOMOLEKUL DALAM ORGANISME	39
3.1 Pendahuluan	39
3.2 Protein	39
3.2.1 Definisi Protein	39
3.2.2 Fungsi Protein	41
3.3 Karbohidrat	42
3.3.1 Definisi Karbohidrat	42
3.3.2 Klasifikasi Karbohidrat	42
3.3.3 Fungsi Karbohidrat	46
3.4 Lipid.....	46
3.4.1 Definisi Lipid	46
3.4.2 Klasifikasi Lipid	46
3.4.3 Fungsi Lipid	47
3.5 Asam Nukleat.....	48
3.5.1 Definisi Asam Nukleat	48
3.5.2 Komponen Asam Nukleat.....	48
3.5.3 Struktur DNA dan RNA	48
DAFTAR PUSTAKA	51
BAB 4 STRUKTUR DAN KOMPOSISI SEL.....	53
4.1 Pendahuluan	53
4.2 Membran Sel: Komposisi dan Fungsi	54
4.3 Organel Sel dan Fungsi Biokimia.....	58
4.3.1 Nukleus	60
4.3.2 Ribosom.....	60
4.3.3 Retikulum endoplasma.....	61
4.3.4 Aparatus Golgi.....	61
4.3.5 Mitokondria.....	61
4.3.6 Lisosom	62
4.3.7 Peroxisom	63
4.3.8 Sentriol	63
4.3.9 Vakuola.....	64

4.3.9 Sitoplasma.....	64
4.3.10 Sitoskeleton.....	65
DAFTAR PUSTAKA.....	66
BAB 5 STRUKTUR, FUNGSI, DAN METABOLISME KARBOHIDRAT.....	71
5.1 Pendahuluan	71
5.2 Struktur Dan Fungsi Karbohidrat.....	73
5.2.1 Monosakarida	73
5.2.2 Disakarida.....	77
5.2.3 Oligosakarida	78
5.2.4 Polisakarida.....	80
5.3 Metabolisme Karbohidrat.....	83
5.3.1 Pengertian Metabolisme Karbohidrat.....	83
5.3.1 Macam-Macam Metabolisme Karbohidrat	83
DAFTAR PUSTAKA.....	86
BAB 6 PROSES DAN PRODUK FOTOSINTESIS	87
6.1 Pengertian Fotosintesis	87
6.2 Organisme yang Melakukan Fotosintesis.....	88
6.3 Struktur dan Organ Fotosintesis.....	89
6.4 Proses Fotosintesis.....	91
6.5 Faktor yang Mempengaruhi Fotosintesis	94
6.6 Produk Fotosintesis	96
6.7 Peran Fotosintesis dalam Kehidupan.....	98
DAFTAR PUSTAKA.....	101
BAB 7 LIPID, MEMBRAN, SERTA METABOLISME.....	103
7.1 Pendahuluan Tentang Lipid, Membran, Serta Metabolisme Lipid.....	103
7.2 Asam lemak	104
7.2.1 Asam Lemak Jenuh	105
7.2.2 Asam Lemak Tak Jenuh.....	106
7.2.3 Kelompok Substituen.....	107
7.2.4 Sifat Fisik Asam Lemak.....	107
7.2.5 Sifat Kimia Asam Lemak.....	109
7.2.6 Sumber Biologis Asam Lemak.....	110
7.2.7 Turunan Asam Lemak.....	111
7.3 Lipid Membran.....	113
7.3.1 Gliserofosfolipid.....	114

7.3.2 Sphingolipid.....	115
7.3.3 Kolesterol dan Turunannya	116
7.4 Lipoprotein	121
7.5 Metabolisme Lipid	122
DAFTAR PUSTAKA	124
BAB 8 ASAM AMINO, PROTEIN, SERTA	
METABOLISME NITROGEN	125
8.1 Pendahuluan	125
8.2 Struktur Asam Amino dan Klasifikasinya.....	126
8.3 Fungsi Asam Amino dan Protein.....	128
8.4 Metabolisme Nitrogen.....	129
8.5 Sintesis Asam Amino dan Metabolisme Protein	132
8.6 Penutup.....	133
DAFTAR PUSTAKA	135
BAB 9 STRUKTUR, FUNGSI DAN KLASIFIKASI	
ENZIM	141
9.1 Pendahuluan	141
9.2 Struktur Enzim	142
9.2.1 Situs Aktif Enzim.....	142
9.2.2 Kofaktor dan Koenzim.....	144
9.3 Fungsi Enzim.....	147
9.3.1 Enzim dalam Pencernaan.....	147
9.3.2 Enzim dalam Metabolisme Sel.....	147
9.3.3 Enzim dalam Sintesis dan Perbaikan Molekul	147
9.3.4 Enzim dalam Regulasi dan Kontrol Biokimia	148
9.3.5 Enzim dalam Aplikasi Medis dan Industri.....	148
9.4 Klasifikasi Enzim	148
9.4.1 Oksidoreduktase.....	148
9.4.2 Transferase	150
9.4.3 Hidrolase	150
9.4.4 Liase	150
9.4.5 Isomerase.....	151
9.4.6 Ligase.....	151
DAFTAR PUSTAKA	152
BAB 10 ASAM NUKLEAT, TRANSKRIPSI	
DAN TRANSLASI	153
10.1 Pendahuluan.....	153

10.2	Metabolisme Asam Nukleat.....	154
10.2.1	Biosintesis asam nukleat	155
10.2.2	Biosintesis Purin.....	155
10.2.3	Degradasi Purin	158
10.2.4	Biosintesis Pirimidin	158
10.2.5	Degradasi Pirimidin.....	160
10.3	Struktur Asam Nukleat.....	161
10.3.1	Struktur Primer	161
10.3.2	Struktur sekunder asam nukleat.....	162
10.4	Material Genetik.....	163
10.4.1	Fungsi dan Struktur DNA	164
10.4.2	Fungsi dan struktur RNA.....	166
10.4.3	rRNA.....	169
10.5	Ekspresi Gen.....	170
10.6	Transkripsi.....	171
10.7	Translasi.....	174
10.8	Penutup	181
	DAFTAR PUSTAKA	182
BAB 11	SIKLUS ATP DAN BIOENERGETIKA SEL.....	185
11.1	Siklus ATP.....	185
11.1.1	Konsep Dasar ATP	185
11.1.2	Sintesis ATP.....	188
11.1.3	Daur Ulang (Regenerasi) ATP.....	192
11.2	Bioenergetika Sel.....	193
11.2.1	Definisi dan Prinsip Dasar Bioenergetika.....	193
11.2.2	Hukum Termodinamika dalam Sistem Biologis	195
11.2.3	Transformasi Energi dalam Sel.....	197
11.2.4	Bioenergetik Fisik.....	202
	DAFTAR PUSTAKA	204
BAB 12	VITAMIN DAN UNSUR MIKRO	207
12.1	Pendahuluan.....	207
12.2	Vitamin	208
12.2.1	Pengertian Dan Pembagian Vitamin.....	208
12.2.2	Vitamin Larut Lemak.....	209
12.2.3	Vitamin Larut Air	211
12.3	Unsur Mikro.....	216

12.3.1 Pengertian Unsur Mikro.....	216
12.3.2 Jenis Unsur Mikro.....	217
12.3.3 Peran Fisiologis, Sumber, Efek Kekurangan & Kelebihan.....	217
DAFTAR PUSTAKA.....	223
BAB 13 AIR DAN FUNGSINYA.....	225
13.1 Pendahuluan.....	225
13.2 Interaksi Lemah dalam Sistem Berair	226
13.3 Ikatan Hidrogen Memberikan Air Sifat-Sifatnya yang Tidak Biasa.....	226
13.4 Air Membentuk Ikatan Hidrogen dengan Zat Terlarut Polar	228
13.5 Ionisasi Air, Asam Lemah, dan Basa Lemah.....	229
13.6 Air Berinteraksi Secara Elektrostatik dengan Zat Terlarut Bermuatan	230
13.7 Gas Nonpolar Sulit Larut dalam Air.....	230
13.8 Fungsi air	231
DAFTAR PUSTAKA.....	234
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Sejarah Perkembangan Biokimia.....	3
Tabel 5.1. Tabel Disakarida dengan Unit Monomernya	78
Tabel 9.1. Kofaktor Enzim.....	145
Tabel 9.2. Beberapa Koenzim yang Berfungsi sebagai Pembawa Transien Atom atau Gugus Fungsi Tertentu	146
Tabel 9.3. Klasifikasi Internasional Enzim.....	149
Tabel 10.1. Variasi bentuk DNA.....	163
Tabel 12.1. Kebutuhan Vitamin	215
Tabel 12.2. Kebutuhan Unsur Mikro (Mineral)	221
Tabel 13.1. Titik beku, Titik Didih, dan Beberapa Pelarut.....	226

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Gambar Struktur Protein.....	16
Gambar 3.1. Asam Amino Pembentuk Protein	40
Gambar 3.2. Jenis Monosakarida Golongan D-aldosa	43
Gambar 3.3. Jenis Monosakarida Golongan Ketosa.....	43
Gambar 3.4. Struktur Disakarida	44
Gambar 3.5. Struktur Selulosa	45
Gambar 3.6. Struktur Amilopektin.....	45
Gambar 3.7. Struktur Lipid dan Penggolongannya	47
Gambar 3.8. Struktur <i>Double Helix</i> DNA dan Struktur Rantai Tunggal RNA.....	50
Gambar 4.1. Struktur dan Organel Sel.....	59
Gambar 5.1. Klasifikasi Karbohidrat	73
Gambar 5.2. Representasi Struktur dari Glukosa, Galaktosa, dan Fruktosa	75
Gambar 5.3. Struktur dari cincin Glukosa dan Fruktosa	76
Gambar 5.4. Struktur Selulosa	80
Gambar 5.5. Rangkuman Klasifikasi Polisakarida dari unit yang berbeda	81
Gambar 6.1. Reaksi Fotosintesis.....	92
Gambar 6.2. Proses Reaksi Terang dan Gelap Fotosintesis	94
Gambar 7.1. Molekul Asam Lemak	109
Gambar 7.2. Struktur kimia tristearin (contoh trigliserida).....	112
Gambar 8.1. Struktur asam amino	126
Gambar 8.2. Konformasi struktur protein (sekunder, tersier, kuarterner).....	127
Gambar 8.3. Degradasi Asam amino	130
Gambar 8.4. Diagram siklus urea.....	131
Gambar 9.1. Sisi aktif enzim.....	143
Gambar 9.2. Model <i>Lock and Key Analogy</i>	143
Gambar 9.3. Model <i>Induced-fit theory</i>	144
Gambar 10.1. Struktur basa nitrogen Purin dan Pirimidin.....	154
Gambar 10.2. Biosintesis purin dari dua jalur.....	157

Gambar 10.3. Degradasi Purin.....	158
Gambar 10.4. Biosintesis pirimidin	159
Gambar 10.5. Sintesis UMP menjadi UTP -- CTP dan TTP.....	160
Gambar 10.6. Degradasi Pirimidin.....	160
Gambar 10.7. Pembentukan polinukleotida dari mononukleotida melalui ikatan fosfodiester.....	161
Gambar 10.3. Pasangan basa dalam DNA. C dalam lingkaran melambangkan karbon pada posisi 1' deoksiribosa.	162
Gambar 10.4. Ilustrasi Struktur DNA.....	165
Gambar 10.5. Ilustrasi Struktur RNA.	167
Gambar 10.6. Tahapan pra-mRNA sebelum meninggalkan nucleus	168
Gambar 10.7. Ilustrasi Struktur RNA transfer. a. Struktur dasar tRNA, b. Struktur daun clover dari Trna.....	169
Gambar 10.8. Ilustrasi struktur rRNA dalam ribosom.	170
Gambar 10.9. Ilustrasi proses transkripsi.....	171
Gambar 10.10. Inisiasi pada Proses Transkripsi.....	172
Gambar 10.11. Elongasi pada Proses Transkripsi	173
Gambar 10.12. Proses inisiasi pada translasi , A. pada eukaryor, B. Pada Prokaryot.....	176
Gambar 10.13. Elongasi pada Translasi.....	178
Gambar 10.14 . Sketsa proses translasi mRNA yang melibatkan (a) inisiasi, (b) elongasi yang terdiri dari pengiriman tRNA, (c) translokasi , (d) diikuti oleh terminasi (Sketsa proses translasi mRNA yang melibatkan inisiasi (a), elongasi yang terdiri dari pengiriman tRNA (b) dan translokasi (c), diikuti oleh terminasi (d).	180
Gambar 11.1. Struktur Adenosin Trifosfat, Adenosin Difosfat, dan Adenosin monofosfat.....	186
Gambar 11.2. Siklus fosfat dan pertukaran adenin nukleotida.....	187

Gambar 11.3. Siklus ADP/ATP dalam transfer fosfat berenergi tinggi	191
Gambar 11.4. Transduksi Energi Seluler.....	193
Gambar 11.5. Produksi ROS.....	201
Gambar 11.6. Bioenergetika Fisik	203
Gambar 13.1. Atom air	227

BAB 1

KONSEP DASAR BIOKIMIA

Oleh Nasri

1.1 Pendahuluan

Biokimia, sebagai cabang ilmu pengetahuan, menggabungkan biologi dan kimia untuk mengeksplorasi proses kimia dan zat yang terjadi dalam organisme hidup. Bidang ini penting untuk memahami mekanisme molekuler yang mendasari berbagai fungsi biologis, dari komunikasi seluler hingga warisan genetik. Melalui biokimia, kita mendapatkan wawasan tentang kompleksitas kehidupan pada tingkat molekuler, yang penting untuk kemajuan dalam kedokteran, pertanian, dan bioteknologi. Pentingnya biokimia terletak pada kemampuan untuk menjelaskan bagaimana perubahan molekuler dapat mempengaruhi fungsi fisiologis. Misalnya, memahami fungsi enzim dapat mengungkapkan penyebab penyakit metabolik dan mengarah pada pengembangan terapi yang ditargetkan. Selain itu, biokimia menyediakan alat dan pengetahuan yang diperlukan untuk pengembangan obat-obatan baru, menawarkan solusi untuk masalah kesehatan dan meningkatkan kualitas hidup.

Sifat interdisipliner biokimia memungkinkan untuk mengintegrasikan temuan dari bidang ilmiah yang berbeda, meningkatkan pemahaman kita secara keseluruhan tentang ilmu kehidupan. Dengan mempelajari biokimia, para peneliti dapat menemukan bagaimana berbagai proses seluler saling terkait, yang mengarah pada inovasi dalam diagnostik medis, perawatan, dan bahkan perawatan pencegahan. Integrasi ini juga memfasilitasi penerapan biokimia di berbagai bidang, seperti ilmu forensik, ilmu lingkungan, dan nutrisi.

1.1.1 Defenisi Biokimia

Biokimia didefinisikan sebagai studi tentang proses kimia dan zat dalam dan terkait dengan organisme hidup. Ini adalah ilmu

berbasis laboratorium yang menggabungkan prinsip-prinsip biologi dan kimia untuk memahami biologi sel dan metabolisme. Para ahli biokimia menyelidiki mekanisme molekuler melalui mana informasi genetik diterjemahkan menjadi fungsi seluler, memberikan dasar molekuler untuk memahami struktur sel dan fungsi sel (Nelson & Cox, 2021). Biokimia melibatkan studi biomolekul seperti protein, asam nukleat, karbohidrat, dan lipid. Molekul ini membentuk blok bangunan sel dan melakukan fungsi penting, termasuk mengkatalisis reaksi biokimia, memberikan dukungan struktural, menyimpan dan mentransmisikan informasi genetik, dan memungkinkan komunikasi seluler (Berg, Tymoczko, & Gatto, 2022). Memahami molekul-molekul ini dan interaksi mereka sangat penting untuk mendeskripsikan kompleksitas kehidupan.

Biokimia modern telah berkembang untuk mencakup berbagai sub-disiplin, seperti biologi molekuler, biologi struktural, dan bioinformatika. Sub-disiplin ini meningkatkan kemampuan kami untuk mempelajari dan memanipulasi sistem biologis pada tingkat molekuler, menyebabkan terobosan di bidang seperti pengeditan gen, kedokteran pribadi, dan biologi sintetis (Voet & Voet, 2019).

1.1.2 Ruang Lingkup Biokimia

Bidang biokimia mencakup semua aspek proses kimia dalam organisme hidup. Ini termasuk mempelajari struktur dan fungsi biomolekul, memahami jalur metabolisme, dan mengklarifikasi mekanisme ekspresi gen dan regulasi. Biokimia juga melibatkan penyelidikan komunikasi seluler dan jalur transduksi sinyal yang mengatur berbagai proses fisiologis (Lehninger, Nelson, & Cox, 2020). Para ahli biokimia mengeksplorasi bagaimana sel memanfaatkan energi dari nutrisi melalui jalur metabolisme seperti glikolisis, siklus asam sitrat, dan fosforilasi oksidatif. Mereka juga mempelajari bagaimana sel-sel mensintesis makromolekul seperti DNA, RNA, dan protein dan bagaimana proses ini diatur. Pemahaman ini penting untuk memahami bagaimana sel tumbuh, membagi, dan merespon perubahan lingkungan (Berg, Tymoczko, & Stryer, 2019).

Bidang biokimia terus berkembang, menggabungkan teknologi dan metodologi baru. Teknik-teknik seperti spektrometri massa, spektroskopi resonansi magnetik nuklir (NMR), dan kristalografi sinar-X memungkinkan ahli biokimia untuk menganalisis struktur dan fungsi biomolekul secara rinci. Kemajuan dalam bioinformatika dan biologi komputasi juga menyediakan alat untuk menganalisis dataset besar dan pemodelan sistem biologis yang kompleks (Campbell & Farrell, 2018).

1.1.3 Sejarah Perkembangan Biokimia

Biokimia memiliki sejarah yang kaya dan beragam, ditandai dengan penemuan-penemuan signifikan yang telah membentuk pemahaman kita tentang kehidupan pada tingkat molekuler. Bidang ini telah berkembang selama berabad-abad, dengan kontribusi dari berbagai ilmuwan yang telah mengungkap prinsip-prinsip dasar yang mengatur proses biokimia. Perkembangan pengetahuan ini telah membuka jalan bagi biokimia modern, mengintegrasikan kemajuan teknologi dan penelitian interdisipliner untuk mendorong batas-batas ilmu pengetahuan dan kedokteran.

Tabel 1.1. Sejarah Perkembangan Biokimia

Penemu	Tahun	Penemuan
Eduard Buchner	1897	Menunjukkan bahwa fermentasi dapat terjadi pada ekstrak bebas sel, menandai penemuan enzim.
James Watson & Francis Crick	1953	Menemukan struktur heliks ganda DNA, merevolusi pemahaman kita tentang informasi genetik.
Frederick Sanger	1958	Mengembangkan metode Sanger untuk pengurutan DNA, secara signifikan memajukan bidang genetika.
Arthur Kornberg	1959	Menemukan mekanisme replikasi DNA, meningkatkan pemahaman kita tentang pewarisan genetik.
Paul Berg	1980	Mengembangkan teknologi DNA rekombinan, memungkinkan

Penemu	Tahun	Penemuan
		manipulasi materi genetik.
Kary Mullis	1983	Menemukan teknik reaksi rantai polimerase (PCR), merevolusi biologi molekuler dan diagnostik.
Tim Proyek Genom Manusia	2003	Menyelesaikan pengurutan genom manusia, menyediakan peta lengkap gen manusia.
Jennifer Doudna & Emmanuelle Charpentier	2012	Mengembangkan teknologi pengeditan gen CRISPR-Cas9, memungkinkan modifikasi genetik yang presisi.

1.1.4 Hubungan Biokimia dengan Ilmu Lain

Biokimia secara intrinsiknya interdisipliner, menyeberang dengan berbagai bidang ilmiah seperti biologi molekuler, genetika, dan farmakologi. Biologi Molekuler berfokus pada dasar molekuler aktivitas biologis, khususnya interaksi antara DNA, RNA, dan protein. Hal ini memungkinkan para ahli biokimia untuk mempelajari mekanisme molekuler ekspresi gen dan regulasi (Alberts et al., 2015). Dalam genetika, biokimia memainkan peran penting dalam memahami bagaimana informasi genetik dikodekan, diulang, dan diungkapkan. Teknik-teknik seperti DNA sequencing dan *polymerase chain reaction* (PCR) adalah fundamental untuk kedua biokimia dan genetika, memungkinkan analisis dan manipulasi bahan genetik. Hubungan ini telah menyebabkan penemuan yang signifikan di bidang-bidang seperti gangguan genetik dan penyakit keturunan (Griffiths et al., 2020).

Farmakologi, studi tentang tindakan obat, sangat bergantung pada biokimia untuk memahami bagaimana obat-obatan berinteraksi dengan sistem biologis. Para ahli biokimia mempelajari target molekuler obat-obatan, seperti enzim dan reseptor, untuk mengklarifikasi mekanisme tindakan mereka. Pengetahuan ini sangat penting untuk pengembangan terapi baru dan untuk meningkatkan perawatan yang ada (Rang et al., 2019).

1.2 Manfaat Biokimia

Biokimia, studi tentang proses kimia di dalam dan terkait dengan organisme hidup, menawarkan banyak manfaat di berbagai bidang. Ini memberikan pemahaman yang mendalam tentang mekanisme molekuler yang mengatur proses kehidupan, yang fundamental untuk kemajuan dalam kedokteran, farmasi, pertanian, dan industri makanan. Dengan menjelaskan bagaimana biomolekul seperti protein, asam nukleat, lipid, dan karbohidrat berinteraksi dan berfungsi, biokimia membantu para ilmuwan dan peneliti mengembangkan terapi baru, meningkatkan hasil pertanian, dan meningkatkan kualitas dan keamanan makanan (Smith, 2020).

Dalam kedokteran, biokimia sangat penting untuk memahami penyakit pada tingkat molekuler, yang memfasilitasi pengembangan alat diagnostik yang akurat dan perawatan yang ditargetkan. Misalnya, pengetahuan tentang jalur biokimia yang terlibat dalam kanker atau gangguan metabolik memungkinkan desain inhibitor atau aktivator spesifik untuk memodulkan jalur ini, menawarkan pilihan pengobatan yang lebih efektif dan kurang invasif. Selain itu, biokimia memainkan peran penting dalam penelitian genetik dan bioteknologi, mendorong inovasi dalam terapi gen dan pengobatan yang dipersonalisasi (Johnson, 2021).

Industri farmasi mendapat manfaat besar dari biokimia melalui penemuan dan pengembangan obat. Dengan memahami interaksi antara obat dan sistem biologis, ahli biokimia dapat merancang obat yang lebih efektif dengan efek samping yang lebih sedikit. Biokimia juga membantu dalam mengidentifikasi sasaran obat baru dan sintesis senyawa baru. Kontribusi disiplin ilmiah ini meluas ke pengembangan vaksin, memahami metabolisme obat, dan mengoptimalkan sistem pengiriman obat, yang penting untuk memajukan kesehatan global (Brown, 2022).

1.2.1 Biokimia dalam Kedokteran

Peran biokimia dalam kedokteran sangat penting, terutama dalam mendiagnosis dan mengobati penyakit. Ini memberikan wawasan tentang dasar molekuler penyakit, memungkinkan pengembangan tes diagnostik yang dapat mendeteksi penyakit pada tahap awal. Misalnya, pengukuran biomarker spesifik dalam sampel

darah atau jaringan dapat mengungkapkan adanya kondisi seperti diabetes, penyakit kardiovaskular, atau kanker jauh sebelum gejala muncul. Deteksi dini ini sangat penting untuk intervensi yang efektif dan peningkatan hasil pasien (Miller, 2021). Selain itu, biokimia mendukung pengembangan strategi terapeutik. Memahami bagaimana jalur biokimia diubah dalam penyakit memungkinkan untuk merancang obat-obatan yang dapat secara khusus menargetkan jalur ini. Misalnya, dalam pengobatan kanker, ahli biokimia mempelajari mutasi pada onkogen dan gen supresor tumor untuk mengembangkan terapi yang ditargetkan yang secara selektif membunuh sel kanker sambil menghemat sel normal. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efektivitas perawatan tetapi juga meminimalkan efek samping, meningkatkan kualitas hidup pasien (Davis, 2022).

Biokimia juga memainkan peran penting dalam kedokteran yang dipersonalisasi. Dengan menganalisis profil genetik dan biokimia pasien individu, penyedia layanan kesehatan dapat menyesuaikan perawatan untuk mencapai hasil terbaik. Pendekatan ini sangat bermanfaat dalam mengobati penyakit kompleks seperti kanker, di mana variasi genetik secara signifikan mempengaruhi respons terhadap terapi. Perubahan yang dipersonalisasi mewakili pergeseran dari model satu-size-fit-all ke pendekatan yang lebih akurat, individu untuk perawatan kesehatan (Jones, 2023).

1.2.2 Biokimia dalam Farmasi

Dalam bidang farmasi, biokimia adalah dasar untuk pengembangan obat dan intervensi terapeutik. Ini memberikan dasar untuk memahami bagaimana obat berinteraksi dengan sistem biologis, yang sangat penting untuk merancang obat yang efektif. Misalnya, pengetahuan kinetika enzim dan pengikat reseptor memungkinkan pengembangan obat-obatan yang dapat secara akurat memodifikasi target biologis, menyebabkan hasil terapi yang lebih baik dengan efek samping yang lebih sedikit (Wilson, 2022).

Biokimia di industri farmasi juga memainkan peran kunci dalam penemuan kandidat obat baru. Mereka menggunakan teknik seperti pemeriksaan aliran tinggi dan desain obat berbasis struktur untuk mengidentifikasi dan mengoptimalkan senyawa dengan

potensi terapeutik. Proses ini melibatkan memahami mekanisme molekuler penyakit dan mengidentifikasi biomolekul kunci yang dapat ditargetkan oleh obat-obatan. Tes biokimia kemudian digunakan untuk menguji efektivitas dan keamanan senyawa ini, memastikan mereka memenuhi standar yang ketat sebelum uji klinis (Garcia, 2021).

Selain itu, biokimia berkontribusi pada optimalisasi sistem pengiriman obat. Dengan mempelajari sifat-sifat biokimia obat-obatan dan interaksi mereka dengan membran biologis, biochemists dapat mengembangkan formulasi yang meningkatkan penyerapan, distribusi, metabolisme, dan ekskresi obat. Ini memastikan bahwa obat-obatan mencapai target yang dimaksudkan dalam tubuh pada konsentrasi yang tepat, memaksimalkan efek terapeutik sambil meminimalkan toksisitas. Kemajuan dalam biokimia telah menyebabkan pengembangan sistem pengiriman baru seperti liposom, nanopartikel, dan implan elutasi obat (Thomas, 2023).

1.2.3 Biokimia dalam Pertanian

Biokimia memainkan peran penting dalam pertanian dengan meningkatkan produksi tanaman, meningkatkan ketahanan terhadap hama dan penyakit, dan mempromosikan praktik pertanian yang berkelanjutan. Memahami jalur biokimia di tanaman memungkinkan pengembangan tanaman GM dengan karakteristik yang diinginkan seperti peningkatan hasil, peningkatan kandungan gizi, dan ketahanan terhadap tekanan lingkungan. Kemajuan ini membantu memastikan keamanan pangan dan memenuhi permintaan yang semakin meningkat untuk produk pertanian (Harrison, 2021).

Aplikasi yang signifikan dari biokimia dalam pertanian adalah pengembangan biopestisida dan biofertilizer. Dengan mempelajari interaksi biokimia antara tumbuhan dan hama atau mikroorganisme simbiotik mereka, para ahli kimia dapat mengembangkan alternatif alami untuk pestisida dan pupuk kimia. Produk-produk organik ini tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga membantu menjaga kesehatan tanah dan keanekaragaman hayati. Misalnya, bakteri buatan biokimia dapat memperbaiki

nitrogen dari atmosfer, menyediakan nutrisi penting untuk tanaman tanpa kebutuhan pupuk sintetis (Lee, 2022).

Biokimia juga membantu dalam meningkatkan teknologi pasca panen. Dengan memahami proses biokimia yang terlibat dalam pematangan dan kerusakan buah, para peneliti dapat mengembangkan metode untuk memperpanjang umur produk pertanian. Teknik-teknik seperti penyimpanan atmosfer terkontrol dan penggunaan pengawet alami membantu mengurangi kerugian pasca panen dan memastikan bahwa konsumen memiliki akses ke makanan segar dan bergizi. Inovasi ini berkontribusi pada sistem pertanian yang lebih efisien dan berkelanjutan (Martinez, 2023).

1.2.4 Biokimia dalam Industri Pangan

Industri makanan sangat bergantung pada biokimia untuk memastikan keamanan makanan, meningkatkan nilai gizi, dan mengembangkan produk makanan baru. Dengan memahami komposisi biokimia makanan, para ilmuwan dapat mengembangkan metode untuk mendeteksi kontaminan dan mencegah penyakit yang ditularkan melalui makanan. Ini termasuk penggunaan tes biokimia untuk mengidentifikasi patogen, racun, dan alergen dalam produk makanan, memastikan bahwa mereka memenuhi standar keamanan sebelum mencapai konsumen (Taylor, 2021). Biokimia juga memainkan peran penting dalam meningkatkan kualitas gizi makanan. Melalui studi tentang jalur metabolisme, ahli biokimia dapat memperkaya makanan dengan vitamin dan mineral esensial, mengatasi kekurangan gizi di populasi. Misalnya, biofortification tanaman dasar seperti beras dan jagung dengan mikronutrien seperti vitamin A, besi, dan seng telah dicapai melalui teknik biokimia, secara signifikan meningkatkan status gizi komunitas yang bergantung pada makanan ini (Williams, 2022).

Selain keamanan dan nutrisi, biokimia mendorong inovasi dalam pengembangan produk makanan baru. Memahami sifat biokimia bahan-bahan memungkinkan ilmuwan makanan untuk menciptakan makanan fungsional yang menawarkan manfaat kesehatan di luar nutrisi dasar. Probiotik, prebiotik dan asam lemak omega-3 adalah contoh senyawa bioaktif yang dimasukkan ke

dalam makanan untuk mempromosikan kesehatan usus, mengurangi peradangan, dan mendukung kesehatan kardiovaskular. Makanan fungsional ini mewakili segmen yang berkembang dari industri makanan, yang melayani konsumen yang sadar akan kesehatan (Clark, 2023).

1.3 Biomolekul Esensial

Biomolekul adalah komponen penting dari organisme hidup, memainkan peran penting dalam berbagai proses biologis. Molekul-molekul ini, termasuk karbohidrat, lipid, protein, dan asam nukleat, adalah blok bangunan kehidupan. Mereka terlibat dalam struktur, fungsi, dan regulasi jaringan dan organ tubuh. Misalnya, karbohidrat menyediakan energi, lipid membentuk membran seluler, protein berfungsi sebagai enzim dan unsur struktural, dan asam nukleat menyimpan dan mentransmisikan informasi genetik (Lehninger, 2020).

Karbohidrat terdiri dari atom karbon, hidrogen, dan oksigen, dan mereka berfungsi sebagai sumber energi utama untuk proses metabolisme. Gula sederhana seperti glukosa dengan cepat dimetabolisme untuk menghasilkan ATP, mata uang energi sel. Karbohidrat kompleks, seperti amandel dan glikogen, bertindak sebagai molekul penyimpanan energi jangka panjang. Selain itu, karbohidrat berperan dalam pengenalan sel dan sinyal melalui glikoprotein dan glikolipid pada permukaan sel (Voet & Voet, 2019).

Lipid, termasuk lemak, minyak, dan steroid, adalah molekul hidrofobik yang membentuk membran seluler, memberikan isolasi, dan menyimpan energi. Lipid bilayer membran sel terdiri dari fosfolipid, yang menciptakan penghalang yang mengatur pergerakan zat ke dalam dan keluar dari sel. Protein adalah polimer asam amino yang melakukan berbagai fungsi, mulai dari katalisis reaksi metabolik (enzim) hingga memberikan dukungan struktural (*collagen*). Asam nukleat, seperti DNA dan RNA, adalah polimer nukleotida yang menyimpan dan mentransfer informasi genetik penting untuk pertumbuhan, perkembangan, dan reproduksi (Nelson & Cox, 2021).

1.3.1 Air dan Sifat-Sifatnya

Air adalah komponen fundamental dari semua organisme hidup dan sangat penting untuk kehidupan karena sifat-sifat uniknya. Salah satu sifat yang paling penting dari air adalah kemampuannya untuk bertindak sebagai pelarut. Polaritas air memungkinkan untuk membubarkan berbagai zat, menjadikannya medium yang sangat baik untuk reaksi biokimia. Properti ini sangat penting untuk proses seluler, karena memungkinkan transportasi nutrisi, produk limbah, dan molekul lainnya dalam organisme (Lehninger, 2020). Sifat kohesi dan pelekat air juga penting untuk kehidupan. Kohesi mengacu pada daya tarik antara molekul air, yang menghasilkan tegangan permukaan yang tinggi. Properti ini memungkinkan air untuk membentuk tetesan dan berkontribusi pada tindakan kapiler, yang penting untuk pergerakan air melalui jaringan tanaman. Adhesion, di sisi lain, adalah daya tarik antara molekul air dan permukaan lainnya. Properti ini membantu air menempel pada dinding sel dan pembuluh darah, memfasilitasi pergerakannya melalui organisme (Voet & Voet, 2019).

Kapasitas panas spesifik air yang tinggi dan panas penguapan sangat penting untuk mempertahankan suhu yang stabil di dalam organisme hidup dan lingkungan mereka. Kapasitas panas spesifik yang tinggi berarti bahwa air dapat menyerap atau melepaskan sejumlah besar panas dengan hanya sedikit perubahan suhu. Properti ini membantu mengatur suhu tubuh dan melindungi organisme dari fluktuasi suhu ekstrim. Suhu tinggi vaporisasi memungkinkan air untuk menyerap jumlah panas yang signifikan selama evaporasi, memberikan efek pendinginan melalui proses seperti keringat dan keringat (Nelson & Cox, 2021).

1.3.2 Asam Amino dan Protein

Asam amino adalah blok bangunan protein, yang merupakan makromolekul penting yang terlibat dalam hampir semua proses biologis. Setiap asam amino terdiri dari atom karbon pusat, kelompok amino, kelompok karboxil, dan rantai samping yang unik. Rantai samping bervariasi dalam struktur dan sifat, mempengaruhi perilaku asam amino dan perannya dalam protein. Ada 20 asam amino standar, dan urutan dan sifat kimia mereka menentukan

struktur dan fungsi protein (Berg et al., 2022). Protein disintesis melalui proses yang disebut translation, di mana ribosom mengumpulkan asam amino ke dalam rantai polipeptida menurut urutan yang dikodekan oleh mRNA. Struktur primer protein adalah urutan asam amino, yang melipat menjadi struktur sekunder, tersier, dan kuaterner tertentu. Struktur sekunder termasuk helis alfa dan lembar beta yang stabil oleh ikatan hidrogen. Struktur tertier mengacu pada bentuk 3D keseluruhan polipeptida, yang ditentukan oleh interaksi antara rantai samping, termasuk interaksi hidrofobik, ikatan hidrogen, dan jembatan disulfida. Struktur kuaternari terjadi ketika beberapa rantai polipeptida berkumpul menjadi kompleks protein fungsional (Lehninger, 2020).

Protein melakukan berbagai fungsi di dalam sel. Enzim, jenis protein, mengkatalisis reaksi biokimia, meningkatkan efisiensi dan spesifisitasnya. Protein struktural, seperti kolagen dan keratin, memberikan dukungan dan bentuk pada sel dan jaringan. Protein transportasi, seperti hemoglobin, membawa molekul seperti oksigen di seluruh tubuh. Protein juga memainkan peran dalam sinyal, respons kekebalan tubuh, dan adhesi sel. Fungsi yang beragam dari protein disebabkan oleh struktur yang bervariasi dan kemampuan mereka untuk mengalami perubahan konformasi dalam menanggapi kondisi lingkungan (Nelson & Cox, 2021).

1.3.3 Karbohidrat

Karbohidrat adalah molekul organik yang terdiri dari atom karbon, hidrogen, dan oksigen, biasanya dengan rasio atom hidrogen ke oksigen 2:1. Mereka diklasifikasikan menjadi monosakarida, disakarida, oligosakarida dan polisakarida berdasarkan jumlah unit gula yang mereka miliki. Monosakarida, seperti glukosa dan fruktosa, adalah karbohidrat yang paling sederhana dan berfungsi sebagai blok bangunan untuk bentuk yang lebih kompleks. Disakarida, seperti sukrose dan laktosa, terdiri dari dua unit monosakarida yang terhubung oleh ikatan glikosida (Voet & Voet, 2019). Polisakarida, seperti amandel, glikogen, dan selulosa, adalah rantai panjang unit monosaccharide. Stark, yang ditemukan pada tumbuhan, dan glikogen, ditemukan pada hewan, adalah polysaccharides penyimpanan yang menyediakan energi. Selulosa,

polysaccharide struktural yang ditemukan di dinding sel tumbuhan, memberikan kekakuan dan kekuatan. Struktur dan fungsi polisakarida ditentukan oleh jenis monosakarida yang mereka miliki dan ikatan antara mereka. Misalnya, ikatan beta-1,4-glikosida dalam selulosa menciptakan struktur yang kaku, sedangkan ikatan alfa-1,4 dan alpha-1,6 dalam glikogen menghasilkan sumber energi yang sangat bercabang dan mudah dimobilisasi (Berg et al., 2022).

Karbohidrat juga memainkan peran penting dalam pengenalan sel dan sinyal. Glikoprotein dan glikolipid, yang merupakan karbohidrat yang dikaitkan secara kovalent dengan protein dan lipid, masing-masing, ditemukan pada permukaan sel. Molekul-molekul ini terlibat dalam interaksi sel-sel, respons kekebalan tubuh, dan pengenalan patogen. Selain itu, karbohidrat sangat penting dalam kerangka struktur nukleotida dan asam nukleat, di mana gula-gula pentosa ribosa dan deoksiribosa membentuk tulang belakang RNA dan DNA, masing-masing (Nelson & Cox, 2021).

1.3.4 Lipid

Lipid adalah kelompok molekul hydrophobic yang beragam yang termasuk lemak, minyak, fosfolipid, dan steroid. Mereka terdiri terutama dari atom karbon dan hidrogen, dengan sejumlah kecil oksigen. Karakter hidrofobik lipid disebabkan oleh rantai hidrokarbon yang panjang atau cincin, yang tidak polar dan tidak berinteraksi secara menguntungkan dengan air. Properti ini membuat lipid menjadi komponen penting dari membran sel, molekul penyimpanan energi, dan molekul sinyal (Voet & Voet, 2019).

Trigliserida, atau lemak dan minyak, adalah bentuk lipid yang paling umum dan berfungsi sebagai cadangan energi yang signifikan. Mereka terdiri dari gliserol dan tiga asam lemak, yang dapat jenuh atau tidak jenuh. Asam lemak jenuh tidak memiliki ikatan ganda dan padat pada suhu ruangan, sedangkan asam lemak tak jenuh mengandung satu atau lebih ikatan double dan cair pada suhu kamar. Kepadatan energi trigliserida yang tinggi menjadikannya molekul penyimpanan energi yang efisien,

menyediakan lebih dari dua kali energi per gram dibandingkan dengan karbohidrat dan protein (Berg et al., 2022).

Fosfolipid adalah blok bangunan utama membran sel. Mereka terdiri dari tulang belakang gliserol, dua ekor asam lemak, dan kelompok fosfat yang terpasang pada kelompok kepala kutub. Sifat amfipatik fosfolipid, dengan ekor hidrofobik dan kepala hidrofilik, memungkinkan mereka untuk membentuk bilayers di lingkungan air. Struktur bilayer ini menciptakan membran semi-permeabel yang mengatur pergerakan zat ke dan keluar dari sel, mempertahankan lingkungan internal dan memfasilitasi komunikasi dan transportasi (Nelson & Cox, 2021).

1.3.5 Asam Nukleat

Asam nukleat, termasuk DNA dan RNA, adalah makromolekul yang menyimpan dan mentransmisikan informasi genetik dalam organisme hidup. Mereka terdiri dari monomer yang disebut nukleotida, yang terdiri dari kelompok fosfat, gula lima karbon (ribosa dalam RNA dan deoksiribosa dalam DNA), dan basis nitrogen. Urutan dasar nitrogen ini (adenin, timin, cytosin, guanin dalam DNA, dan uracil dalam RNA) mengkodifikasi informasi genetik (Lehninger, 2020).

DNA (*deoxyribonucleic acid*) adalah molekul bercabang ganda yang membentuk struktur helical. Kedua untaian ini diikat bersama oleh ikatan hidrogen antara dasar-dasar komplementer (adenine with thymine and cytosine with guanine). Perpaduan dasar komplementer ini memastikan replikasi informasi genetik yang akurat selama pembelahan sel. DNA membawa instruksi untuk sintesis semua protein dan molekul RNA fungsional dalam suatu organisme, dan urutannya menentukan karakteristik organisme yang diwariskan (Voet & Voet, 2019).

RNA (asam ribonukleat) biasanya *single-stranded* dan memainkan berbagai peran dalam ekspresi gen. Messenger RNA (mRNA) membawa informasi genetik dari DNA ke ribosom, di mana ia berfungsi sebagai template untuk sintesis protein. Transfer RNA (tRNA) membawa asam amino yang sesuai ke ribosom selama terjemahan, memastikan urutan asam amin yang benar dalam rantai polipeptida yang tumbuh. Ribosomal RNA (rRNA) adalah

komponen struktural dan katalis dari ribosom, yang memfasilitasi pengumpulan protein. Selain itu, molekul RNA terlibat dalam fungsi regulasi seperti gen silencing dan splicing (Nelson & Cox, 2021).

1.4 Struktur dan Fungsi Protein

Protein adalah biomolekul penting yang memainkan peran penting dalam struktur dan fungsi organisme hidup. Terdiri dari asam amino yang terhubung oleh ikatan peptida, protein menunjukkan struktur dan fungsi yang beragam, termasuk katalis, sinyal, dan dukungan struktural. Struktur utama protein adalah urutan unik asam amino, yang ditentukan oleh gen yang sesuai. Urutan ini mendikte struktur yang lebih tinggi dari protein dan pada akhirnya fungsinya (Berg, 2019).

Fungsi protein sebagian besar tergantung pada struktur tiga dimensi, yang dapat dikategorikan menjadi empat tingkat: primer, sekunder, tertier, dan kuartener. Struktur sekunder mengacu pada konformasi lokal dari rantai polipeptida, seperti alfa-heliks dan beta-helix, yang menstabilkan oleh ikatan hidrogen. Struktur tertier adalah bentuk tiga dimensi keseluruhan dari rantai polipeptida tunggal, yang stabil oleh berbagai interaksi, termasuk interaksi hidrofobik, ikatan hidrogen, dan jembatan disulfida. Struktur kuartener melibatkan perakitan subunit polipeptida yang banyak menjadi kompleks protein fungsional (Lodish, 2020).

Protein dapat melakukan berbagai fungsi karena kemampuan mereka untuk mengambil berbagai bentuk dan sifat kimia. Enzim, misalnya, adalah protein yang mengkatalisis reaksi biokimia, secara signifikan meningkatkan tingkat reaksi. Protein struktural, seperti kolagen, memberikan dukungan mekanis untuk sel dan jaringan. Protein lain, seperti antibodi, memainkan peran penting dalam respons kekebalan tubuh, mengenali dan menetralkan zat asing. Protein transportasi, seperti hemoglobin, mengikat dan mengangkut molekul seperti oksigen di seluruh tubuh (Alberts, 2021).

1.4.1 Struktur Primer, Sekunder, Tersier, dan Kuartener

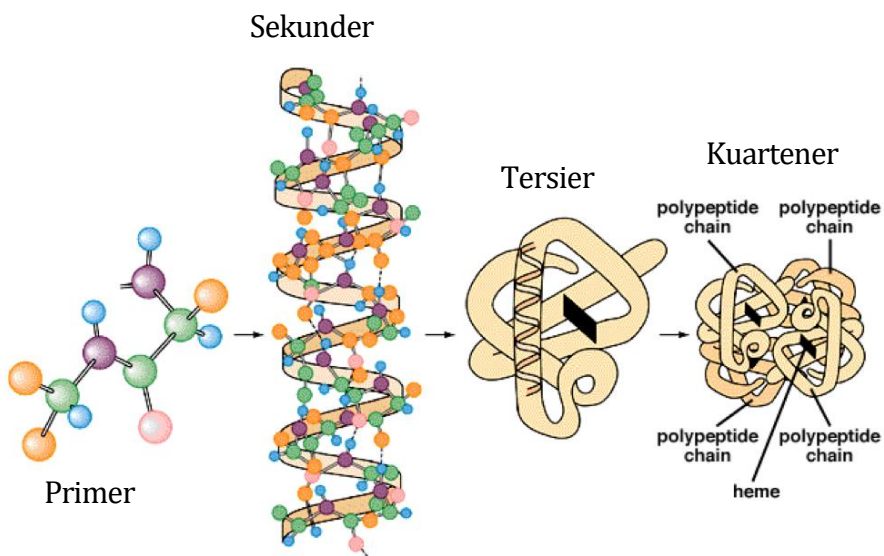
Struktur primer protein adalah urutan linear asam amino, yang ditentukan oleh gen yang mengkode protein. Urutan ini

fundamental karena mendikte sifat lipatan dan fungsional protein. Ikatan peptida antara asam amino membentuk tulang belakang protein, dengan rantai samping (R-group) asam amino yang membentang ke luar. Rantai samping ini berinteraksi satu sama lain dan dengan lingkungan sekitar, mempengaruhi struktur protein yang lebih tinggi (Berg, 2019).

Struktur sekunder adalah pola reguler, berulang dalam protein, terutama alpha-helix dan beta-sheet. Alpha-helix adalah bobin tangan kanan di mana setiap ikatan peptida membentuk ikatan hidrogen dengan ikatan Peptida empat sisa di depan dalam urutan. Lapisan beta terbentuk dengan menghubungkan dua atau lebih benang beta secara lateral oleh setidaknya dua atau tiga ikatan hidrogen tulang belakang, menciptakan struktur seperti lembaran. Struktur ini stabil oleh ikatan hidrogen antara atom tulang belakang dalam rantai polipeptida (Lodish, 2020).

Struktur tersier mengacu pada bentuk tiga dimensi dari rantai polipeptida. Struktur ini stabil oleh interaksi antara rantai samping asam amino, termasuk ikatan hidrogen, interaksi ionik, interaksi hidrofobik, dan jembatan disulfida. Struktur tertiary sangat penting untuk fungsi protein karena menentukan posisi residu kunci yang terlibat dalam aktivitas protein. Misalnya, situs aktif suatu enzim terbentuk oleh tata letak yang tepat dari asam amino dalam struktur tertiary (Alberts, 2021).

Struktur kuaterner adalah pengaturan beberapa rantai polipeptida menjadi satu kompleks protein fungsional. Rantai polipeptida ini, yang dikenal sebagai subunit, dapat identik atau berbeda. Struktur kuaternari stabilisasi oleh jenis interaksi yang sama yang menstabilkan struktur tertiary, seperti ikatan hidrogen, interaksi ionik, dan interaksi hidrofobik. Hemoglobin, misalnya, adalah protein kuaternari yang terdiri dari empat subunit, masing-masing mampu mengikat molekul oksigen, memungkinkan transportasi oksigen yang efisien di dalam darah (Berg, 2019).



Gambar 1.1. Gambar Struktur Protein

Protein dapat mengalami perubahan konformasi, transisi antara berbagai kondisi struktural, yang sangat penting untuk fungsi mereka. Perubahan ini dapat diinduksi oleh faktor-faktor seperti ikatan ligan, fosforilasi, atau perubahan pH dan suhu. Sifat dinamis struktur protein memungkinkan protein untuk berpartisipasi dalam berbagai proses seluler, menyesuaikan bentuk dan fungsi mereka dalam menanggapi sinyal seluler (Lodish, 2020).

1.4.2 Fungsi Enzimatik dan Katalisis

Enzim adalah katalis biologis yang mempercepat reaksi kimia dengan menurunkan energi aktivasi yang diperlukan untuk reaksi untuk melanjutkan. Mereka mencapai ini melalui berbagai mekanisme, termasuk orientasi substrat, induksi tegangan, dan penyediaan mikro lingkungan yang menguntungkan. Lokasi aktif enzim adalah wilayah khusus di mana molekul substrat mengikat dan mengalami transformasi kimia. Situs ini sangat spesifik, biasanya mengenali substrat tertentu atau kelompok substrat, yang memastikan kontrol yang akurat atas reaksi seluler (Voet, 2019).

Salah satu ciri utama katalis enzim adalah pembentukan kompleks enzim-substrat. Kompleks ini menstabilkan keadaan

transisi reaksi, mengurangi hambatan energi dan memungkinkan reaksi untuk melanjutkan lebih cepat. Enzim menunjukkan spesifisitas yang luar biasa, tidak hanya untuk substrat mereka tetapi juga untuk jenis reaksi yang mereka katalisasikan. Keunikan ini adalah hasil dari tata letak yang tepat dari asam amino di situs aktif, yang dapat membentuk berbagai interaksi dengan substrat, termasuk ikatan hidrogen, interaksi ionik, dan interaksi hidrofobik (Lehninger, 2020).

Enzim sering bekerja melalui mekanisme yang dikenal sebagai fit induksi, di mana ikatan substrat menginduksi perubahan konformasi dalam enzim, meningkatkan aktivitas katalisnya. Perubahan ini dapat membawa sisa katalis ke arah yang tepat untuk memfasilitasi reaksi kimia. Enzim juga dapat diatur dengan berbagai cara, termasuk regulasi allosterik, modifikasi kovalent, dan perubahan ekspresi gen. Regulasi allosterik melibatkan ikatan molekul pada situs yang berbeda dari situs aktif, menyebabkan perubahan konformasi yang mengubah aktivitas enzim (Nelson, 2021).

1.4.3 Interaksi Protein dan Ligand

Interaksi protein-ligand adalah fundamental untuk banyak proses biologis, termasuk katalisis enzim, transduksi sinyal, dan respons imun. Interaksi ini sangat spesifik dan diatur oleh komplementaritas antara ligand dan situs ikatan pada protein. Mengikat ligand ke protein dapat menyebabkan perubahan konformasi yang memodifikasi aktivitas, stabilitas, atau lokalisasi protein (Voet, 2019). Kekuatan dan spesifisitas interaksi protein-ligand ditentukan oleh berbagai kekuatan non-kovalent, termasuk ikatan hidrogen, interaksi ionik, kekuatan van der Waals, dan interaksi hidrofobik. Kekuatan ini secara kolektif berkontribusi pada afinitas mengikat, yang sering diukur oleh konstan disosiasi (K_d). K_d yang lebih rendah menunjukkan afinitas yang lebih tinggi, yang berarti protein dan ligand mengikat lebih erat. Proses ikatan dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti pH, suhu, dan kehadiran molekul lain (Lehninger, 2020).

Ligand binding dapat bersifat reversibel atau irreversibel. Pengikat reversibel memungkinkan ligand untuk berhubungan

dengan dan memisahkan dari protein, memfasilitasi regulasi dinamis aktivitas protein. Ikatan irreversibel biasanya melibatkan pembentukan ikatan kovalent antara ligand dan protein, yang mengarah pada modifikasi permanen pada fungsi protein. Banyak obat berfungsi sebagai ligan yang mengikat protein tertentu, mengubah aktivitas mereka untuk mencapai efek terapeutik (Nelson, 2021). Protein sering berinteraksi dengan beberapa ligand secara bersamaan, masing-masing mengikat ke situs yang berbeda. Pengikat multivalent ini dapat menyebabkan interaksi kooperatif, di mana pengikat satu ligand mempengaruhi afinitas pengikat yang lain. Kooperatif ikatan adalah contoh hemoglobin, di mana ikatan oksigen ke satu subunit meningkatkan afinitas subunit yang tersisa untuk oksigen. Interaksi semacam itu sangat penting untuk menyesuaikan respon protein terhadap kondisi seluler yang berbeda (Voet, 2019).

Interaksi protein-ligand juga dapat dipengaruhi oleh modifikasi post-translational protein, seperti fosforilasi, asetilasi, atau glikosilasi. Modifikasi ini dapat mengubah sifat pengikat protein, mempengaruhi interaksi dengan ligan. Misalnya, fosforilasi dapat memperkenalkan muatan negatif yang mengubah konformasi protein, meningkatkan atau menghambat ikatan ligan. Memahami interaksi ini penting untuk mengklarifikasi jalur sinyal seluler dan mengembangkan terapi yang ditargetkan (Lehninger, 2020).

1.5 Metabolisme Dasar

Metabolisme mencakup jaringan kompleks reaksi kimia dalam organisme hidup yang penting untuk kehidupan. Ini dikategorikan menjadi dua jenis utama: katabolisme dan anabolisme. Katabolisme melibatkan pemecahan molekul untuk menghasilkan energi, sedangkan anabolisme adalah sintesis semua senyawa yang dibutuhkan oleh sel. Jalur metabolisme ini sangat diatur dan saling terkait, memastikan bahwa sel-sel berfungsi secara efisien dan merespon dengan tepat terhadap perubahan lingkungan dan kebutuhan energi mereka.

Jalur metabolisme adalah urutan reaksi enzim katalis di mana produk dari reaksi satu berfungsi sebagai substrat untuk reaksi berikutnya. Enzim memainkan peran penting dalam

mengontrol kecepatan reaksi ini, seringkali membutuhkan kondisi spesifik seperti suhu, pH, dan kehadiran ko-faktor. Selain itu, proses metabolisme diatur melalui berbagai mekanisme, termasuk inhibisi umpan balik, ekspresi gen, dan sinyal hormonal, memastikan homeostasis dalam tubuh.

Metabolisme energi adalah aspek fundamental dari metabolisme, yang melibatkan produksi dan penggunaan adenosine triphosphate (ATP). ATP bertindak sebagai mata uang energi universal dalam sel, mendorong berbagai proses biologis. Jalur utama metabolisme energi termasuk glikolisis, siklus asam sitrat (siklus Krebs), dan fosforilasi oksidatif. Jalur-jalur ini saling terkait, dengan glikolisis dan siklus Krebs menyediakan perantara yang diperlukan untuk produksi ATP melalui fosforilasi oksidatif di mitokondria (Berg, 2022).

1.5.1 Konsep Dasar Metabolisme

Metabolisme dibagi menjadi dua kategori utama: katabolisme dan anabolisme. Katabolisme melibatkan pemecahan molekul besar menjadi unit yang lebih kecil, melepaskan energi dalam proses. Energi ini ditangkap dalam bentuk ATP, yang digunakan sel-sel untuk melakukan berbagai fungsi. Contoh jalur katabolik termasuk glikolisis dan siklus Krebs, di mana glukosa dan bahan bakar organik lainnya dioksidasi untuk menghasilkan ATP. Di sisi lain, anabolisme adalah proses membangun molekul yang lebih besar dari yang lebih kecil, yang membutuhkan input energi. Ini sangat penting untuk pertumbuhan sel, perbaikan, dan pemeliharaan. Rute anabolik utama termasuk sintesis protein, asam nukleat, dan lipid (Nelson, 2021).

Enzim sangat penting dalam mengatur jalur metabolisme. Setiap langkah dalam jalur metabolisme dikatalisis oleh enzim tertentu, memastikan proses terjadi secara efisien dan pada tingkat yang tepat. Enzim juga memungkinkan kontrol halus metabolisme melalui berbagai mekanisme regulasi. Regulasi alosterik, modifikasi kovalent, dan perubahan ekspresi gen memungkinkan sel untuk menyesuaikan aktivitas enzim dalam menanggapi sinyal internal dan eksternal. Regulasi ini memastikan bahwa jalur metabolisme

bekerja secara terkoordinasi, mempertahankan homeostasis seluler (Voet, 2021).

Metabolisme tidak seragam di semua sel dan organisme; dapat bervariasi secara signifikan tergantung pada jenis sel, organisme, dan lingkungan. Misalnya, sel-sel hati memiliki tingkat metabolisme yang tinggi dan sangat terlibat dalam detoksifikasi dan metabolisme glukosa, sementara sel otot berfokus pada produksi energi untuk kontraksi. Selain itu, jalur metabolisme tertentu lebih menonjol pada organisme tertentu karena kebutuhan diet mereka yang unik dan niche ekologis. Memahami variasi ini sangat penting untuk memahami bagaimana berbagai organisme beradaptasi dengan lingkungan mereka dan mempertahankan keseimbangan energi mereka (Lehninger, 2022).

1.5.2 Katabolisme : Glikolisis dan Siklus Krebs

Glikolisis adalah tahap awal katabolisme glukosa, yang terjadi di sitoplasma sel. Ini melibatkan serangkaian sepuluh reaksi enzim yang mengubah satu molekul glukosa menjadi dua molekul pyruvate, menghasilkan keuntungan bersih dari dua molekul ATP dan dua molekul NADH. Glikolisis tidak membutuhkan oksigen, menjadikannya proses anaerob, dan merupakan jalur penting dalam pernapasan aerobik dan anaeroba. Piruvate yang dihasilkan kemudian dapat memasuki mitokondria, di mana ia dioksidasi lebih lanjut dalam siklus Krebs jika oksigen tersedia (Berg, 2022).

Siklus Krebs, juga dikenal sebagai siklus asam sitrat atau siklus TCA, terjadi di matriks mitokondria. Ini adalah pusat metabolisme seluler, mengoksidasi acetyl-CoA yang berasal dari karbohidrat, lemak, dan protein untuk menghasilkan ATP, NADH, dan FADH₂. Siklus ini melibatkan delapan langkah, masing-masing dikatalisis oleh enzim tertentu, dan memainkan peran penting dalam produksi energi dan biosintesis. NADH dan FADH₂ yang dihasilkan dalam siklus Krebs menyumbangkan elektron ke rantai transportasi elektron, mendorong produksi ATP tambahan melalui fosforilasi oksidatif (Nelson, 2021).

Baik glikolisis dan siklus Krebs diatur dengan ketat untuk memastikan produksi energi yang efisien dan menjaga keseimbangan metabolik. Poin regulasi utama termasuk enzim

seperti phosphofruktokinase dalam glikolisis dan isocitrate dehydrogenase dalam siklus Krebs. Enzim ini tunduk pada inhibisi umpan balik dan regulasi allosterik, memungkinkan sel-sel untuk menyesuaikan aliran metabolisme mereka dalam menanggapi kebutuhan energi dan ketersediaan substrat. Interaksi antara glikolisis dan siklus Krebs menyioroti sifat terpadu dari jalur metabolisme dan peran mereka dalam homeostasis energi seluler (Voet, 2021).

1.5.3 Anabolisme : Sintesis Asam Lemak dan Protein

Anabolisme melibatkan biosintesis molekul kompleks dari yang lebih sederhana, proses yang membutuhkan input energi dalam bentuk ATP dan NADPH. Sintesis asam lemak adalah jalur anabolik utama yang terjadi di sitoplasma sel. Ini melibatkan pemasangan unit acetyl-CoA menjadi asam lemak rantai panjang melalui serangkaian reaksi enzim. Enzim asam lemak sintesis memainkan peran sentral dalam proses ini, yang diatur oleh sinyal gizi dan hormon. Asam lemak adalah komponen penting dari membran sel dan berfungsi sebagai molekul penyimpanan energi (Lehninger, 2022).

Sintesis protein adalah jalur anabolik penting lainnya yang melibatkan terjemahan informasi genetik menjadi protein fungsional. Proses ini terjadi di ribosom dan melibatkan pemasangan asam amino menjadi rantai polipeptida berdasarkan urutan kodon dalam RNA utusan (mRNA). Molekul transfer RNA (tRNA) mengirimkan asam amino yang sesuai ke ribosom, di mana mereka terhubung bersama oleh ikatan peptida. Regulasi sintesis protein kompleks, yang melibatkan kontrol transcriptional, post-transcriptional dan translational untuk memastikan protein diproduksi dalam jumlah yang tepat dan pada waktu yang tepat (Berg, 2022).

Sintesis asam nukleat, termasuk DNA dan RNA, juga merupakan proses anabolik yang penting. Replikasi DNA memastikan transmisi informasi genetik yang akurat selama pembelahan sel, sedangkan sintesis RNA (*transcription*) diperlukan untuk produksi protein. Proses ini membutuhkan upaya yang terkoordinasi dari beberapa enzim, termasuk DNA polimerase dan

RNA polimerasi. Kestetiaan sintesis asam nukleat sangat penting untuk mempertahankan stabilitas genetik dan fungsi sel yang tepat. Jalur anabolik seperti ini menyoroti pentingnya mekanisme energi dan regulasi dalam biosintesis biomolekul esensial (Nelson, 2021).

1.5.4 ATP dan Bioenergetika

ATP (*adenosine triphosphate*) adalah mata uang energi utama sel, menyediakan energi yang dibutuhkan untuk berbagai proses biologis. Hidrolisis ATP ke ADP (*adenosine diphosphate*) dan fosfat anorganik melepaskan energi yang dapat digunakan untuk pekerjaan seluler, termasuk kontraksi otot, transportasi aktif, dan biosintesis. ATP diregenerasi dari ADP dan fosfat anorganik melalui pernapasan seluler, proses yang mencakup glikolisis, siklus Krebs, dan fosforilasi oksidatif. Pergerakan ATP yang berkelanjutan sangat penting untuk menjaga keseimbangan energi seluler dan mendukung kehidupan (Voet, 2021).

Bioenergetika adalah studi tentang aliran energi dan transformasi dalam organisme hidup. Ini melibatkan memahami bagaimana sel menangkap, menyimpan, dan menggunakan energi untuk melakukan fungsi biologis. Sumber utama energi seluler adalah energi kimia yang disimpan dalam molekul organik, seperti glukosa, yang dilepaskan melalui jalur metabolisme. Efisiensi jalur ini dan regulasi produksi energi sangat penting untuk kelangsungan hidup dan fungsi sel. Konsep-konsep kunci dalam bioenergi termasuk hukum-hukum termodinamika, peran ATP, dan mekanisme konversi energi (Lehninger, 2022). Rantai transportasi elektron (ETC) dan fosforilasi oksidatif adalah komponen penting dari bioenergi. ETC adalah serangkaian kompleks protein yang terletak di membran mitokondria internal yang mentransfer elektron dari NADH dan FADH₂ ke oksigen, penerima elektron akhir. Transfer elektron ini menghasilkan gradient proton di seluruh membran, mendorong sintesis ATP oleh ATP synthase. Fosforilasi oksidatif adalah proses di mana ATP diproduksi sebagai hasil dari ETC. Mekanisme ini menyoroti hubungan yang rumit antara transfer elektron, gradient proton, dan sintesis ATP, menekankan kompleksitas produksi energi seluler (Berg, 2022).

DAFTAR PUSTAKA

- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2021). *Molecular Biology of the Cell*. 7th ed. New York: Garland Science.
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., & Gatto, G. J. (2022). *Biochemistry* (9th ed.). W.H. Freeman.
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., Gatto, G. J., & Stryer, L. (2019). *Biochemistry*. 8th ed. New York: W.H. Freeman and Company.
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., Gatto, G. J., & Stryer, L. (2022). *Biochemistry*. 9th ed. W.H. Freeman and Company.
- Berg, P., & Mertz, J. E. (1980). Personal reflections on the origins and emergence of recombinant DNA technology. *Genetics*, 184(1), 9-17.
- Brown, L. (2022). *Pharmaceutical Biochemistry*. London: PharmaBooks.
- Campbell, M. K., & Farrell, S. O. (2018). *Biochemistry* (9th ed.). Cengage Learning.
- Clark, H. (2023). *Functional Foods: Biochemistry and Health Benefits*. San Diego: HealthFoods Press.
- Davis, T. (2022). *Cancer Biochemistry: Pathways and Treatments*. San Francisco: Oncology Press.
- Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2014). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science*, 346(6213).
- Garcia, P. (2021). *Drug Discovery: Biochemical Methods*. Madrid: PharmaScience.
- Griffiths, A. J. F., Wessler, S. R., Carroll, S. B., & Doebley, J. (2020). *Introduction to Genetic Analysis* (12th ed.). W.H. Freeman.
- Harrison, K. (2021). *Biochemical Innovations in Agriculture*. Sydney: AgroScience Publishing.
- International Human Genome Sequencing Consortium. (2004). Finishing the euchromatic sequence of the human genome. *Nature*, 431(7011), 931-945.
- Johnson, R. (2021). *Molecular Medicine: Advances and Applications*. Boston: Health Sciences Press.

- Jones, A. (2023). *Personalized Medicine: A Biochemical Approach*. Cambridge: BioMed Publishing.
- Kornberg, A. (2016). *For the Love of Enzymes: The Odyssey of a Biochemist*. Harvard University Press.
- Lee, C. (2022). *Biopesticides and Biofertilizers: A Biochemical Perspective*. Seoul: GreenTech Press.
- Lehninger, A. L., Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2020). *Lehninger Principles of Biochemistry* (7th ed.). W.H. Freeman.
- Lehninger, A. L., Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2020). *Lehninger Principles of Biochemistry*. 8th ed. New York: W.H. Freeman and Company.
- Lehninger, A. L., Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2022). *Lehninger Principles of Biochemistry*. 8th ed. W.H. Freeman and Company.
- Lodish, H., Berk, A., Kaiser, C. A., Krieger, M., Bretscher, A., Ploegh, H., Amon, A., & Scott, M. P. (2020). *Molecular Cell Biology*. 9th ed. New York: W.H. Freeman and Company.
- Martinez, J. (2023). *Post-Harvest Biochemistry*. Mexico City: AgroFood Publishing.
- Miller, D. (2021). *Biomarkers in Disease Diagnosis*. Chicago: Medical Publishing.
- Mullis, K., & Faloona, F. (1987). Specific synthesis of DNA in vitro via a polymerase-catalyzed chain reaction. *Methods in Enzymology*, 155, 335-350.
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). *Lehninger Principles of Biochemistry* (8th ed.). W.H. Freeman.
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). *Principles of Biochemistry*. 7th ed. W.H. Freeman and Company.
- Rang, H. P., Dale, M. M., Ritter, J. M., Flower, R. J., & Henderson, G. (2019). *Rang and Dale's Pharmacology* (9th ed.). Elsevier.
- Sanger, F., Nicklen, S., & Coulson, A. R. (1977). DNA sequencing with chain-terminating inhibitors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 74(12), 5463-5467.
- Smith, J. (2020). *Understanding Biochemical Processes*. New York: Academic Press.
- Taylor, R. (2021). *Food Safety and Biochemistry*. Toronto: FoodTech Press.

- Thomas, S. (2023). *Advances in Drug Delivery Systems*. Berlin: Medical Technology Press.
- Voet, D., & Voet, J. G. (2019). *Biochemistry* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Voet, D., & Voet, J. G. (2019). *Biochemistry* (5th ed.). Wiley.
- Voet, D., Voet, J. G., & Pratt, C. W. (2019). *Fundamentals of Biochemistry: Life at the Molecular Level*. 5th ed. Hoboken: Wiley.
- Voet, D., Voet, J. G., & Pratt, C. W. (2021). *Fundamentals of Biochemistry: Life at the Molecular Level*. 6th ed. Wiley.
- Watson, J. D. (2014). *The Double Helix: A Personal Account of the Discovery of the Structure of DNA*. Simon & Schuster.
- Williams, E. (2022). *Nutritional Biochemistry and Food Fortification*. London: NutriScience.
- Wilson, M. (2022). *Drug Design and Biochemistry*. New York: PharmaTech.

BAB 2

SIFAT FISIK DAN KIMIA BAHAN

Oleh Linda Hevira

Biokimia adalah cabang ilmu yang mempelajari struktur, fungsi, serta interaksi molekul-molekul yang membentuk sistem kehidupan. Untuk memahami berbagai proses biologis yang terjadi dalam sel dan organisme, penting untuk memahami sifat fisik dan kimia dari bahan-bahan yang menyusun sistem kehidupan tersebut, seperti protein, karbohidrat, lipid, dan asam nukleat.

Sifat fisik dan kimia suatu bahan menentukan bagaimana ia berinteraksi dengan lingkungan biologisnya. Sifat kimia mencakup aspek seperti reaktivitas, ikatan kimia, dan kecenderungan suatu molekul untuk mengalami perubahan dalam reaksi biokimia. Sementara itu, sifat fisik mencakup kelarutan, viskositas, tekanan osmotik, serta kestabilan termal, yang mempengaruhi bagaimana suatu molekul bergerak, berinteraksi, dan berfungsi dalam sel.

Pemahaman tentang sifat fisik dan kimia bahan dalam biokimia sangat penting karena berkaitan langsung dengan mekanisme metabolisme, regulasi aktivitas enzim, struktur dan stabilitas makromolekul, serta berbagai proses transportasi molekul dalam tubuh. Misalnya, sifat kelarutan enzim menentukan di mana dan bagaimana ia bekerja dalam tubuh, sedangkan sifat kimia lipid mempengaruhi stabilitas dan permeabilitas membran sel.

Dalam bab ini, kita akan membahas lebih lanjut mengenai berbagai sifat fisik dan kimia bahan biokimia, bagaimana sifat-sifat tersebut berkontribusi terhadap fungsi biologisnya, serta contoh aplikatif dalam kehidupan sehari-hari dan bidang ilmu kesehatan.

2.1 Sifat Fisika Bahan

Sifat fisik bahan mengacu pada karakteristik atau perilaku bahan yang dapat diamati atau diukur tanpa mengubah komposisi kimianya. Sifat-sifat ini umumnya berkaitan dengan keadaan materi, ukuran, bentuk, dan perilaku bahan dalam kondisi fisik tertentu.

1. **Kepadatan (Densitas)**

Kepadatan adalah massa per unit volume bahan. Ini adalah sifat fisik yang menunjukkan seberapa rapat molekul-molekul dalam suatu bahan. Kepadatan berhubungan langsung dengan bagaimana bahan tersebut mengisi ruang dalam suatu sistem dan dapat mempengaruhi viskositas atau aliran zat tersebut (Winarno, 2004).

Contoh dalam biokimia: lipid memiliki kepadatan yang lebih rendah dibandingkan air, yang membuatnya membentuk lapisan ganda dalam membran sel.

2. **Kelarutan**

Kelarutan adalah kemampuan suatu zat untuk larut dalam pelarut tertentu (misalnya, air). Sifat ini sangat penting dalam proses biokimia, karena banyak reaksi biokimia terjadi dalam larutan. Keberhasilan reaksi tergantung pada kelarutan reaktan dalam medium biologis seperti air atau pelarut lain dalam sel.

Contoh: Glukosa, yang larut dalam air, dapat digunakan sebagai sumber energi dalam proses glikolisis.

3. **Titik Leleh dan Titik Didih**

Titik leleh dan titik didih adalah suhu di mana zat berubah dari bentuk padat ke cair (titik leleh) atau dari cair ke gas (titik didih). Sifat fisik ini penting dalam biokimia karena mempengaruhi suhu di mana proses metabolik dapat berlangsung dengan efisien (Hanum, 2018)

Contoh: Air, yang memiliki titik didih 100°C , sangat penting dalam berbagai proses biokimia, seperti hidrolisis enzimatis.

4. **Viskositas**

Viskositas mengacu pada kekentalan atau resistensi aliran suatu cairan. Cairan dengan viskositas tinggi lebih sulit mengalir, sedangkan cairan dengan viskositas rendah mengalir dengan lebih mudah. Ini penting dalam biokimia karena dapat

memengaruhi laju reaksi enzimatik dan pergerakan molekul dalam sel (Murray, 1996).

Contoh: Cairan seluler (sitosol) memiliki viskositas tertentu yang mempengaruhi kecepatan difusi molekul-molekul besar seperti protein atau asam nukleat.

5. Indeks Bias

Indeks bias adalah ukuran sejauh mana cahaya ditekuk saat melewati bahan tersebut. Dalam penelitian biokimia, perubahan indeks bias dapat digunakan untuk mengukur konsentrasi molekul tertentu dalam larutan.

Contoh: Pengukuran indeks bias larutan glukosa atau protein dapat membantu dalam penentuan konsentrasi suatu molekul di laboratorium.

2.2 Hubungan Sifat Fisika Bahan dengan Proses Biologis

Sifat fisika suatu bahan menentukan bagaimana molekul tersebut berinteraksi dengan lingkungan biologisnya dan mempengaruhi fungsi enzim, transportasi zat dalam tubuh, serta mekanisme kerja sel.

1. Kelarutan dan Transportasi Molekul dalam Darah

Oksigen (O_2) tidak larut dengan baik dalam air, sehingga tubuh membutuhkan hemoglobin dalam sel darah merah untuk mengikat dan mengangkut oksigen ke seluruh tubuh.

Sebaliknya, karbon dioksida (CO_2) lebih larut dalam air, sehingga sebagian besar CO_2 diangkut dalam plasma darah dalam bentuk asam karbonat (H_2CO_3) atau ion bikarbonat (HCO_3^-).

Contoh: Penghantaran Obat Berbasis Lipid

Beberapa obat, seperti vitamin A, D, E, dan K, bersifat larut dalam lemak, sehingga mereka harus dikemas dalam lipoprotein atau dilarutkan dalam minyak untuk diserap dengan baik oleh tubuh.

Sebaliknya, vitamin C dan vitamin B bersifat larut dalam air, sehingga lebih mudah diserap langsung oleh darah tetapi juga lebih cepat dikeluarkan dari tubuh.

2. Tekanan Osmotik dan Regulasi Cairan Sel

Jika seseorang minum terlalu banyak air tanpa elektrolit, darah menjadi hipotonis, menyebabkan air masuk ke dalam sel secara berlebihan dan berpotensi menyebabkan pembengkakan atau pecahnya sel.

Sebaliknya, jika darah memiliki terlalu banyak garam (larutan hipertonis), air akan keluar dari sel, menyebabkan dehidrasi seluler dan gangguan fungsi organ.

Contoh: Dialisis pada Gagal Ginjal

Pada pasien dengan gagal ginjal, proses hemodialisis menggunakan prinsip osmosis untuk membuang limbah dan kelebihan cairan dari darah dengan menggunakan larutan dialisis yang memiliki konsentrasi zat terlarut tertentu.

3. Viskositas dan Aliran Cairan Tubuh

Darah memiliki viskositas yang dipengaruhi oleh kadar protein, sel darah merah, dan faktor lainnya. Jika darah terlalu kental, bisa meningkatkan risiko trombotik (pembekuan darah berlebihan) dan penyakit kardiovaskular.

Penderita anemia sering memiliki darah yang lebih encer karena rendahnya jumlah hemoglobin dan sel darah merah, sehingga berisiko mengalami hipoksia (kekurangan oksigen di jaringan).

Contoh: Lendir pada Fibrosis Kistik

Pada penderita fibrosis kistik, terjadi produksi lendir yang lebih kental karena mutasi pada protein CFTR (Cystic Fibrosis Transmembrane Conductance Regulator), yang mengganggu transportasi ion klorida dan air, menyebabkan sumbatan di paru-paru dan saluran pencernaan.

4. Perubahan Suhu dan Stabilitas Molekul Biokimia

Saat tubuh mengalami demam tinggi ($>40^{\circ}\text{C}$), beberapa protein dapat mengalami denaturasi, kehilangan strukturnya dan berhenti berfungsi.

Contoh perubahan suhu: enzim dalam tubuh bekerja optimal pada suhu sekitar 37°C , tetapi jika suhu terlalu tinggi, enzim dapat kehilangan aktivitasnya.

Contoh stabilitas: Enzim yang digunakan dalam PCR (*Polymerase Chain Reaction*), seperti Taq polymerase, berasal

dari bakteri *Thermus aquaticus* yang hidup di lingkungan panas, sehingga dapat bertahan pada suhu tinggi (sekitar 95°C) tanpa mengalami denaturasi.

5. Sifat Optik dan Peran dalam Biologi

Rhodopsin, pigmen dalam mata manusia, sensitif terhadap cahaya dan membantu dalam penglihatan di kondisi gelap. Orang dengan buta warna sering mengalami mutasi pada protein opsin dalam retina, yang mengubah cara mereka menyerap cahaya warna tertentu.

Green Fluorescent Protein (GFP) digunakan dalam penelitian biologi molekuler untuk menandai sel atau protein tertentu agar dapat diamati di bawah mikroskop fluoresensi. ELISA (*Enzyme-Linked Immunosorbent Assay*) menggunakan prinsip absorbansi cahaya untuk mendeteksi keberadaan antibodi atau antigen dalam darah pasien.

6. Interaksi Fisik dalam Struktur Biomolekul

Struktur DNA stabil karena adanya ikatan hidrogen antara pasangan basa (A-T dan G-C), yang memungkinkan DNA untuk menyimpan informasi genetik dengan aman tetapi tetap bisa dibuka saat replikasi atau transkripsi. Jika terjadi mutasi yang mempengaruhi stabilitas ikatan ini, DNA bisa menjadi lebih rapuh dan rentan terhadap kerusakan.

Contoh Kasus: Protein Misfolding dan Penyakit Prion

Penyakit seperti *Creutzfeldt-Jakob Disease* (CJD) disebabkan oleh protein prion yang memiliki lipatan abnormal, yang dapat menginduksi protein normal di sekitarnya untuk melipat secara salah, menyebabkan agregasi protein berbahaya di otak.

2.3 Sifat Kimia Bahan

Sifat kimia mengacu pada kemampuan bahan untuk terlibat dalam reaksi kimia dan perubahan struktural yang dapat mengubah komposisi bahan tersebut. Sifat kimia sangat penting dalam biokimia karena mengatur reaksi metabolik, interaksi molekul, dan perubahan dalam tubuh.

1. Reaktivitas Kimia

Reaktivitas kimia menggambarkan kemampuan bahan untuk bereaksi dengan bahan lain. Molekul dengan reaktivitas

tinggi lebih mudah bereaksi, sementara molekul yang lebih stabil cenderung tidak mudah bereaksi (Lehninger, 2000).

Contoh dalam biokimia: Enzim adalah katalisator yang mempercepat reaksi kimia dengan mengurangi energi aktivasi. Reaktivitas enzim terhadap substratnya sangat penting dalam mengatur laju reaksi metabolik.

2. Keasaman dan Kebasaan (pH)

pH mengukur konsentrasi ion hidrogen (H^+) dalam larutan. Nilai pH yang rendah menunjukkan larutan asam, sedangkan nilai pH yang tinggi menunjukkan larutan basa. pH mempengaruhi banyak reaksi biokimia dan struktur biomolekul seperti protein dan asam nukleat, karena perubahan pH dapat mengubah ikatan hidrogen atau interaksi elektrostatik antar molekul.

Contoh: Enzim pepsin dalam pencernaan protein bekerja dengan optimal pada pH rendah (sekitar 2) di lambung.

3. Polaritas dan Nonpolaritas

Polaritas merujuk pada distribusi muatan dalam suatu molekul. Molekul polar (seperti air) memiliki muatan positif dan negatif yang terpisah, sementara molekul nonpolar tidak memiliki distribusi muatan yang jelas. Polaritas sangat mempengaruhi interaksi antara molekul, seperti kemampuan untuk membentuk ikatan hidrogen atau larut dalam pelarut tertentu.

Contoh: Air sebagai pelarut polar memungkinkan terjadinya berbagai reaksi kimia penting dalam tubuh. Sebaliknya, lipid adalah molekul nonpolar yang tidak larut dalam air, yang menyebabkan mereka membentuk lapisan membran sel.

4. Kekuatan Ikatan Kimia

Ikatan kimia, seperti ikatan kovalen, ionik, atau hidrogen, mempengaruhi stabilitas dan interaksi molekul. Ikatan ini menentukan seberapa kuat atau rapuh suatu molekul dan apakah ia akan terurai atau berubah dalam kondisi tertentu.

Contoh: Ikatan disulfida antara dua gugus sistein pada protein sangat penting dalam menjaga stabilitas struktur protein. Keberadaan atau perubahan ikatan disulfida dapat mempengaruhi aktivitas enzim atau fungsi protein lainnya.

5. Stabilitas Termal

Stabilitas termal mengacu pada kemampuan bahan untuk mempertahankan strukturnya pada suhu tinggi. Stabilitas termal sangat penting dalam biokimia, karena suhu tubuh organisme biasanya konstan, dan perubahan suhu dapat mempengaruhi aktivitas enzim atau struktur biomolekul.

Contoh: Enzim thermophilic, yang berasal dari mikroorganisme yang hidup di lingkungan panas, memiliki stabilitas termal yang lebih tinggi dibandingkan enzim yang berasal dari organisme yang hidup pada suhu rendah.

6. Redoks (Reduksi-Oksidasi)

Reaksi redoks melibatkan pemindahan elektron antara molekul. Molekul yang dapat menerima atau memberi elektron disebut sebagai agen oksidator atau reduktor. Reaksi redoks ini penting dalam metabolisme sel, seperti dalam respirasi seluler dan fotosintesis.

Contoh: Dalam rantai transportasi elektron di mitokondria, elektron dipindahkan dari satu molekul ke molekul lainnya untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP.

2.4 Hubungan Sifat Kimia bahan dalam proses biologis

1. Enzim dan Reaksi Biokimia

Sifat Kimia Terkait dengan Struktur Tiga Dimensi, Spesifisitas Substrat, dan Aktivitas Katalitik. Contoh Kasus: Laktosa dan Enzim Laktase

- a. Laktosa adalah disakarida yang ditemukan dalam susu. Agar tubuh bisa mencernanya, laktosa harus dipecah menjadi glukosa dan galaktosa oleh enzim laktase.
- b. Orang dengan intoleransi laktosa memiliki sedikit atau tidak memiliki enzim laktase, sehingga laktosa tidak dapat dipecah dengan baik dan menyebabkan gangguan pencernaan seperti kembung atau diare
- c. Sifat kimia laktase, seperti spesifisitas substrat, memastikan bahwa enzim ini hanya bekerja pada laktosa dan tidak pada disakarida lain.

2. pH dan Enzim dalam Tubuh

Sifat Kimia Terkait: Sensitivitas terhadap pH. Contoh Kasus: Enzim Pepsin di Lambung

- a. Enzim pepsin, yang berfungsi memecah protein dalam lambung, bekerja optimal dalam lingkungan yang sangat asam (pH sekitar 1,5 - 2).
- b. Jika lingkungan lambung menjadi terlalu basa, misalnya karena konsumsi obat antasida berlebihan, pepsin tidak bisa bekerja dengan baik, sehingga pencernaan protein terganggu (Newsholme and Leech, 2011).

3. Lipid dan Membran Sel

Sifat Kimia Terkait: Hidrofobisitas dan Struktur Bilayer Lipid. Contoh Kasus: Permeabilitas Membran dan Transport Nutrisi

- a. Membran sel terdiri dari fosfolipid bilayer, yang memiliki kepala hidrofilik dan ekor hidrofobik.
- b. Karena sifat hidrofobik membran, molekul non-polar seperti oksigen dan karbon dioksida bisa melewati membran dengan mudah, tetapi molekul polar seperti glukosa dan ion natrium membutuhkan protein pembawa atau kanal untuk masuk.
- c. Pemahaman sifat kimia fosfolipid sangat penting dalam pengembangan obat berbasis nanopartikel, yang dirancang untuk melewati membran sel dengan lebih efisien.

4. Protein dan Struktur Sekunder/Tersier

Sifat Kimia Terkait: Ikatan Hidrogen, Ikatan Disulfida, dan Lipatan Protein. Contoh Kasus: Penyakit Alzheimer

- a. Protein beta-amiloid dalam otak harus memiliki lipatan yang benar agar bisa berfungsi dengan baik.
- b. Dalam penyakit Alzheimer, protein ini mengalami misfolding (lipatan yang salah) dan membentuk plak amiloid yang merusak sel-sel saraf.
- c. Pemahaman tentang struktur kimia protein membantu dalam pengembangan obat-obatan yang dapat mencegah pembentukan plak ini.

5. Karbohidrat dan Metabolisme Energi

Sifat Kimia Terkait: Struktur Kimia Glukosa dan Jalur Metabolisme. Contoh Kasus: Diabetes Mellitus

- a. Glukosa adalah sumber energi utama bagi tubuh dan dipecah melalui proses glikolisis, siklus Krebs, dan fosforilasi oksidatif.
- b. Pada penderita diabetes tipe 2, tubuh masih menghasilkan insulin, tetapi reseptor insulin kurang responsif (resistensi insulin), menyebabkan glukosa tetap tinggi dalam darah.
- c. Sifat kimia glukosa yang mudah teroksidasi dimanfaatkan dalam alat glukometer, yang mengukur kadar gula darah berdasarkan reaksi oksidasi glukosa.

6. Asam Nukleat dan Penyimpanan Informasi Genetik

Sifat Kimia Terkait: Struktur Heliks Ganda dan Pasangan Basa Nukleotida. Contoh Kasus: Mutasi DNA dan Kanker

- a. DNA terdiri dari nukleotida yang berpasangan melalui ikatan hidrogen (A-T dan G-C)
- b. Jika terjadi mutasi, seperti perubahan basa nukleotida akibat radiasi atau bahan kimia, hal ini bisa menyebabkan kesalahan dalam sintesis protein, yang dapat memicu penyakit seperti kanker (Voet, Voet and Pratt, 2016).
- c. Pemahaman tentang sifat kimia DNA digunakan dalam CRISPR-Cas9, teknologi pengeditan gen yang dapat memotong dan mengganti urutan DNA yang rusak.

7. Hormon dan Regulasi Tubuh

Sifat Kimia Terkait: Kelarutan dalam Air atau Lemak. Contoh Kasus: Hormon Steroid vs. Hormon Peptida

- a. Hormon steroid seperti testosteron dan estrogen bersifat larut dalam lemak, sehingga mereka bisa langsung menembus membran sel dan berikatan dengan reseptor di dalam inti sel.
- b. Hormon peptida seperti insulin dan glukagon bersifat larut dalam air, sehingga mereka memerlukan reseptor permukaan sel untuk memberikan sinyal ke dalam sel.
- c. Perbedaan ini menjadi dasar dalam desain obat hormonal, seperti pil KB berbasis estrogen atau terapi insulin untuk diabetes.

8. Oksigen, Hemoglobin, dan Transportasi Gas

Sifat Kimia Terkait: Afinitas Hemoglobin terhadap Oksigen dan Karbon Monoksida. Contoh Kasus: Keracunan Karbon Monoksida (CO)

- a. Hemoglobin dalam sel darah merah mengikat oksigen untuk dikirim ke seluruh tubuh.
- b. Namun, hemoglobin memiliki afinitas yang lebih tinggi terhadap karbon monoksida (CO) dibandingkan oksigen.
- c. Jika seseorang menghirup terlalu banyak CO, hemoglobin akan lebih banyak mengikat CO daripada O_2 , menyebabkan hipoksia (kekurangan oksigen dalam tubuh).
- d. Pemahaman tentang sifat kimia ini digunakan dalam terapi oksigen hiperbarik, yang membantu melepaskan CO dari hemoglobin lebih cepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Hanum, G. R. (2018) *Biokimia Dasar*. Sidoarjo: UMSIDA Press.
- Lehninger, A. L. (2000) *Dasar-dasar Biokimia (Alih bahasa: Maggy Thenawidjaja)*. Jakarta: Erlangga.
- Murray, R. K. (1996) *Harper's Biochemistry*. Jakarta: EGC.
- Newsholme, E. and Leech, T. (2011) *Functional Biochemistry in Health and Disease*. UK: Wiley Blackwell.
- Voet, D., Voet, J. G. and Pratt, C. W. (2016) *Fundamentals of biochemistry, USA: John Wiley & Sons*.
- Winarno, F. G. (2004) *Kimia Pangan dan Gizi, Jakarta: Gramedia Pustaka Utama*.

BAB 3

BIOMOLEKUL DALAM ORGANISME

Oleh Syahraini Ritonga

3.1 Pendahuluan

Biomolekul merupakan senyawa organik yang ditemukan di dalam tubuh makhluk hidup. Biomolekul adalah molekul-molekul yang terdapat dalam organisme hidup yang penting untuk fungsi dan kelangsungan hidup sel. Biomolekul utama pada makhluk hidup adalah protein, karbohidrat, lipid, dan asam nukleat.

3.2 Protein

3.2.1 Definisi Protein

Protein merupakan salah satu makromolekul yang paling banyak ditemukan di dalam sel hidup. Protein disusun oleh monomer-monomer asam amino. Seluruh protein yang diisolasi dari bakteri dan sel hewan tingkat tinggi dibangun oleh 20 jenis asam amino yang sama. Asam-asam amino tersebut dihubungkan oleh ikatan kovalen dan ikatan peptida dengan urutan yang unik. Asam amino yang terdapat di alam lebih dari 300 asam amino dan hanya 20 asam amino tersebut yang merupakan penyusun protein.

Asam amino tersusun dari unsur karbon, hidrogen, oksigen, dan nitrogen. Nitrogen merupakan komponen utama dalam protein, yang menyumbang sekitar 16% dari berat total protein. Selain itu, molekul protein juga dapat mengandung fosfor, belerang, dan beberapa jenis protein bahkan mengandung unsur logam seperti tembaga dan besi. Asam amino dikategorikan sebagai molekul yang memiliki gugus α -karboksil dan α -amino, serta memiliki rantai samping khas (gugus R) yang terikat pada α -karbon.

Name	Abbreviation	Structure	Name	Abbreviation	Structure
Alanine	Ala	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$	Leucine	Leu	$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{CH}-\text{CH}-\text{C}-\text{COO}^- \\ \quad \\ \text{H}_3\text{C} \quad \text{NH}_3^+ \end{array}$
Arginine	Arg	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}_2\text{N}-\text{C}-\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \quad \\ \text{NH} \quad \text{NH}_3^+ \end{array}$	Lysine	Lys	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$
Asparagine	Asn	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}_2\text{N}-\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$	Methionine	Met	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{S}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$
Aspartic acid	Asp	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{HOOC}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$	Phenylalanine	Phe	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$
Cysteine	Cys	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{HS}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$	Proline	Pro	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \end{array}$
Glutamic acid	Glu	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{HOOC}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$	Serine	Ser	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{HO}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$
Glutamine	Gln	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}_2\text{N}-\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$	Threonine	Thr	$\begin{array}{c} \text{OH} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{COO}^- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{NH}_3^+ \end{array}$
Glycine	Gly	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$	Tryptophan	Trp	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_4-\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \quad \\ \text{CH} \quad \text{NH}_3^+ \end{array}$
Histidine	His	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{HC}-\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \quad \quad \\ \text{N} \quad \text{H} \quad \text{NH}_3^+ \end{array}$	Tyrosine	Tyr	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{HO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$
Isoleucine	Ile	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{H} \quad \text{NH}_3^+ \end{array}$	Valine	Val	$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}_3\text{C}-\text{CH}-\text{C}-\text{COO}^- \\ \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$

Gambar 3.1. Asam Amino Pembentuk Protein
(Sumber: Chemistry 10th Edition, Raymond Chang, 2009)

Molekul protein adalah polimer yang tersusun dari asam-asam amino yang terhubung melalui ikatan peptida. Ikatan peptida terbentuk antara atom C karbonil dari satu asam amino dengan atom N amino dari asam amino lainnya. Urutan asam amino yang dihubungkan oleh ikatan peptida dalam protein membentuk struktur linier. Dua asam amino yang terikat disebut dipeptida, sedangkan tiga asam amino disebut tripeptida, empat asam amino disebut tetrapeptida, dan seterusnya, sesuai dengan jumlah asam amino yang saling berikatan. Fragmen yang terdiri dari 3 hingga 25 asam amino disebut oligopeptida, sedangkan yang memiliki lebih dari 25 asam amino disebut polipeptida. Istilah protein digunakan untuk menyebut polipeptida yang terdiri atas ribuan asam amino.

3.2.2 Fungsi Protein

Protein berfungsi sebagai berikut:

1. Protein sebagai enzim

Protein berfungsi sebagai katalisator dalam berbagai reaksi kimia. Sebagian besar reaksi kimia di dalam sel berlangsung dengan bantuan enzim sebagai katalis. Beberapa enzim yang sering dimanfaatkan antara lain glukosa oksidase, yang mengkatalisis perubahan glukosa menjadi asam glukonat, dan urikase, yang memecah asam urat menjadi alantoin. Hingga kini, telah diidentifikasi lebih dari 2000 jenis enzim yang secara spesifik mengkatalisis reaksi kimia dan ditemukan di berbagai organisme.

2. Protein transpor

Protein transpor adalah protein yang berfungsi mengikat dan mengangkut molekul atau ion tertentu dari satu organ ke organ lainnya. Salah satu contohnya adalah mioglobin, yang berperan menyimpan dan mengedarkan oksigen di dalam otot. Contoh lainnya adalah hemoglobin, yang ditemukan dalam sel darah merah.

3. Protein Nutrien

Protein ini berfungsi sebagai cadangan nutrisi yang diperlukan untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan. Contoh protein nutrien antara lain ovalbumin, yaitu protein utama dalam putih telur dan kasein yang merupakan protein utama dalam susu.

4. Protein Kontraktil

Protein kontraktil disebut juga dengan protein motil, berperan dalam pergerakan di dalam sel organisme. Protein ini, seperti aktin dan myosin, membentuk filamen yang berfungsi dalam sistem kontraktil dan pergerakan otot rangka. Contoh lain dari protein kontraktil adalah tubulin, yang membentuk mikrotubulus sebagai komponen utama penyusun flagel dan silia yang memungkinkan pergerakan sel.

5. Protein Struktural

Protein struktural berfungsi sebagai penunjang atau pembentuk struktur biologis pada makhluk hidup. Contohnya, kolagen merupakan protein yang membentuk kulit, tulang, otot, tendon,

dan ligamen. Jenis protein struktural lainnya adalah keratin, yang menyusun kuku, rambut, dan bulu.

3.3 Karbohidrat

3.3.1 Definisi Karbohidrat

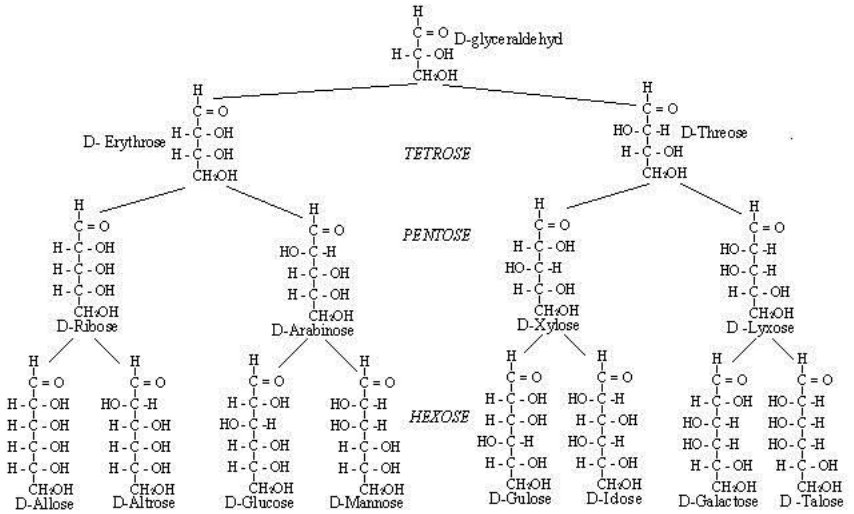
Karbohidrat merupakan senyawa organik yang mengandung unsur karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O). Karbohidrat dapat didefinisikan sebagai turunan aldehida atau keton dari polihidroksi alkohol atau sebagai senyawa yang menghasilkan turunan tersebut melalui proses hidrolisis. Rumus umum karbohidrat adalah $(\text{CH}_2\text{O})_n$. Oleh karena komposisi yang demikian, kelompok senyawa ini pernah dianggap sebagai hidrat karbon, sehingga diberi nama karbohidrat. Namun, pada tahun 1880-an nama senyawa tersebut bukanlah hidrat karbon. Nama lain dari karbohidrat adalah sakarida. Kata sakarida berasal dari bahasa Arab “sakkar” yang berarti manis.

3.3.2 Klasifikasi Karbohidrat

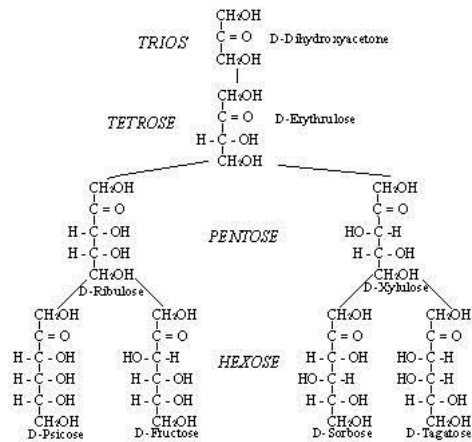
Berdasarkan jumlah monomer penyusunnya, karbohidrat digolongkan menjadi monosakarida, disakarida, oligosakarida, dan polisakarida.

1. Monosakarida

Monosakarida adalah karbohidrat paling sederhana yang tidak dapat dipecah menjadi bentuk yang lebih kecil melalui proses hidrolisis. Umumnya, senyawa ini berupa aldehida atau keton yang memiliki dua atau lebih gugus hidroksil. Rumus kimia empiris monosakarida dinyatakan sebagai $(\text{CH}_2\text{O})_n$, di mana n bernilai 3 atau lebih. Jika gugus karbonil pada monosakarida berupa turunan aldehida dan terletak di ujung rantai, maka disebut aldosa. Sementara itu, jika gugus karbonilnya berasal dari turunan keton, maka disebut ketosa. Contoh monosakarida antara lain glukosa, galaktosa, fruktosa, dan ribosa.



Gambar 3.2. Jenis Monosakarida Golongan D-aldosa
(Sumber: Ischak, dkk., 2017)

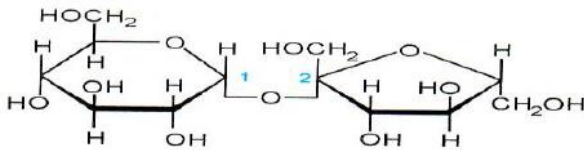


Gambar 3.3. Jenis Monosakarida Golongan Ketosa
(Sumber: Ischak, dkk., 2017)

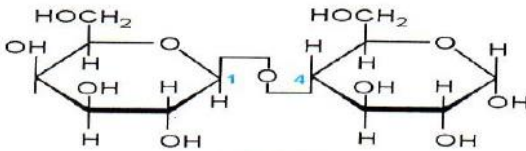
2. Disakarida dan Oligosakarida

Disakarida adalah jenis karbohidrat yang ketika dihidrolisis, akan terurai menjadi dua molekul monosakarida. Contoh disakarida adalah sukrosa, maltosa, dan laktosa. Ketiga senyawa ini memiliki

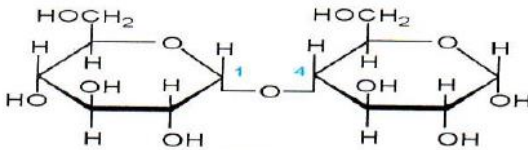
rumus molekul yang sama yaitu $C_{12}H_{22}O_{11}$ tetapi struktur molekulnya berbeda.



Sukrosa
(α -D-Glukopiranosil-(1 \rightarrow 2)- β -D-fruktofuranosida)



Laktosa
(α -D-Galaktopiranosil-(1 \rightarrow 4)- β -D-glukopiranosida)



Maltosa
(α -D-Glukopiranosil-(1 \rightarrow 4)- β -D-glukopiranosida)

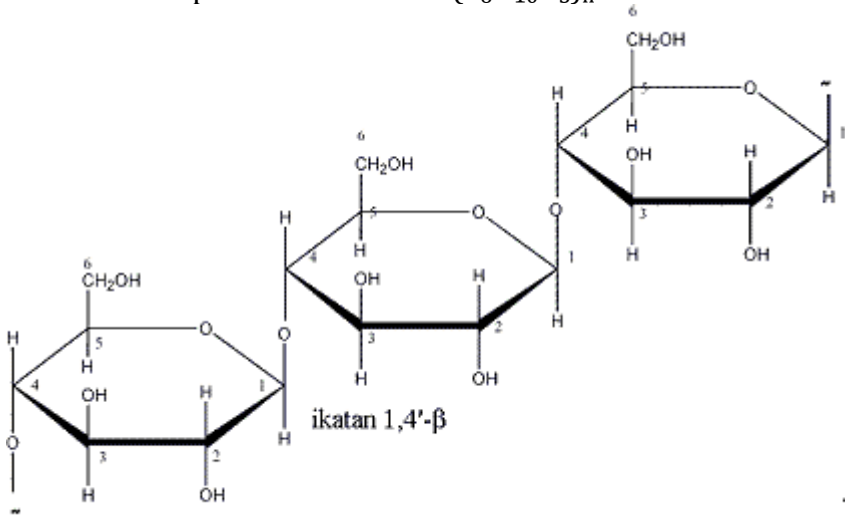
Gambar 3.4. Struktur Disakarida
 (Sumber: Ischak, dkk., 2017)

Oligosakarida adalah karbohidrat yang ketika dihidrolisis, akan menghasilkan beberapa (3-10) molekul monosakarida. Contoh oligosakarida adalah fukosidolaktosa, gentianosa, dan rafinosa.

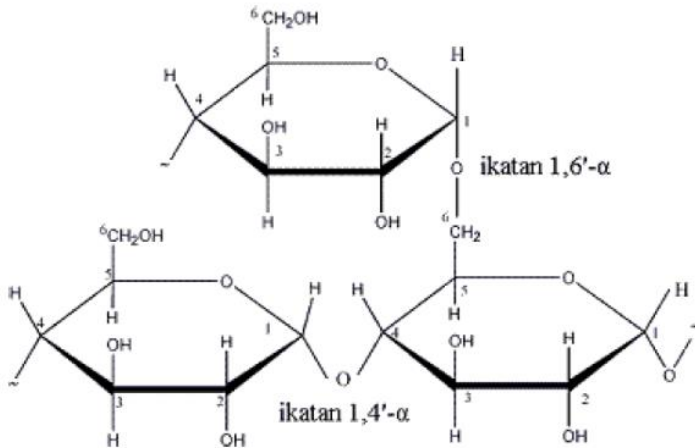
3. Polisakarida

Polisakarida adalah jenis karbohidrat yang menghasilkan lebih dari sepuluh molekul monosakarida ketika mengalami proses hidrolisis. Polisakarida terdiri dari polimer panjang yang tersusun atas unit-unit monosakarida. Senyawa ini banyak ditemukan di alam dan memiliki berbagai fungsi, seperti sebagai bahan struktural (penyusun bangunan sel), cadangan makanan, dan zat spesifik. Contoh polisakarida meliputi amilosa, selulosa,

pektin, dan agar. Struktur polisakarida dapat berbentuk rantai lurus, seperti amilosa, atau bercabang, seperti amilopektin. Rumus umum polisakarida adalah $(C_6H_{10}O_5)_n$.



Gambar 3.5. Struktur Selulosa
(Sumber: Wahyudiati, 2017)



Gambar 3.6. Struktur Amilopektin
(Sumber: Wahyudiati, 2017)

3.3.3 Fungsi Karbohidrat

Karbohidrat memiliki fungsi sebagai berikut:

1. Sebagai sumber energi
2. Melindungi protein agar tidak digunakan sebagai sumber energi
3. Membantu metabolisme lemak dan protein, sehingga mencegah terjadinya ketosis dan pemecahan protein yang berlebihan
4. Berperan dalam proses detoksifikasi zat-zat beracun di hati (hepar).
5. Beberapa jenis karbohidrat mempunyai fungsi khusus di dalam tubuh. Misalnya laktosa berfungsi membantu penyerapan kalsium.
6. Karbohidrat yang tidak dapat dicerna mengandung serat (*dietary fiber*) berfungsi untuk memperlancar defekasi.

3.4 Lipid

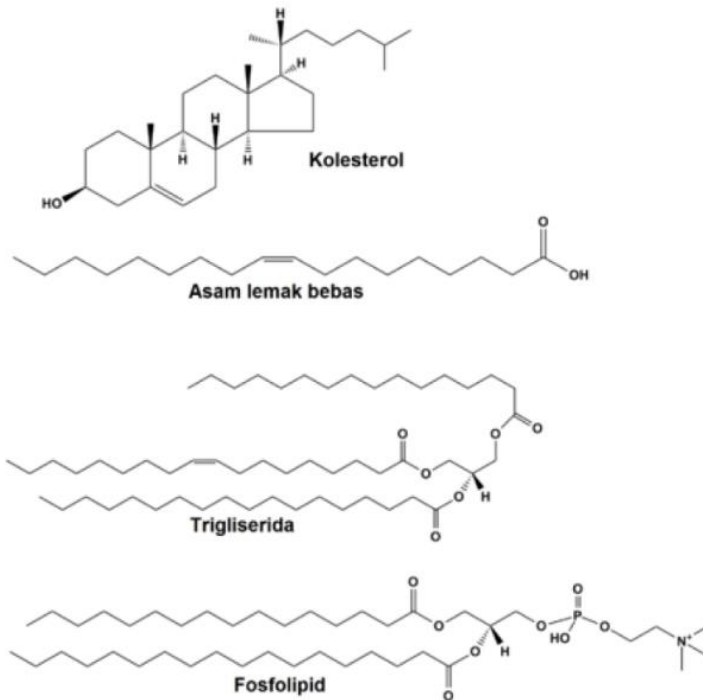
3.4.1 Definisi Lipid

Lipid adalah senyawa organik yang tidak larut dalam air tetapi dapat larut dalam pelarut non-polar seperti kloroform, eter, dan benzena. Lipid mencakup berbagai molekul alami, seperti lemak, lilin, sterol, monogliserida, digliserida, trigliserida, fosfolipid, dan sebagainya.

3.4.2 Klasifikasi Lipid

Bloor membagi lipid menjadi 3 golongan yaitu :

1. Lipid sederhana adalah ester yang terbentuk dari asam lemak dan berbagai jenis alkohol, seperti lemak, gliserida, dan lilin (waxes).
2. Lipid gabungan adalah ester asam lemak yang mengandung gugus tambahan, seperti fosfolipid.
3. Derivat lipid adalah senyawa yang dihasilkan dari proses hidrolisis lipid, seperti asam lemak, gliserol, dan sterol.



Gambar 3.7. Struktur Lipid dan Penggolongannya
(Sumber: Wahyudiati, 2017)

Berdasarkan sifat kimianya, lipid dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu: (1) Lipid yang dapat disabunkan, yaitu lipid yang dapat dihidrolisis dengan basa, seperti lemak, dan (2) Lipid yang tidak dapat disabunkan, seperti steroid.

3.4.3 Fungsi Lipid

Lipid memiliki fungsi sebagai berikut:

1. Sebagai komponen struktur membran. Fungsi membran diantaranya adalah sebagai *barier permeabel*.
2. Berperan sebagai lapisan pelindung untuk mencegah infeksi dan kehilangan atau penambahan air berlebihan.
3. Berperan sebagai energi cadangan.
4. Berperan dalam interaksi antar sel dengan senyawa kimia di luar sel, seperti dalam proses kekebalan jaringan, sebagai penghalang

isolasi, serta melindungi dari panas, tekanan listrik, dan tekanan fisik.

5. Berperan sebagai komponen dalam proses transpor melalui membran, seperti kofaktor atau prekursor enzim untuk aktivitas tertentu, misalnya fosfolipid dalam darah, koenzim A, dan lainnya.

3.5 Asam Nukleat

3.5.1 Definisi Asam Nukleat

Asam nukleat merupakan makromolekul kompleks dengan massa molekul tinggi yang terdiri atas rantai nukleotida dan berfungsi menyimpan informasi genetik. Dua jenis asam nukleat yang paling umum adalah asam deoksiribonukleat (DNA) dan asam ribonukleat (RNA). Asam nukleat ditemukan di semua sel hidup serta pada virus. Asam nukleat juga disebut polinukleotida karena terdiri atas banyak nukleotida sebagai monomernya. Setiap nukleotida terdiri atas tiga komponen utama, yaitu gugus fosfat, gula pentosa, dan basa nitrogen.

3.5.2 Komponen Asam Nukleat

Asam nukleat tersusun atas tiga komponen utama, yaitu gugus fosfat, gula pentosa, dan basa nitrogen. Di antara ketiga komponen tersebut, hanya basa nitrogen yang memungkinkan adanya variasi. Identifikasi jenis asam nukleat didasarkan pada urutan basa nitrogen yang menyusunnya. Asam nukleat sendiri terdiri dari monomer-monomer yang disebut nukleotida, yang masing-masing nukleotida mengandung satu gugus fosfat, satu molekul gula pentosa, dan satu basa nitrogen.

3.5.3 Struktur DNA dan RNA

1. Struktur DNA

Asam deoksiribonukleat (DNA) adalah makromolekul berbentuk benang panjang yang terdiri atas banyak deoksiribonukleotida. Setiap deoksiribonukleotida tersusun dari satu basa nitrogen, satu molekul gula, dan satu gugus fosfat. DNA merupakan senyawa kimia penting dalam makhluk hidup yang berperan utama dalam membawa materi genetik dari satu

generasi ke generasi berikutnya. Selain itu, DNA juga merupakan senyawa polinukleotida yang menyimpan dan mewariskan sifat-sifat khas pada kromosom.

DNA adalah makromolekul polinukleotida yang terdiri atas rantai nukleotida berulang, berbentuk heliks ganda, dan berpilin ke arah kanan. Setiap nukleotida tersusun dari tiga komponen utama, yaitu gula pentosa, basa nitrogen yang terbagi menjadi golongan purin (adenin dan guanin) serta golongan pirimidin (sitosin dan timin), dan gugus fosfat.

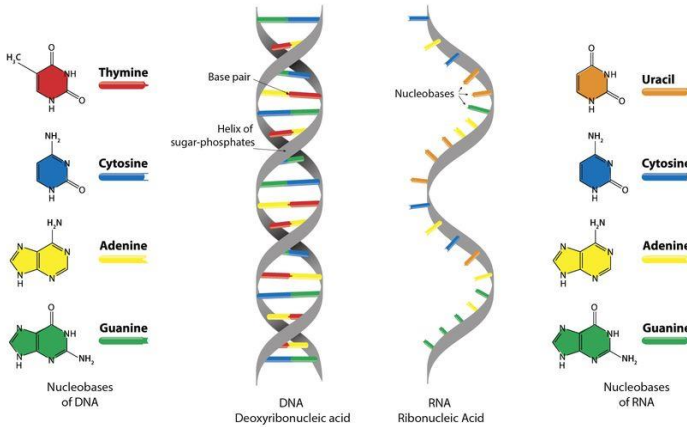
2. Struktur RNA

Asam ribonukleat (RNA) adalah rangkaian nukleotida yang terhubung membentuk rantai. RNA termasuk dalam asam nukleat berantai tunggal yang tersusun dari mononukleotida sebagai unit pembangunnya. Setiap nukleotida terdiri atas satu gugus fosfat, satu gugus pentosa, dan satu basa nitrogen (N). RNA disusun oleh empat jenis basa nitrogen, yaitu adenin (A), sitosin (C), guanin (G), dan urasil (U). Sebagian besar RNA berada di dalam sitoplasma terutama di ribosom.

RNA adalah makromolekul yang berperan dalam menyimpan dan menyalurkan informasi genetik. Sebagai penyimpan informasi genetik, RNA ditemukan pada materi genetik virus, terutama pada kelompok retrovirus. Sementara itu, sebagai penyalur informasi genetik, RNA berperan dalam proses translasi untuk sintesis protein. Selain itu, RNA juga dapat berfungsi sebagai enzim (ribozim) yang mampu mengkatalisis pembentukan RNA-nya sendiri atau molekul RNA lainnya.

Gen pada semua organisme prokariotik dan eukariotik tersusun dari DNA. Namun, pada virus, gen dapat terdiri atas DNA atau RNA. Seperti DNA, RNA merupakan polimer panjang yang tidak bercabang, tersusun dari nukleotida-nukleotida yang saling terhubung melalui ikatan 3'-5' fosfodiester. Struktur kovalen RNA berbeda dari DNA dalam dua aspek utama. Pertama, ribosa pada RNA memiliki gugus 2'-hidroksil yang tidak ditemukan pada deoksiribosa. Kedua, salah satu dari empat basa utama dalam RNA adalah urasil (U), yang menggantikan timin (T) pada DNA. Meskipun urasil dapat membentuk pasangan basa

dengan adenin seperti timin, urasil tidak memiliki gugus metil yang terdapat pada timin.



Gambar 3.8. Struktur *Double Helix* DNA dan Struktur Rantai Tunggal RNA

(Sumber:

<https://www.technologynetworks.com/genomics/articles/what-are-the-key-differences-between-dna-and-rna-296719>)

DAFTAR PUSTAKA

- Chang, Raymond. 2009. *Chemistry 10th Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Ischak, Nito Netty, dkk. *Biokimia Dasar*. 2017. Gorontalo: UNG Press.
- Jasman dan Lawa, Yosep. 2017. *Biokimia 1*. Kupang: PMIPA Press.
- Muhiddin, Nurhayani H. 2023. *Metabolisme Biomolekul*. Jakarta: PT ARRUS Intelektual Indonesia.
- Murray, Robert K, et al. (terjemahan). 2009. *Biokimia Harper Edisi 27*. Jakarta: EGC.
- Probosari, Enny. 2019. Pengaruh Protein Diet dalam Indeks Glikemik. *JNH (Journal of Nutrition dan Health)*, 7(1), 33-39.
<https://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=1391078&val=1248&title=PENGARUH%20PROTEIN%20DIET%20TERHADAP%20INDEKS%20GLIKEMIK>
- Suprayitno, Eddy dan Sulistiyati, Titik Dwi. 2017. *Metabolisme Protein*. Malang: UB Press.
- Wahyudiati, Dwi. 2017. *Biokimia*. Mataram: LEPPIM Mataram.

BAB 4

STRUKTUR DAN KOMPOSISI SEL

Oleh Iksen

4.1 Pendahuluan

Sel merupakan unit dasar kehidupan yang membentuk struktur dan fungsi semua organisme hidup. Teori sel, yang dirumuskan pada abad ke-19 oleh Schwann, Schleiden, dan Virchow, menjadi fondasi utama biologi modern (Ribatti, 2018). Teori ini menyatakan bahwa semua makhluk hidup tersusun dari sel, sel adalah unit struktural dan fungsional dasar, serta sel baru berasal dari sel yang sudah ada melalui pembelahan (*omnis cellula e cellula*) (Matveev, 2019). Kemajuan dalam biologi molekuler memperluas pemahaman ini dengan menunjukkan bahwa sel mengandung materi genetik (DNA) yang diwariskan antargenerasi, menjadi tempat reaksi biokimia esensial, dan fungsi organisme bergantung pada aktivitas sel-sel penyusunnya (Ribatti, 2018; Buja, 2021).

Sel dikelompokkan menjadi dua kategori utama: prokariot, yang sederhana tanpa membran inti dan organel bermembran seperti bakteri dan archaea, serta eukariot, yang lebih kompleks dengan inti sejati dan organel bermembran seperti mitokondria, retikulum endoplasma, dan aparatus Golgi (Panstruga, Antonin and Lichius, 2023; Tellez-Isaias and Bueno, 2024). Sel eukariot mengalami spesialisasi berdasarkan fungsi, mencerminkan keragaman dan kompleksitas kehidupan. Misalnya, sel hewan memiliki lisosom dan sentriol tetapi tidak memiliki dinding sel, sedangkan sel tumbuhan dilengkapi dinding sel kaku, kloroplas untuk fotosintesis, dan vakuola besar untuk menyimpan air dan nutrisi (Panstruga, Antonin and Lichius, 2023). Sel fungi memiliki dinding sel berbasis kitin, sementara sel protista menunjukkan keragaman luar biasa, seperti *Amoeba*, *Paramecium*, dan alga (Panstruga, Antonin and Lichius, 2023). Namun, gangguan regulasi seluler dapat menyebabkan kondisi patologis seperti kanker. Sel

kanker ditandai oleh hilangnya kontrol pertumbuhan, kemampuan menghindari apoptosis, angiogenesis, dan metastasis (Iksen, Pothongsrisit and Pongrakhananon, 2021) Studi tentang sel kanker membuka peluang untuk pengembangan terapi presisi dengan menargetkan jalur molekuler spesifik yang terlibat dalam proliferasi dan kelangsungan hidup sel abnormal.

Pemahaman biokimia tentang sel sangat penting untuk menjelaskan mekanisme kehidupan dan penyakit. Metabolisme seluler, misalnya, melibatkan jalur enzimatik kompleks di mitokondria seperti siklus Krebs dan fosforilasi oksidatif, yang menghasilkan energi bagi sel (Rigoulet *et al.*, 2020). Ekspresi gen juga menjadi fokus utama, di mana DNA ditranskripsi menjadi mRNA dan kemudian diterjemahkan oleh ribosom menjadi protein fungsional (Guo, 2014). Komunikasi antarsel melalui sinyal biokimia, seperti hormon dan reseptor, juga memainkan peran krusial dalam koordinasi fungsi tubuh (Su *et al.*, 2024). Dari sel prokariot sederhana hingga sel eukariot yang kompleks, penelitian terkini terus mengungkap dinamika seluler yang mendasari kehidupan.

4.2 Membran Sel: Komposisi dan Fungsi

Membran sel, atau membran plasma, merupakan penghalang selektif yang mengelilingi sitoplasma dan mempertahankan homeostasis dengan mengatur pertukaran zat antara sel dan lingkungannya (Vasconcelos-Cardoso *et al.*, 2022). Struktur membran didasarkan pada lapisan lipid ganda yang tersusun dari molekul amfipatik seperti fosfolipid, kolesterol, dan glikolipid (Goñi, 2014). Lapisan ini membentuk penghalang fleksibel yang memisahkan lingkungan internal sel dari ruang ekstraseluler, sekaligus menjaga integritas sel (Zhukov and Popov, 2023). Pada sel tumbuhan, membran plasma bekerja sama dengan dinding sel untuk memberikan dukungan mekanis tambahan, sedangkan pada sel hewan, membran ini bertanggung jawab penuh atas stabilitas struktural (Houston *et al.*, 2016). Selain itu, membran sel juga berfungsi sebagai garis pertahanan pertama terhadap patogen seperti bakteri dan virus. Glikokaliks, lapisan karbohidrat pada permukaan membran, bersama dengan protein reseptor,

memainkan peran penting dalam mengenali patogen dan mencegah interaksi langsung dengan sel inang (Dias and Nylandsted, 2021). Protein reseptor dapat mendeteksi molekul patogen dan memicu respons imun, sementara glikokaliks bertindak sebagai pelindung fisik (Ammendolia, Bement and Brumell, 2021). Pemahaman tentang mekanisme ini membuka peluang untuk pengembangan vaksin dan obat-obatan yang menargetkan interaksi patogen-membran. Fosfolipid, komponen utama lapisan ganda, memiliki kepala hidrofilik dan dua ekor hidrofobik. Sifat amfipatik ini memungkinkan pembentukan lapisan stabil di lingkungan berair, dengan ekor hidrofobik mengarah ke dalam dan kepala hidrofilik mengarah ke luar (Zhukov and Popov, 2023). Kolesterol tersebar di antara fosfolipid, mengatur fluiditas dan stabilitas membran. Pada suhu tinggi, kolesterol mengurangi fluiditas dengan membatasi gerakan fosfolipid, sementara pada suhu rendah, ia mencegah membran menjadi terlalu kaku. Selain itu, kolesterol membantu membentuk raft lipid, yaitu domain mikro yang kaya akan kolesterol dan sfingolipid, yang berfungsi sebagai platform untuk pensinyalan molekuler dan transportasi protein (Goñi, 2014).

Membran sel merupakan struktur dinamis yang memainkan peran krusial dalam menjaga integritas sel dan mengatur transportasi molekul (Zhukov and Popov, 2023). Salah satu sifat penting membran sel adalah fluiditas, yaitu kemampuan membran untuk bergerak dan berubah bentuk. Fluiditas membran sangat memengaruhi pergerakan molekul di dalam lapisan lipid dan mempengaruhi fungsi protein membran. Beberapa faktor yang memengaruhi fluiditas termasuk tingkat kejenuhan asam lemak, kadar kolesterol, suhu, dan komposisi lipid (Yang and Hinner, 2015). Asam lemak jenuh, dengan rantai karbon lurus dan tanpa ikatan rangkap, cenderung membuat membran lebih kaku karena molekul-molekulnya dapat berkemas rapat. Sebaliknya, asam lemak tidak jenuh, yang memiliki ikatan rangkap dan struktur bengkok, meningkatkan fluiditas dengan mencegah pengemasan yang terlalu rapat (Chakraborty *et al.*, 2020). Membran yang terlalu kaku atau terlalu cair dapat mengganggu proses vital seperti pembentukan vesikel, difusi protein, dan transduksi sinyal. Selain itu, kolesterol memainkan peran ganda dalam mengatur fluiditas: pada suhu

tinggi, kolesterol mengurangi fluiditas dengan membatasi pergerakan ekor asam lemak, sedangkan pada suhu rendah, kolesterol mencegah membran menjadi terlalu kaku dengan menghambat pengemasan fosfolipid (Chakraborty *et al.*, 2020). Keseimbangan antara asam lemak jenuh, tidak jenuh, dan kolesterol ini memastikan membran tetap fleksibel dan fungsional, memungkinkan proses penting seperti transportasi molekul, sinyal seluler, dan adaptasi terhadap perubahan lingkungan (Chakraborty *et al.*, 2020). Tanpa fluiditas yang optimal, membran sel tidak dapat menjalankan fungsinya dengan efektif, yang dapat mengganggu kelangsungan hidup sel.

Protein membran merupakan komponen krusial dalam struktur dan fungsi membran sel, yang dapat dikategorikan menjadi dua jenis utama: protein integral dan protein perifer (Xie *et al.*, 2023). Protein integral menembus seluruh lapisan lipid dan mencakup protein transport seperti saluran ion, pompa, dan transporter. Contohnya adalah akuaporin, yang memfasilitasi pergerakan air melintasi membran; Na^+/K^+ -ATPase, sebuah pompa ion yang mempertahankan gradien elektrokimia penting untuk konduksi impuls saraf dan kontraksi otot; dan reseptor G-protein, yang terlibat dalam jalur pensinyalan seluler. Protein perifer melekat pada permukaan membran dan berperan dalam pensinyalan, aktivitas enzimatik, serta dukungan struktural. Banyak protein ini berinteraksi dengan komponen sitoskeleton untuk menjaga bentuk sel dan memfasilitasi transportasi intraseluler (Xie *et al.*, 2023).

Karbohidrat pada permukaan ekstraseluler membentuk glikokaliks, lapisan kaya karbohidrat yang terlibat dalam pengenalan sel dan komunikasi. Glikokaliks terdiri dari glikoprotein dan glikolipid yang berfungsi dalam pengenalan diri oleh sistem kekebalan tubuh, interaksi antarsel seperti dalam pembentukan jaringan, dan interaksi dengan patogen seperti virus dan bakteri. Pada sel endotel, glikokaliks berfungsi sebagai pelindung terhadap kerusakan mekanis dan peradangan (Kuo and Paszek, 2021). Membran juga mengatur transportasi molekul melalui mekanisme pasif (difusi sederhana dan difusi terfasilitasi) dan aktif (seperti pompa ion dan endositosis/eksositosis). Proses ini memastikan

bahwa sel tetap seimbang secara internal meskipun terjadi perubahan lingkungan eksternal (Goñi, 2014).

Membran sel juga merupakan tempat utama untuk transduksi sinyal, memungkinkan sel merespons perubahan lingkungan. Interaksi reseptor-ligand, jalur utusan kedua seperti cAMP dan Ca^{2+} , serta komunikasi antarsel melalui gap junction dan molekul adhesi memainkan peran penting dalam proses seperti pertumbuhan, diferensiasi, respons imun, dan homeostasis (Schumann, 2022). Dengan integrasi lipid, protein, dan karbohidrat, membran sel adalah struktur dinamis yang kompleks, memastikan fungsi seluler berjalan dengan baik.

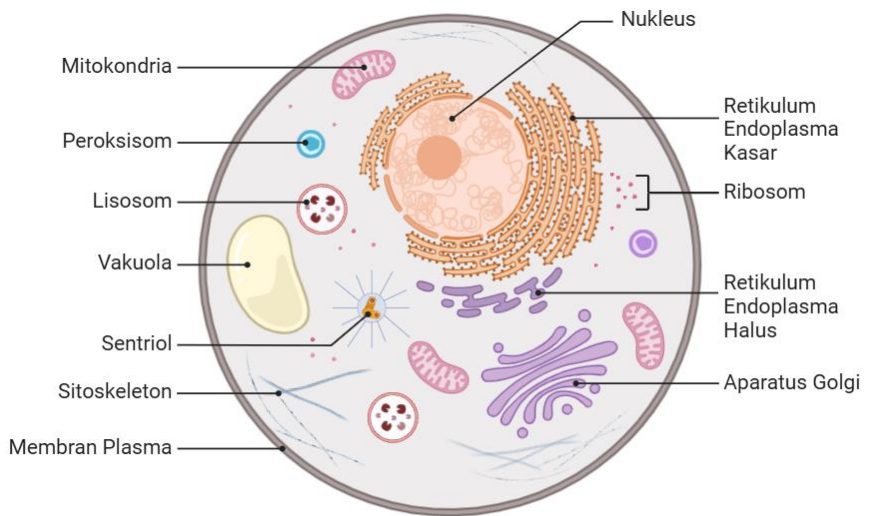
Fungsi lain dari membran sel adalah sebagai alat transportasi untuk melintasi membran sel dimana proses ini sangat fundamental yang memungkinkan sel untuk mengambil nutrisi, mengeluarkan limbah, dan menjaga keseimbangan internal (Yang and Hinner, 2015; Ammendolia, Bement and Brumell, 2021). Ada beberapa mekanisme transportasi yang digunakan oleh sel, yaitu difusi pasif, osmosis, transpor aktif, serta endositosis dan eksositosis (Stillwell, 2016). Difusi pasif adalah pergerakan molekul atau ion dari area dengan konsentrasi tinggi ke area dengan konsentrasi rendah tanpa memerlukan energi. Proses ini terjadi secara alami dan contohnya adalah difusi oksigen dan karbon dioksida melintasi membran sel. Osmosis adalah bentuk khusus difusi pasif yang melibatkan pergerakan air melalui membran semipermeabel dari area dengan konsentrasi zat terlarut rendah (hipotonik) ke area dengan konsentrasi zat terlarut tinggi (hipertonik). Osmosis penting untuk menjaga keseimbangan air dalam sel (Stillwell, 2016).

Transpor aktif memerlukan energi dalam bentuk ATP untuk memindahkan molekul atau ion melawan gradien konsentrasi, yaitu dari area dengan konsentrasi rendah ke area dengan konsentrasi tinggi (Zeuthen, 1995). Contohnya adalah pompa Na^+/K^+ -ATPase, yang menggerakkan ion natrium keluar sel dan ion kalium masuk ke dalam sel, menjaga potensial membran yang diperlukan untuk fungsi seluler. Selain itu, sel juga menggunakan endositosis dan eksositosis untuk transportasi partikel besar atau molekul kompleks. Endositosis adalah proses di mana sel menelan partikel atau cairan dari luar dengan membentuk vesikel dari membran sel.

Contohnya adalah fagositosis (penelanan partikel padat) dan pinositosis (penelanan cairan). Eksositosis adalah kebalikannya, di mana sel mengeluarkan molekul besar atau limbah dengan menggabungkan vesikel intraseluler dengan membran sel dan melepaskan isinya ke luar sel (Zeuthen, 1995; Stillwell, 2016). Proses ini penting untuk sekresi hormon, neurotransmitter, atau pembuangan limbah. Secara keseluruhan, mekanisme transportasi ini memastikan sel dapat berinteraksi dengan lingkungannya, mempertahankan homeostasis, dan menjalankan fungsi biologisnya dengan efisien. Setiap mekanisme memiliki peran khusus, mulai dari transportasi molekul kecil seperti air dan ion hingga partikel besar seperti protein dan organel.

4.3 Organel Sel dan Fungsi Biokimia

Organel sel adalah komponen-komponen khusus yang terdapat di dalam sel, masing-masing memiliki peran dan fungsi tertentu untuk mendukung kelangsungan hidup dan aktivitas sel (Gambar 4.1). Struktur-struktur ini dapat dianggap sebagai "organ kecil" yang bekerja secara terkoordinasi untuk memastikan sel dapat berfungsi dengan baik. Contoh organel meliputi nukleus, mitokondria, retikulum endoplasma, aparatus Golgi, lisosom, dan peroksisom. Setiap organel memiliki tugas spesifik, seperti menyimpan informasi genetik, menghasilkan energi, atau mendetoksifikasi senyawa berbahaya.



Gambar 4.1. Struktur dan Organel Sel

Pentingnya organel bagi kehidupan tidak dapat diremehkan. Pertama, organel memungkinkan spesialisasi fungsi, di mana setiap struktur menjalankan proses biokimia tertentu. Misalnya, mitokondria bertanggung jawab untuk menghasilkan energi melalui fosforilasi oksidatif, sementara ribosom terlibat dalam sintesis protein. Kedua, organel memfasilitasi kompartementalisasi, yaitu pemisahan proses biokimia dalam ruang terpisah. Hal ini mencegah reaksi yang tidak diinginkan dan meningkatkan efisiensi metabolisme. Ketiga, organel berperan dalam regulasi dan koordinasi aktivitas sel. Contohnya, nukleus mengatur ekspresi gen, sedangkan aparatus Golgi memodifikasi dan mengirimkan protein ke tujuan yang tepat. Keempat, organel membantu sel beradaptasi dengan lingkungannya. Misalnya, peroksisom melindungi sel dari kerusakan oksidatif dengan mendetoksifikasi senyawa berbahaya seperti hidrogen peroksida. Tanpa organel, sel tidak akan mampu menjalankan fungsi vitalnya, seperti menghasilkan energi, mensintesis protein, atau membuang limbah. Pada tingkat yang lebih luas, organisme multiseluler tidak akan dapat bertahan hidup tanpa sel-sel yang berfungsi dengan baik. Dengan demikian, organel adalah fondasi dari kehidupan seluler dan memainkan peran kritis

dalam mendukung semua proses biologis yang diperlukan untuk kelangsungan hidup organisme (Voeltz and Barr, 2013).

4.3.1 Nukleus

Nukleus adalah organel terbesar dalam sel dan berfungsi sebagai pusat kendali sel. Strukturnya terdiri dari membran nukleus ganda yang dilengkapi pori-pori nukleus, yang memungkinkan pertukaran molekul antara nukleus dan sitoplasma. Di dalam nukleus, DNA disimpan dalam bentuk kromatin, yang dapat mengembun menjadi kromosom selama pembelahan sel. Nukleus juga mengandung nukleolus, struktur padat yang bertanggung jawab untuk sintesis ribosom dengan merakit RNA ribosom (rRNA) dan protein. Fungsi biokimia utama nukleus adalah penyimpanan dan replikasi DNA, serta transkripsi gen menjadi mRNA, yang membawa informasi genetik ke ribosom untuk sintesis protein. Selain itu, nukleus mengatur ekspresi gen melalui mekanisme seperti modifikasi RNA dan kontrol transkripsi, yang menentukan protein apa yang akan diproduksi oleh sel. Tanpa nukleus, sel tidak dapat mengatur aktivitas genetiknya, yang akan mengganggu fungsi dan kelangsungan hidup sel (Lammerding, 2011).

4.3.2 Ribosom

Ribosom adalah organel kecil yang terdiri dari RNA ribosom (rRNA) dan protein. Mereka bertindak sebagai mesin molekuler untuk sintesis protein melalui proses translasi mRNA. Ribosom dapat ditemukan dalam dua bentuk: ribosom bebas yang tersebar di sitoplasma dan ribosom terikat yang menempel pada retikulum endoplasma kasar. Ribosom bebas biasanya mensintesis protein yang digunakan di dalam sel, sementara ribosom terikat menghasilkan protein yang akan disekresikan atau ditempatkan di membran sel. Fungsi biokimia ribosom sangat penting karena mereka adalah pusat biosintesis protein, yang diperlukan untuk hampir semua proses metabolisme, pertumbuhan, dan perbaikan sel. Tanpa ribosom, sel tidak dapat menghasilkan protein, yang akan menghentikan semua aktivitas seluler (Tate and Poole, 2004; Wang *et al.*, 2022).

4.3.3 Retikulum endoplasma

Retikulum Endoplasma (RE) adalah jaringan membran yang terbagi menjadi dua jenis: RE kasar dan RE halus. RE kasar ditutupi oleh ribosom dan berfungsi dalam sintesis protein, terutama protein yang akan disekresikan atau ditempatkan di membran sel. Protein yang dihasilkan oleh RE kasar kemudian dimodifikasi dan dilipat di dalam lumen RE. Sementara itu, RE halus tidak memiliki ribosom dan berperan dalam sintesis lipid, detoksifikasi zat beracun, dan metabolisme karbohidrat. RE halus juga terlibat dalam penyimpanan ion kalsium, yang penting untuk pensinyalan sel. Secara biokimia, RE kasar dan halus bekerja sama untuk memastikan produksi dan modifikasi molekul yang diperlukan untuk fungsi sel, seperti protein, lipid, dan karbohidrat. Tanpa RE, sel tidak dapat mensintesis atau memproses molekul-molekul penting ini (Berridge, 2002).

4.3.4 Aparatus Golgi

Aparatus Golgi adalah organel yang terdiri dari kumpulan vesikel pipih yang bertumpuk. Fungsi utamanya adalah modifikasi, pengemasan, dan distribusi protein dan lipid yang diproduksi oleh RE. Golgi menerima protein dan lipid dari RE, memodifikasinya (misalnya, melalui glikosilasi), dan mengemasnya ke dalam vesikel untuk dikirim ke tujuan akhirnya, seperti membran sel, lisosom, atau luar sel. Selain itu, Golgi juga terlibat dalam pembentukan lisosom dan vesikel sekretori. Secara biokimia, Golgi berperan sebagai pusat pemrosesan dan distribusi molekul, memastikan bahwa protein dan lipid yang dihasilkan oleh sel memiliki struktur dan fungsi yang tepat sebelum digunakan atau disekresikan. Tanpa aparatus Golgi, sel tidak dapat mengirimkan molekul-molekul penting ke lokasi yang tepat, yang akan mengganggu komunikasi seluler dan fungsi organel lainnya (Ravichandran, Goud and Manneville, 2020).

4.3.5 Mitokondria

Mitokondria adalah organel sel yang dikenal sebagai "pembangkit tenaga sel" karena peran utamanya dalam menghasilkan energi dalam bentuk ATP (adenosin trifosfat).

Struktur mitokondria terdiri dari membran luar yang permeabel, membran dalam yang berlipat-lipat membentuk krista, dan matriks yang berisi enzim, DNA mitokondria, serta molekul lain yang diperlukan untuk produksi energi (McBride, Neuspiel and Wasiak, 2006). Membran dalam mitokondria adalah tempat terjadinya rantai transpor elektron, sementara matriks menjadi lokasi siklus Krebs, dua proses kunci dalam respirasi seluler. Melalui proses ini, nutrisi seperti glukosa, asam lemak, dan asam amino dipecah untuk menghasilkan ATP, yang menjadi sumber energi utama bagi sel. Selain produksi energi, mitokondria juga terlibat dalam regulasi metabolisme kalsium, sintesis heme, dan apoptosis (kematian sel terprogram), di mana mitokondria melepaskan protein seperti sitokrom c untuk memicu kematian sel yang teratur. Mitokondria memiliki DNA sendiri (mtDNA) yang diwariskan secara maternal, dan mutasi pada mtDNA dapat menyebabkan penyakit mitokondria. Organel ini juga menghasilkan radikal bebas sebagai produk sampingan, yang jika tidak dikendalikan, dapat merusak sel. Secara keseluruhan, mitokondria tidak hanya penting untuk produksi energi tetapi juga untuk menjaga keseimbangan metabolisme dan kesehatan sel (McBride, Neuspiel and Wasiak, 2006; Anderson *et al.*, 2019). Tanpa mitokondria, sel tidak akan mampu menjalankan fungsi vitalnya, dan gangguan pada mitokondria sering dikaitkan dengan penyakit seperti diabetes, neurodegenerasi, dan gangguan metabolik lainnya.

4.3.6 Lisosom

Lisosom adalah organel kecil berbentuk vesikel yang mengandung berbagai enzim hidrolitik, seperti protease, lipase, dan nuklease, yang berfungsi untuk memecah makromolekul. Lisosom berperan sebagai sistem pencernaan sel, mencerna bahan-bahan yang tidak dibutuhkan, seperti partikel asing yang masuk melalui endositosis, atau komponen sel yang rusak. Proses ini disebut heterofagi. Selain itu, lisosom juga terlibat dalam autofagi, yaitu proses penghancuran organel atau komponen sel yang sudah tua atau rusak untuk didaur ulang. Autofagi sangat penting untuk menjaga kesehatan sel, terutama dalam kondisi kekurangan nutrisi atau stres. Lisosom juga berperan dalam apoptosis (kematian sel

terprogram), di mana enzim-enzimnya dilepaskan untuk menghancurkan sel dari dalam. Tanpa lisosom, sel tidak dapat membersihkan diri dari limbah atau kerusakan, yang dapat menyebabkan penumpukan racun dan gangguan fungsi sel (Lawrence and Zoncu, 2019; Trivedi, Bartlett and Pulinilkunnil, 2020).

4.3.7 Peroxisom

Peroxisom adalah organel kecil yang mengandung enzim oksidatif, terutama katalase, yang berfungsi untuk mendetoksifikasi hidrogen peroksida (H_2O_2), produk sampingan beracun dari reaksi oksidasi. Katalase mengubah H_2O_2 menjadi air dan oksigen, melindungi sel dari kerusakan oksidatif. Selain detoksifikasi, peroxisom juga terlibat dalam oksidasi asam lemak rantai panjang, yang menghasilkan energi dan prekursor untuk biosintesis molekul lain. Peroxisom juga berperan dalam metabolisme senyawa tertentu, seperti purin dan alkohol. Pada sel tumbuhan, peroxisom terlibat dalam proses fotorespirasi, yang membantu mengurangi efek samping dari fotosintesis. Secara keseluruhan, peroxisom berperan penting dalam menjaga keseimbangan redoks sel dan melindungi sel dari kerusakan akibat radikal bebas, yang dapat menyebabkan penyakit seperti kanker dan penuaan dini (Kumar *et al.*, 2024).

4.3.8 Sentriol

Sentriol adalah struktur berbentuk silinder yang terdiri dari susunan mikrotubulus yang terorganisasi dengan rapat. Biasanya, sentriol ditemukan berpasangan dan membentuk struktur yang disebut sentrosom, yang terletak di dekat nukleus sel. Secara biokimia, sentriol memiliki peran penting dalam pembentukan gelendong mitosis selama pembelahan sel. Gelendong mitosis adalah struktur yang terdiri dari mikrotubulus yang berfungsi untuk memisahkan kromosom secara merata ke dua sel anak selama proses mitosis atau meiosis. Selain itu, sentriol juga berperan dalam organisasi mikrotubulus dalam sitoskeleton, yang memengaruhi bentuk sel, pergerakan organel, dan transportasi intraseluler (Winey and O'Toole, 2014). Hubungan sentriol dengan proses

biokimia terletak pada kemampuannya untuk mengatur pemisahan kromosom secara akurat selama pembelahan sel. Tanpa sentriol, proses mitosis dapat terganggu, menyebabkan kesalahan dalam distribusi kromosom yang berpotensi memicu masalah seperti aneuploidi (jumlah kromosom abnormal) atau kegagalan pembelahan sel. Sentriol juga terlibat dalam pembentukan struktur seperti silia dan flagela, yang penting untuk pergerakan sel atau aliran cairan di permukaan sel. Dengan demikian, sentriol memainkan peran krusial dalam menjaga integritas genetik dan fungsi seluler, terutama dalam sel-sel yang aktif membelah atau memerlukan mobilitas (Marshall, 2007).

4.3.9 Vakuola

Vakuola adalah organel berisi cairan yang dikelilingi oleh membran tunggal (tonoplas). Pada sel tumbuhan, vakuola besar dan sentral, sedangkan pada sel hewan, ukurannya lebih kecil. Fungsi utamanya meliputi penyimpanan air, nutrisi, dan ion, yang membantu menjaga tekanan turgor dan keseimbangan osmotik (Jiang *et al.*, 2021). Vakuola juga berperan dalam detoksifikasi dengan menyimpan limbah dan senyawa beracun, serta mengatur keseimbangan ion dan pH (homeostasis). Pada tumbuhan, vakuola mengandung pigmen seperti antosianin yang memberi warna pada bunga dan buah, serta senyawa toksik untuk pertahanan. Selain itu, vakuola dapat terlibat dalam pencernaan intraseluler dengan menyimpan enzim hidrolitik. Secara keseluruhan, vakuola penting untuk menjaga keseimbangan sel, menyimpan senyawa penting, dan melindungi sel dari kerusakan. Tanpa vakuola, sel tidak dapat berfungsi optimal (Wada, 2013).

4.3.9 Sitoplasma

Sitoplasma adalah cairan kental yang mengisi bagian dalam sel, dikelilingi oleh membran sel. Strukturnya terdiri dari sitosol (cairan berbasis air), organel, dan sitoskeleton (jaringan protein yang memberikan struktur dan bentuk sel) (Luby-Phelps, 2013). Sitoplasma berfungsi sebagai medium untuk reaksi biokimia, menyediakan lingkungan yang mendukung terjadinya proses metabolisme seluler, seperti glikolisis dan sintesis protein. Selain itu,

sitoplasma juga menjadi tempat terjadinya metabolisme seluler, di mana nutrisi dipecah dan energi dihasilkan. Hubungannya dengan proses biokimia terletak pada perannya sebagai lingkungan tempat berlangsungnya banyak reaksi enzimatik, yang penting untuk menjaga kelangsungan hidup sel. Tanpa sitoplasma, organel tidak dapat berfungsi dengan baik, dan reaksi biokimia yang vital tidak dapat terjadi (Arjona, Najafi and Minc, 2023).

4.3.10 Sitoskeleton

Sitoskeleton adalah jaringan serat protein yang membentuk kerangka internal sel, memberikan bentuk, dukungan struktural, dan mobilitas (Fletcher and Mullins, 2010). Meskipun tidak memiliki membran seperti organel lainnya, sitoskeleton bersifat dinamis dan dapat berubah sesuai kebutuhan sel. Terdiri dari tiga komponen utama yaitu mikrofilamen, filamen intermediat, dan mikrotubulus. Mikrofilamen, terbuat dari protein aktin, memberikan dukungan struktural, fleksibilitas, dan berperan dalam kontraksi otot serta pergerakan sel. Filamen intermediat, dengan diameter sedang, memberikan kekuatan mekanis dan stabilitas, melindungi sel dari stres fisik. Mikrotubulus, yang terbuat dari protein tubulin, membentuk struktur berongga yang berfungsi dalam transportasi intraseluler, pembelahan sel, dan pergerakan flagela atau silia (Hohmann and Dehghani, 2019). Secara keseluruhan, sitoskeleton menjaga bentuk sel, mendukung pergerakan sel, mengatur transportasi intraseluler, memfasilitasi pembelahan sel, dan membantu komunikasi antarorganel. Dengan fungsinya yang beragam, sitoskeleton menjadi komponen penting yang memastikan sel dapat berfungsi secara dinamis dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Ammendolia, D. A., Bement, W. M. and Brumell, J. H. (2021) 'Plasma membrane integrity: implications for health and disease.', *BMC biology*. England, 19(1), p. 71. doi: 10.1186/s12915-021-00972-y.
- Anderson, A. J. *et al.* (2019) 'Mitochondria-hubs for regulating cellular biochemistry: emerging concepts and networks.', *Open biology*. England, 9(8), p. 190126. doi: 10.1098/rsob.190126.
- Arjona, M. I., Najafi, J. and Minc, N. (2023) 'Cytoplasm mechanics and cellular organization.', *Current opinion in cell biology*. England, 85, p. 102278. doi: 10.1016/j.ceb.2023.102278.
- Berridge, M. J. (2002) 'The endoplasmic reticulum: a multifunctional signaling organelle.', *Cell calcium*. Netherlands, 32(5-6), pp. 235-249. doi: 10.1016/s0143416002001823.
- Buja, L. M. (2021) 'The cell theory and cellular pathology: Discovery, refinements and applications fundamental to advances in biology and medicine.', *Experimental and molecular pathology*. Netherlands, 121, p. 104660. doi: 10.1016/j.yexmp.2021.104660.
- Chakraborty, S. *et al.* (2020) 'How cholesterol stiffens unsaturated lipid membranes.', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. United States, 117(36), pp. 21896-21905. doi: 10.1073/pnas.2004807117.
- Dias, C. and Nylandsted, J. (2021) 'Plasma membrane integrity in health and disease: significance and therapeutic potential.', *Cell discovery*. England, 7(1), p. 4. doi: 10.1038/s41421-020-00233-2.
- Fletcher, D. A. and Mullins, R. D. (2010) 'Cell mechanics and the cytoskeleton.', *Nature*. England, 463(7280), pp. 485-492. doi: 10.1038/nature08908.
- Goñi, F. M. (2014) 'The basic structure and dynamics of cell membranes: an update of the Singer-Nicolson model.', *Biochimica et biophysica acta*. Netherlands, 1838(6), pp. 1467-1476. doi: 10.1016/j.bbamem.2014.01.006.

- Guo, J. (2014) 'Transcription: the epicenter of gene expression.', *Journal of Zhejiang University. Science. B. China*, pp. 409–411. doi: 10.1631/jzus.B1400113.
- Hohmann, T. and Dehghani, F. (2019) 'The Cytoskeleton-A Complex Interacting Meshwork.', *Cells. Switzerland*, 8(4). doi: 10.3390/cells8040362.
- Houston, K. *et al.* (2016) 'The Plant Cell Wall: A Complex and Dynamic Structure As Revealed by the Responses of Genes under Stress Conditions.', *Frontiers in plant science. Switzerland*, 7, p. 984. doi: 10.3389/fpls.2016.00984.
- Iksen, Pothongsrisit, S. and Pongrakhananon, V. (2021) 'Targeting the PI3K/AKT/mTOR signaling pathway in lung cancer: An update regarding potential drugs and natural products', *Molecules. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 26(13), p. 4100. doi: 10.3390/MOLECULES26134100.
- Jiang, Y.-T. *et al.* (2021) 'Multiple functions of the vacuole in plant growth and fruit quality.', *Molecular horticulture. England*, 1(1), p. 4. doi: 10.1186/s43897-021-00008-7.
- Kumar, R. *et al.* (2024) 'The peroxisome: an update on mysteries 3.0.', *Histochemistry and cell biology. Germany*, 161(2), pp. 99–132. doi: 10.1007/s00418-023-02259-5.
- Kuo, J. C.-H. and Paszek, M. J. (2021) 'Glycocalyx Curving the Membrane: Forces Emerging from the Cell Exterior.', *Annual review of cell and developmental biology. United States*, 37, pp. 257–283. doi: 10.1146/annurev-cellbio-120219-054401.
- Lammerding, J. (2011) 'Mechanics of the nucleus.', *Comprehensive Physiology. United States*, 1(2), pp. 783–807. doi: 10.1002/cphy.c100038.
- Lawrence, R. E. and Zoncu, R. (2019) 'The lysosome as a cellular centre for signalling, metabolism and quality control.', *Nature cell biology. England*, 21(2), pp. 133–142. doi: 10.1038/s41556-018-0244-7.
- Luby-Phelps, K. (2013) 'The physical chemistry of cytoplasm and its influence on cell function: an update.', *Molecular biology of the cell. United States*, 24(17), pp. 2593–2596. doi: 10.1091/mbc.E12-08-0617.
- Marshall, W. F. (2007) 'What is the function of centrioles?', *Journal of*

- cellular biochemistry*. United States, 100(4), pp. 916–922. doi: 10.1002/jcb.21117.
- Matveev, V. V (2019) ‘Cell theory, intrinsically disordered proteins, and the physics of the origin of life.’, *Progress in biophysics and molecular biology*. England, 149, pp. 114–130. doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2019.04.001.
- McBride, H. M., Neuspiel, M. and Wasiak, S. (2006) ‘Mitochondria: more than just a powerhouse.’, *Current biology: CB*. England, 16(14), pp. R551–60. doi: 10.1016/j.cub.2006.06.054.
- Panstruga, R., Antonin, W. and Lichius, A. (2023) ‘Looking outside the box: a comparative cross-kingdom view on the cell biology of the three major lineages of eukaryotic multicellular life.’, *Cellular and molecular life sciences: CMLS*. Switzerland, 80(8), p. 198. doi: 10.1007/s00018-023-04843-3.
- Ravichandran, Y., Goud, B. and Manneville, J.-B. (2020) ‘The Golgi apparatus and cell polarity: Roles of the cytoskeleton, the Golgi matrix, and Golgi membranes.’, *Current opinion in cell biology*. England, 62, pp. 104–113. doi: 10.1016/j.ceb.2019.10.003.
- Ribatti, D. (2018) ‘An historical note on the cell theory.’, *Experimental cell research*. United States, 364(1), pp. 1–4. doi: 10.1016/j.yexcr.2018.01.038.
- Rigoulet, M. *et al.* (2020) ‘Cell energy metabolism: An update.’, *Biochimica et biophysica acta. Bioenergetics*. Netherlands, 1861(11), p. 148276. doi: 10.1016/j.bbabbio.2020.148276.
- Schumann, J. (2022) ‘Molecular Mechanism of Cellular Membranes for Signal Transduction.’, *Membranes*. Switzerland. doi: 10.3390/membranes12080748.
- Stillwell, W. (2016) ‘Membrane Transport.’, *An Introduction to Biological Membranes*, pp. 423–451. doi: 10.1016/B978-0-444-63772-7.00019-1.
- Su, J. *et al.* (2024) ‘Cell-cell communication: new insights and clinical implications.’, *Signal transduction and targeted therapy*. England, 9(1), p. 196. doi: 10.1038/s41392-024-01888-z.
- Tate, W. P. and Poole, E. S. (2004) ‘The ribosome: lifting the veil from a fascinating organelle.’, *BioEssays: news and reviews in*

- molecular, cellular and developmental biology*. United States, 26(5), pp. 582–588. doi: 10.1002/bies.20022.
- Tellez-Isaias, G. and Bueno, D. J. (2024) 'Prokaryotes versus Eukaryotes: Which is the host and which is the guest?', *Revista Argentina de microbiologia*. Argentina, pp. 201–202. doi: 10.1016/j.ram.2024.09.001.
- Trivedi, P. C., Bartlett, J. J. and Pulinilkunnil, T. (2020) 'Lysosomal Biology and Function: Modern View of Cellular Debris Bin.', *Cells*. Switzerland, 9(5). doi: 10.3390/cells9051131.
- Vasconcelos-Cardoso, M. *et al.* (2022) 'Cellular and molecular mechanisms underlying plasma membrane functionality and integrity.', *Journal of cell science*. England, 135(13). doi: 10.1242/jcs.259806.
- Voeltz, G. K. and Barr, F. A. (2013) 'Cell organelles.', *Current opinion in cell biology*. England, pp. 403–405. doi: 10.1016/j.ceb.2013.06.001.
- Wada, Y. (2013) 'Vacuoles in mammals: a subcellular structure indispensable for early embryogenesis.', *Bioarchitecture*. United States, 3(1), pp. 13–19. doi: 10.4161/bioa.24126.
- Wang, Q. *et al.* (2022) 'Organelle biogenesis: ribosomes as organizer and performer.', *Science bulletin*. Netherlands, 67(16), pp. 1614–1617. doi: 10.1016/j.scib.2022.07.023.
- Winey, M. and O'Toole, E. (2014) 'Centriole structure.', *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*. England, 369(1650). doi: 10.1098/rstb.2013.0457.
- Xie, P. *et al.* (2023) 'Membrane Proteins and Membrane Curvature: Mutual Interactions and a Perspective on Disease Treatments.', *Biomolecules*. Switzerland, 13(12). doi: 10.3390/biom13121772.
- Yang, N. J. and Hinner, M. J. (2015) 'Getting across the cell membrane: an overview for small molecules, peptides, and proteins.', *Methods in molecular biology (Clifton, N.J.)*. United States, 1266, pp. 29–53. doi: 10.1007/978-1-4939-2272-7_3.
- Zeuthen, T. (1995) 'Molecular mechanisms for passive and active transport of water.', *International review of cytology*. United States, 160, pp. 99–161. doi: 10.1016/s0074-7696(08)61554-5.

Zhukov, A. and Popov, V. (2023) 'Eukaryotic Cell Membranes: Structure, Composition, Research Methods and Computational Modelling.', *International journal of molecular sciences*. Switzerland, 24(13). doi: 10.3390/ijms241311226.

BAB 5

STRUKTUR, FUNGSI, DAN METABOLISME KARBOHIDRAT

Oleh Erlinda

5.1 Pendahuluan

Karbohidrat menjadi salah satu dari empat makromolekul utama (protein, lemak, asam nukleat, dan karbohidrat) yang dibutuhkan oleh makhluk hidup, termasuk manusia, tanaman, dan mikroba. Karbohidrat dikonsumsi oleh organisme dengan berbagai cara dan dibagi menjadi empat kelompok menurut jumlah unit monomer dalam strukturnya. Polisakarida, oligosakarida, disakarida, dan monosakarida termasuk di antaranya. Glukosa, fruktosa, selulosa, pati, glikoprotein, dan kitin termasuk di antara komponen yang ditemukan dalam semua karbohidrat dan penting untuk banyak proses tubuh. Karbohidrat berperan memasok sel dengan energi dan menjaga integritas struktural sel serta mendorong pertumbuhan dan perkembangan organisme.

Karbohidrat merupakan biomolekul yang paling melimpah di bumi. Oksidasi karbohidrat merupakan jalur utama penghasil energi di sebagian besar sel non fotosintetik. Karbohidrat, secara umum, dapat diklasifikasikan menjadi dua kelas:

1. Gula. Ini adalah zat kristal yang manis dan larut dalam air. Misalnya, glukosa, fruktosa, dan gula tebu.
2. Non-gula. Ini tidak berasa, tidak larut dalam air, dan amorf. Misalnya, pati, selulosa, dll.

Karbohidrat memiliki rumus empiris (CH_2O) dan merupakan molekul organik yang paling melimpah di alam dan disebut juga sebagai "sakarida". Karbohidrat yang larut dalam air dan rasanya manis disebut "gula". Secara biologis, karbohidrat mempunyai peran yang sangat penting untuk keberlangsungan hidup dan keseimbangan energi di alam, diantaranya:

1. Karbohidrat adalah sumber utama energi, dan pada banyak spesies hewan, karbohidrat berfungsi sebagai sumber energi cepat. Glukosa diubah melalui proses glikolisis dan siklus Krebs untuk menghasilkan ATP.
2. Glukosa berperan sebagai cadangan energi. Pada hewan, glukosa disimpan dalam bentuk glikogen, sedangkan pada tumbuhan, disimpan sebagai pati.
3. Karbohidrat yang disimpan berfungsi sebagai sumber energi, bukan sebagai sumber protein.
4. Karbohidrat berperan sebagai senyawa antara dalam sintesis lemak dan protein.
5. Karbohidrat turut berperan dalam pengaturan fungsi sistem saraf dan menyediakan energi untuk otak.
6. Karbohidrat terlibat bersama lipid dan protein dalam pembentukan antigen permukaan, molekul reseptor, vitamin, dan antibiotik.
7. Karbohidrat juga membentuk elemen struktural dan pelindung, seperti yang terdapat pada dinding sel tumbuhan dan mikroorganisme..
8. Pada hewan, karbohidrat merupakan komponen penting dalam jaringan ikat, berperan dalam transportasi biologis, komunikasi antar sel, dan pengaktifan faktor pertumbuhan
9. Karbohidrat yang kaya serat membantu mencegah sembelit dan juga berkontribusi dalam pengaturan sistem kekebalan tubuh.

Sumber karbohidrat:

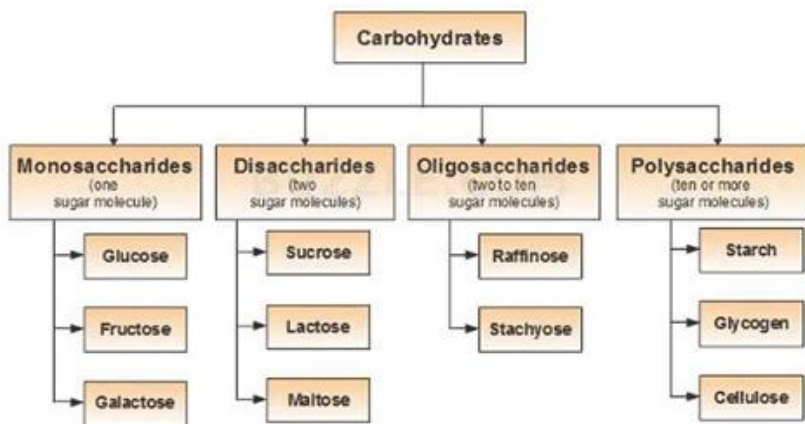
1. Produk Gandum Produk gandum merupakan sumber karbohidrat utama dalam makanan. Gandum secara alami mengandung konsentrasi pati yang tinggi.
2. Sayuran bertepung, seperti kentang, ubi, kacang hijau, dan jagung, mengandung karbohidrat kompleks yang tinggi, yang kemudian dicerna oleh tubuh menjadi gula..
3. Semua buah dan jus buah mengandung karbohidrat berupa gula alami, seperti glukosa dan fruktosa.
4. Susu sapi adalah satu-satunya sumber karbohidrat yang berasal dari hewan, bukan dari tanaman.

5. Konsumsi permen dan makanan manis lainnya secara signifikan meningkatkan jumlah karbohidrat dalam pola makan kita.

5.2 Struktur Dan Fungsi Karbohidrat

Karbohidrat didefinisikan sebagai biomolekul yang mengandung sekelompok senyawa karbonil (aldehida atau keton) dan beberapa gugus hidroksil. Ini terdiri dari atom karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O), biasanya dengan atom hidrogen-oksigen rasio 2:1 (seperti dalam air). Tetapi beberapa senyawa tidak mengikuti definisi stoikiometri yang tepat ini, seperti uronik asam. Dan ada juga yang lain yang, meskipun memiliki gugus yang mirip dengan karbohidrat, tidak diklasifikasikan sebagai salah satu dari karbohidrat, misalnya formaldehida dan asam asetat.

Karbohidrat dibagi menjadi empat kelompok utama berdasarkan tingkat polimerisasi: monosakarida, disakarida, oligosakarida, dan polisakarida. Berikut ini struktur dan fungsi kelompok karbohidrat.



Gambar 5.1. Klasifikasi Karbohidrat

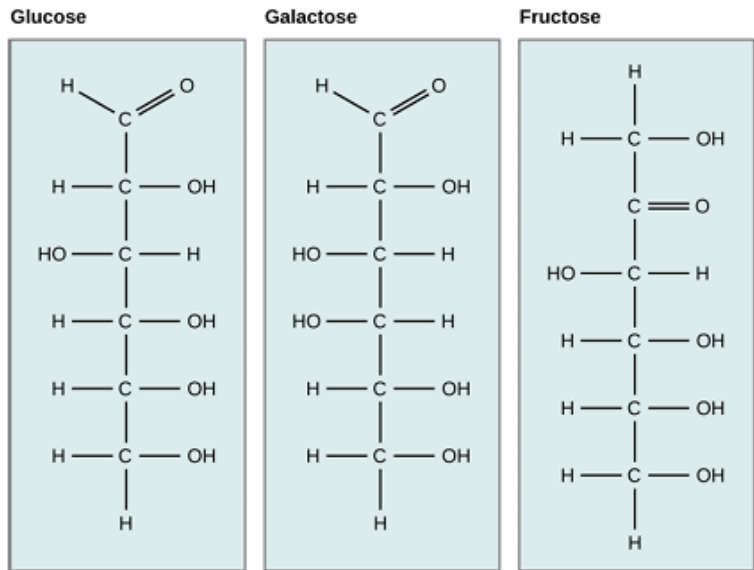
5.2.1 Monosakarida

1. Pengertian Monosakarida

Monosakarida adalah karbohidrat paling sederhana dan tidak dapat dihidrolisis menjadi karbohidrat lain yang lebih kecil.

"Mono" dalam monosakarida berarti satu, yang menunjukkan hanya ada satu unit gula. Monosakarida adalah bahan penyusun disakarida dan polisakarida. Karena alasan ini, monosakarida juga dikenal sebagai gula sederhana.

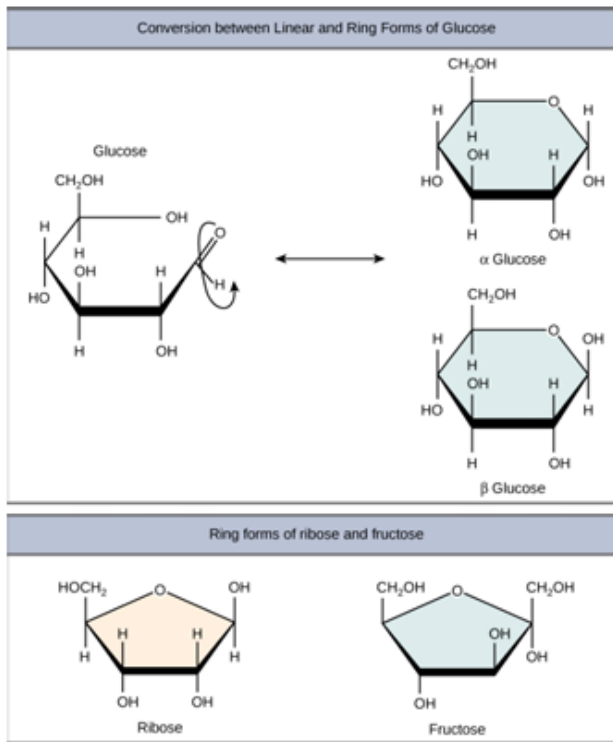
Gula sederhana ini adalah padatan kristal tak berwarna yang larut dalam air dan tidak larut dalam pelarut nonpolar. Rumus umum yang mewakili struktur monosakarida adalah $C_n(H_2O)_n$ atau $C_nH_{2n}O_n$. Dihidroksiaseton dan D- dan L-gliseraldehid adalah monosakarida terkecil – di sini, $n=3$. Monosakarida yang mengandung gugus aldehid (gugus fungsi dengan struktur R-CHO) dikenal sebagai aldolase dan yang mengandung gugus keton disebut ketosa (gugus fungsi dengan struktur $RC(=O)R$). Beberapa contoh monosakarida adalah glukosa, fruktosa, eritrosula, dan ribulosa. D-glukosa adalah karbohidrat yang paling umum, tersebar luas, dan melimpah. Umumnya dikenal sebagai dekstrosa dan merupakan aldehid yang mengandung enam atom karbon, disebut aldohexosa. Sebagian besar nama monosakarida diakhiri dengan sufiks -osa. Dan berdasarkan jumlah karbon, yang biasanya berkisar antara tiga hingga tujuh, mereka dapat dikenal sebagai triosa (tiga karbon), tetrosa (empat karbon), pentosa (lima karbon), heksosa (enam karbon), dan heptosa (tujuh karbon). Meskipun glukosa, galaktosa, dan fruktosa semuanya memiliki rumus kimia $C_6H_{12}O_6$, senyawa tersebut berbeda pada tingkat struktural dan kimia karena pengaturan kelompok fungsional yang berbeda di sekitar karbon asimetrisnya.



Gambar 5.2. Representasi Struktur dari Glukosa, Galaktosa, dan Fruktosa

2. Struktur Monosakarida

Monosakarida hadir sebagai rantai linier atau molekul berbentuk cincin. Dalam bentuk cincin, gugus hidroksil glukosa (-OH) dapat memiliki dua susunan berbeda di sekitar karbon anomerik (karbon-1 yang menjadi asimetris dalam proses pembentukan cincin). Jika gugus hidroksil berada di bawah karbon nomor 1 dalam gula, dikatakan berada di posisi alfa (α), dan jika berada di atas bidang, dikatakan berada di posisi beta (β).



Gambar 5.3. Struktur dari cincin Glukosa dan Fruktosa

3. Fungsi Monosakarida

Berikut adalah contoh senyawa Monosakarida dan fungsinya;

- a. Glukosa ($C_6H_{12}O_6$) merupakan sumber energi penting bagi manusia dan tanaman. Tanaman mensintesis glukosa menggunakan karbon dioksida dan air, yang selanjutnya digunakan untuk memenuhi kebutuhannya. Mereka menyimpan kelebihan glukosa sebagai pati yang dikonsumsi manusia dan herbivora.
- b. Adanya galaktosa dalam gula susu (laktosa), dan fruktosa dalam buah-buahan dan madu membuat makanan ini manis.
- c. Ribosa merupakan elemen struktural asam nukleat dan beberapa koenzim.

- d. Manosa merupakan komponen mukoprotein dan glikoprotein yang diperlukan agar tubuh berfungsi dengan baik.

5.2.2 Disakarida

1. Pengertian Disakarida

Disakarida terdiri dari dua unit gula. Ketika mengalami reaksi dehidrasi (reaksi kondensasi atau sintesis dehidrasi), mereka melepaskan dua unit monosakarida. Pada proses ini, gugus hidroksil dari satu monosakarida bergabung dengan atom hidrogen dari monosakarida lainnya melalui ikatan kovalen, sehingga menghasilkan pelepasan molekul air. Ikatan kovalen yang terbentuk antara kedua molekul gula tersebut disebut sebagai ikatan glikosidik.

Ikatan glikosidik dapat terbentuk dalam dua tipe, yaitu alfa dan beta. Ikatan alfa terbentuk ketika gugus OH pada karbon-1 glukosa pertama berada di bawah bidang cincin, sedangkan ikatan beta terbentuk ketika gugus OH pada karbon-1 berada di atas bidang cincin.

Beberapa contoh disakarida meliputi laktosa, maltosa, dan sukrosa. Sukrosa, yang merupakan disakarida yang paling banyak ditemukan, terdiri dari satu molekul D-glukosa dan satu molekul D-fruktosa. Nama sistematis sukrosa adalah O- α -D-glukopiranosil-(1 \rightarrow 2)-D-fruktofuranosida. Laktosa, yang terdapat secara alami dalam susu mamalia, terdiri dari satu molekul D-galaktosa dan satu molekul D-glukosa. Nama sistematis laktosa adalah O- β -D-galaktopiranosil (1 \rightarrow 4)-D-glukopiranosida.

Disakarida dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok berdasarkan kemampuannya untuk menjalani reaksi oksidasi-reduksi.

1. Gula pereduksi: Disakarida yang gula pereduksinya memiliki unit hemiasetal bebas yang berfungsi sebagai gugus aldehida pereduksi. Contohnya termasuk maltosa dan selobiosa.

2. Gula Non-pereduksi: Disakarida yang tidak memiliki hemiasetal bebas karena mereka berikatan melalui ikatan

asetal antara pusat anomernya. Contohnya adalah sukrosa dan trehalosa.

Beberapa contoh disakarida lainnya meliputi laktulosa, kitobiosa, kojibiosa, nigerosa, isomaltosa, soforosa, laminaribiosa, gentiobiosa, turanosa, maltulosa, trehalosa, palatinosa, gentiobiulosa, manobiosa, melibiosa, melibiulosa, rutinosa, rutinulosa, dan xilobiosa.

Tabel 5.1. Tabel Disakarida dengan Unit Monomernya

Disaccharide	Monomer Units
Sucrose	Glucose and Fructose
Lactose	Galactose and Glucose
Maltose	Glucose and Glucose (α -1,4 linkage)
Trehalose	Glucose and Glucose (α -1, α -1 linkage)
Cellobiose	Glucose and Glucose (β -1,4 linkage)
Gentiobiose	Glucose and Glucose (β -1,6 linkage)

2. Fungsi Disakarida

Berikut adalah contoh senyawa Disakarida dan fungsinya;

- Sukrosa merupakan produk fotosintesis, yang berfungsi sebagai sumber utama karbon dan energi pada tumbuhan.
- Laktosa merupakan sumber energi utama pada hewan.
- Maltosa merupakan zat antara penting dalam pencernaan pati dan glikogen.
- Trehalosa merupakan sumber energi penting bagi serangga.
- Selobiosa penting dalam metabolisme karbohidrat.
- Gentiobiosa merupakan bagian dari glikosida tumbuhan dan beberapa polisakarida.

5.2.3 Oligosakarida

1. Pengertian Oligosakarida

Oligosakarida adalah senyawa yang menghasilkan 3 hingga 10 molekul monosakarida yang bisa berupa jenis yang sama atau berbeda ketika dihidrolisis. Setiap monosakarida terhubung melalui ikatan glikosidik. Berdasarkan jumlah monosakarida

yang terikat, oligosakarida dapat dikategorikan sebagai trisakarida, tetrasakarida, pentasakarida, dan seterusnya.

Rumus umum trisakarida adalah $C_n(H_2O)_{n-2}$, dan rumus umum tetrasakarida adalah $C_n(H_2O)_{n-3}$, dan seterusnya. Oligosakarida biasanya hadir sebagai glikana. Oligosakarida terikat pada lipid atau rantai samping asam amino dalam protein melalui ikatan N- atau O-glikosidik yang dikenal sebagai glikolipid atau glikoprotein.

Ikatan glikosidik terbentuk dalam proses glikosilasi, di mana karbohidrat terikat secara kovalen pada molekul organik, sehingga terbentuk struktur seperti glikoprotein dan glikolipid.

- a. Oligosakarida Tertaut-N: Melibatkan pengikatan oligosakarida ke asparagin melalui ikatan beta ke nitrogen amina pada rantai samping. Pada eukariota, proses ini terjadi pada membran retikulum endoplasma. Sedangkan pada prokariota, proses ini terjadi pada membran plasma.
- b. Oligosakarida Tertaut-O: Melibatkan pengikatan oligosakarida ke treonin atau serin pada gugus hidroksil rantai samping. Proses ini terjadi di aparatus Golgi, tempat unit monosakarida ditambahkan ke rantai polipeptida lengkap.

2. Fungsi Oligosakarida

Berikut adalah contoh senyawa Oligosakarida dan fungsinya;

- a. Glikoprotein adalah karbohidrat yang melekat pada protein yang terlibat dalam fungsi-fungsi penting seperti antigenisitas, kelarutan, dan ketahanan terhadap protease. Glikoprotein relevan sebagai reseptor permukaan sel, molekul adhesi sel, imunoglobulin, dan antigen tumor.
- b. Glikolipid adalah karbohidrat yang melekat pada lipid yang penting untuk pengenalan sel dan memodulasi protein membran yang bertindak sebagai reseptor.
- c. Sel menghasilkan protein pengikat karbohidrat spesifik yang dikenal sebagai lektin, yang memediasi adhesi sel dengan oligosakarida.
- d. Oligosakarida adalah komponen serat dari jaringan tanaman.

5.2.4 Polisakarida

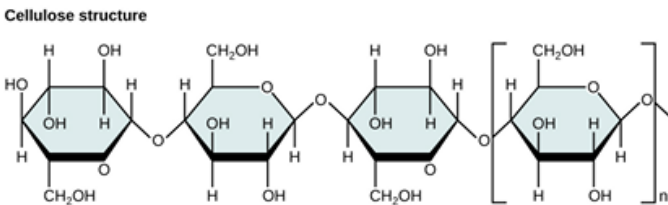
Polisakarida adalah rantai yang terdiri dari lebih dari 10 karbohidrat yang disatukan melalui pembentukan ikatan glikosidik. Polisakarida ada di mana-mana dan terutama terlibat dalam fungsi struktural atau penyimpanan organisme. Polisakarida juga dikenal sebagai glikana. Sifat fisik dan biologis senyawa ini bergantung pada komponen & arsitektur molekul pengikat atau reaksinya dan interaksinya dengan mesin enzimatik.

Polisakarida diklasifikasikan berdasarkan fungsinya, jenis unit monosakarida yang dikandungnya, atau asal usulnya. Berdasarkan jenis monosakarida yang terlibat dalam pembentukan struktur polisakarida, polisakarida diklasifikasikan menjadi dua kelompok: homopolisakarida dan heteropolisakarida.

1. Homopolisakarida

Homopolisakarida: Terdiri dari unit berulang dari hanya satu jenis monomer. Beberapa contoh homopolisakarida meliputi selulosa, kitin, pati (amilosa dan amilopektin), glikogen, dan xilan. Dan berdasarkan peran fungsionalnya, senyawa-senyawa ini diklasifikasikan menjadi polisakarida struktural dan polisakarida simpanan.

- a. Selulosa adalah polimer unit glukosa linear dan tidak bercabang yang dihubungkan oleh ikatan beta 1-4. Selulosa merupakan salah satu senyawa organik yang paling melimpah di biosfer.



Gambar 5.4. Struktur Selulosa

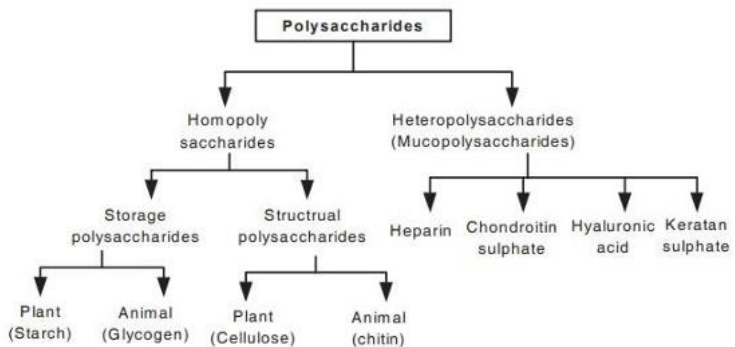
- b. Kitin adalah polimer rantai panjang linier dari residu/unit N-asetil-D-glukosamin (turunan glukosa), yang disatukan oleh ikatan glikosidik beta 1-4. Kitin adalah biopolimer alami paling melimpah kedua setelah selulosa.
- c. Pati terbuat dari unit-unit D-glukosa berulang yang disatukan oleh ikatan alfa. Kitin adalah salah satu

polisakarida paling melimpah yang ditemukan pada tanaman dan terdiri dari campuran amilosa (15-20%) dan amilopektin (80-85%).

2. Heteropolisakarida

Heteropolisakarida terdiri dari dua atau lebih unit berulang dari berbagai jenis monomer. Contohnya meliputi glikosaminoglikan, agarosa, dan peptidoglikan. Dalam sistem alami, heteropolisakarida ini terkait dengan protein, lipid, dan peptida.

- Glikosaminoglikan (GAG) adalah heteropolisakarida tak bercabang yang bermuatan negatif. Heteropolisakarida ini terdiri dari unit berulang disakarida dengan rumus struktur umum n . Asam amino seperti N-asetilglukosamin atau N-asetilgalaktosamin dan asam uronat (seperti asam glukuronat) biasanya terdapat dalam struktur GAG.
- Peptidoglikan adalah senyawa heteropolimer dari unit-unit N-asetilglukosamin (NAG) dan asam-asam N-asetilmuramat (NAM) yang bergantian, yang dihubungkan bersama oleh ikatan beta-1,4-glikosidik.
- Agarosa adalah polisakarida yang terdiri dari unit-unit disakarida yang berulang, agarobiosa, yang terdiri dari D-galaktosa dan 3,6 anhidro-L-galaktopiranososa.



Gambar 5.5. Rangkuman Klasifikasi Polysakarida dari unit yang berbeda

3. Fungsi Polisakarida

- a. Polisakarida struktural: Memberikan stabilitas mekanis pada sel, organ, dan organisme. Contohnya termasuk kitin dan selulosa. Kitin terlibat dalam sintesis dinding sel jamur, sedangkan selulosa merupakan komponen penting dalam makanan ruminansia.
- b. Polisakarida penyimpanan: Merupakan cadangan penyimpanan karbohidrat yang melepaskan monomer gula saat dibutuhkan oleh tubuh. Contohnya termasuk pati, glikogen, dan inulin. Pati menyimpan energi untuk tanaman, dan pada hewan, pati dikatalisis oleh enzim amilase (ditemukan dalam air liur) untuk memenuhi kebutuhan energi. Glikogen merupakan cadangan makanan polisakarida hewan, bakteri, dan jamur, sedangkan inulin merupakan cadangan penyimpanan pada tanaman.
- c. Agarosa menyediakan struktur pendukung di dinding sel alga laut.
- d. Peptidoglikan merupakan komponen penting dinding sel bakteri. Peptidoglikan memberikan kekuatan pada dinding sel dan berpartisipasi dalam pembelahan biner selama reproduksi bakteri.
- e. Peptidoglikan melindungi sel bakteri agar tidak pecah dengan cara menangkal tekanan osmotik sitoplasma.
- f. Asam hialuronat merupakan komponen penting dari humor vitreus di mata dan cairan sinovial (cairan pelumas yang terdapat di persendian tubuh). Asam hialuronat juga terlibat dalam proses perkembangan lain seperti metastasis tumor, angiogenesis, dan pembekuan darah.
- g. Heparin bertindak sebagai antikoagulan alami yang mencegah darah membeku.
- h. Keratan sulfat terdapat di kornea, tulang rawan, dan tulang. Di persendian, asam hialuronat bertindak sebagai bantalan untuk menyerap guncangan mekanis.
- i. Kondroitin merupakan komponen penting tulang rawan yang memberikan ketahanan terhadap tekanan.

- j. Dermatan sulfat berperan dalam perbaikan luka, pengaturan pembekuan darah, respons infeksi, dan penyakit kardiovaskular.

5.3 Metabolisme Karbohidrat

5.3.1 Pengertian Metabolisme Karbohidrat

Metabolisme adalah serangkaian reaksi yang terjadi dalam sel yang dipengaruhi oleh enzim-enzim. Secara lebih rinci, metabolisme bukanlah suatu proses yang terjadi secara acak, melainkan sangat terorganisir dan terkoordinasi dengan tujuan tertentu, melibatkan kerjasama berbagai sistem multi-enzim. (Albert, Lehninger, 2000). Metabolisme dibagi menjadi dua kategori, yaitu anabolisme dan katabolisme. Anabolisme merujuk pada proses pembentukan molekul-molekul besar dari molekul-molekul kecil, seperti pembentukan senyawa pati, selulosa, lemak, protein, dan asam nukleat.

Proses anabolisme membutuhkan input energi. Sementara itu, katabolisme merupakan proses pemecahan molekul-molekul besar menjadi molekul-molekul yang lebih kecil, yang menghasilkan pelepasan energi. Contohnya adalah respirasi, yang melibatkan oksidasi gula menjadi H₂O dan CO₂. Ada hubungan antara anabolisme dan katabolisme.

Karbohidrat sebagian besar berasal dari tumbuhan. Selama proses produksi energi, berbagai jenis karbohidrat yang dikonsumsi akan dicerna dan masuk ke dalam usus halus, diubah menjadi glukosa, yang kemudian diserap oleh darah dan didistribusikan ke berbagai organ dan jaringan tubuh. Molekul glukosa hasil konversi berbagai macam jenis karbohidrat inilah yang kemudian akan berfungsi sebagai dasar pembentukan energi di dalam tubuh.

5.3.1 Macam-Macam Metabolisme Karbohidrat

Macam-macam metabolisme karbohidrat yang terjadi dalam tubuh organisme.

1. Glikolisis

Glikolisis berlangsung di hampir seluruh bagian sel hidup. Proses ini dianggap sebagai jalur biokimia tertua yang ada pada organisme. Glikolisis juga dapat terjadi secara anaerobik, yang

menunjukkan bahwa proses ini sudah berlangsung pada bakteri prokariotik ketika Bumi masih memiliki atmosfer dengan kandungan oksigen rendah (sebelum munculnya eukariotik). Glikolisis dapat didefinisikan sebagai rangkaian reaksi yang mengubah glukosa atau glikogen menjadi piruvat atau laktat, sambil menghasilkan energi dalam bentuk ATP (Adenosin Tripfosfat), yang merupakan bentuk energi yang paling umum digunakan oleh sel.

$\text{Glukosa} + 2 \text{ NAD plus} + 2 \text{ ADP} + 2 \text{ P} \longrightarrow 2 \text{ pyruvate} + 2 \text{ NADH} + 2 \text{ ATP} + 2 \text{ H}_2\text{O} + 2 \text{ H plus}$

Glikolisis terjadi dalam sitosol sel, dan bisa dibagi menjadi 2 fase: fase membutuhkan energi dan fase melepaskan energi.

2. Siklus Asam Sitrat

Siklus asam sitrat, yang juga dikenal sebagai siklus asam trikarboksilat atau siklus Krebs, berperan sebagai pengatur utama dalam proses respirasi seluler. Proses ini berlangsung setelah glikolisis dan memanfaatkan acetyl coenzim A (CoA), yang terbentuk dari oksidasi piruvat, sebagai bahan dasarnya.

Pada tahap pertama siklus ini, acetyl CoA bergabung dengan oksaloasetat (molekul 4 karbon) untuk membentuk sitrat (molekul 6 karbon). Setelah itu, sitrat melepaskan 2 karbon dalam bentuk karbon dioksida dan menghasilkan NADH. Enzim yang mengkatalisasi reaksi ini berperan penting dalam mengatur siklus asam sitrat, dengan mempercepat atau memperlambat proses sesuai kebutuhan energi sel. Selanjutnya, molekul yang tersisa dengan 4 karbon menjalani serangkaian reaksi, dimulai dengan pembentukan ATP, kemudian mereduksi FAD menjadi FADH₂, dan akhirnya menghasilkan NADH lagi. Rangkaian reaksi ini mengembalikan oksaloasetat, memungkinkan siklus ini untuk dimulai lagi.

Secara keseluruhan, satu putaran siklus asam sitrat menghasilkan 2 molekul karbon dioksida serta memproduksi 3 NADH, 1 FADH₂, dan 1 ATP. Mengingat bahwa glikolisis menghasilkan 2 molekul piruvat, siklus asam sitrat akan terjadi dua kali untuk setiap molekul glukosa.

3. Jalur Fosfat Pentosa

Jalur fosfat pentosa atau pentose phosphate pathway merupakan jalur metabolik yang berjalan sejajar dengan Glikolisis. Sementara produk dari Glikolisis dapat diproses lebih lanjut melalui respirasi seluler untuk menghasilkan energi, ada juga jalur alternatif dari Glikolisis yang menghasilkan gula-gula penyusun DNA dan RNA. Jalur yang dikenal dengan nama Jalur Fosfat Pentosa ini memiliki keunikan karena tidak menghasilkan dan menggunakan energi dalam bentuk ATP.

Proses pemecahan glukosa dalam glikolisis menghasilkan molekul 6 karbon yang diperlukan dalam jalur fosfat pentosa. Pada tahap awal glikolisis, glukosa diubah dengan penambahan kelompok fosfat untuk membentuk glukosa-6-fosfat. Jalur fosfat pentosa ini dapat memanfaatkan molekul glukosa-6-fosfat yang dihasilkan oleh glikolisis atau jalur lain melalui fase oksidasi dan non-oksidatif.

DAFTAR PUSTAKA

Article Structure, Classification, and Functions of Carbohydrates
Suherman Egi, Rachman Arief Rakha, *Metabolisme Karbohidrat*
Lusiana, Astuti Dwi, Nurmartanati Septina, *Metabolisme*
Karbohidrat. Universitas Jambi, 2016
Metabolisme Karbohidrat - Pengertian dan Macam Macamnya -
DosenBiologi.com

BAB 6

PROSES DAN PRODUK FOTOSINTESIS

Oleh Musrifah Tahar

6.1 Pengertian Fotosintesis

Studi tentang fotosintesis dimulai pada tahun 1771 dengan pengamatan yang dilakukan oleh ilmuwan Inggris, Joseph Priestley. Priestley membakar lilin di dalam wadah tertutup hingga udara di dalam wadah tersebut tidak dapat lagi mendukung pembakaran. Dia kemudian menempatkan setangkai tanaman mint di dalam wadah tersebut dan menemukan bahwa setelah beberapa hari, mint telah menghasilkan beberapa zat (yang kemudian dikenal sebagai oksigen) yang memungkinkan udara yang terbatas untuk kembali mendukung pembakaran. Pada tahun 1779, dokter Belanda Jan Ingenhousz mengembangkan penelitian Priestley dengan menunjukkan bahwa tanaman tersebut harus terpapar cahaya jika zat yang mudah terbakar (yaitu oksigen) ingin dipulihkan. Dia juga menunjukkan bahwa proses ini membutuhkan kehadiran jaringan hijau tanaman (Yuniarti, 2018).

Pada tahun 1782, ia mendemonstrasikan bahwa gas pendukung pembakaran (oksigen) terbentuk dengan mengorbankan gas lain, atau “udara tetap”, yang telah diidentifikasi tahun sebelumnya sebagai karbon dioksida. Eksperimen pertukaran gas pada tahun 1804 menunjukkan bahwa penambahan berat tanaman yang ditanam dalam pot yang ditimbang dengan cermat merupakan hasil dari penyerapan karbon, yang seluruhnya berasal dari karbon dioksida yang diserap, dan air yang diserap oleh akar tanaman; sisanya adalah oksigen, yang dilepaskan kembali ke atmosfer. Hampir setengah abad berlalu sebelum konsep energi kimia berkembang secara memadai untuk memungkinkan penemuan (pada tahun 1845) bahwa energi cahaya dari matahari disimpan sebagai energi kimia dalam produk yang terbentuk selama proses fotosintesis (Yuniarti, 2018).

Fotosintesis merupakan proses di mana tanaman hijau dan organisme tertentu lainnya mengubah energi cahaya menjadi energi kimia atau fotosintesis adalah proses biokimia yang dilakukan oleh tumbuhan, alga, dan beberapa bakteri untuk mengubah energi cahaya menjadi energi kimia dalam bentuk glukosa. Selama fotosintesis pada tanaman hijau, energi cahaya ditangkap dan digunakan untuk mengubah air, karbon dioksida, dan mineral menjadi oksigen dan senyawa organik yang kaya energi. Proses fotosintesis ini memiliki peranan yang sangat penting dalam pemeliharaan kehidupan di Bumi. Jika fotosintesis berhenti, maka hanya akan ada sedikit makanan atau bahan organik lainnya di Bumi. Sebagian besar organisme akan lenyap, dan pada saatnya nanti atmosfer Bumi akan menjadi hampir tanpa gas oksigen.

6.2 Organisme yang Melakukan Fotosintesis

Fotosintesis adalah proses biologis penting yang dilakukan oleh berbagai organisme yang dapat menangkap energi cahaya dan mengubahnya menjadi energi kimia. Organisme utama yang melakukan fotosintesis adalah tanaman, alga, dan bakteri tertentu. Organisme-organisme ini mengandung struktur khusus, seperti kloroplas pada tanaman dan ganggang, atau membran fotosintesis pada bakteri, yang memfasilitasi penyerapan energi cahaya. Kehadiran pigmen, khususnya klorofil, memungkinkan mereka untuk memanfaatkan sinar matahari secara efisien untuk produksi energi. Organisme fotosintetik memainkan peran mendasar dalam ekosistem dengan berfungsi sebagai produsen primer, yang membentuk dasar rantai makanan.

Tumbuhan adalah kelompok organisme fotosintetik yang paling terkenal. Mereka menggunakan kloroplas, yang mengandung klorofil, untuk menangkap sinar matahari dan mengubah karbon dioksida dan air menjadi glukosa dan oksigen. Fotosintesis terjadi terutama di daun, di mana stomata mengatur pertukaran gas. Tumbuhan vaskular, seperti pohon, semak, dan rerumputan, bergantung pada proses ini untuk menghasilkan energi untuk pertumbuhan dan perkembangan. Bahkan tanaman non-vaskular, seperti lumut, melakukan fotosintesis, meskipun tidak memiliki jaringan pengangkut khusus seperti xilem dan floem. Dengan

melepaskan oksigen ke atmosfer, tumbuhan berkontribusi secara signifikan dalam mempertahankan kehidupan di Bumi.

Alga, kelompok organisme fotosintetik lainnya, mencakup beragam spesies, dari fitoplankton mikroskopis hingga rumput laut. Alga tumbuh subur di lingkungan akuatik dan memainkan peran penting dalam memproduksi oksigen dan mendukung jaring-jaring makanan di laut. Tidak seperti tanaman darat, ganggang tidak memiliki akar, batang, atau daun, tetapi mengandung klorofil dan pigmen lain yang memungkinkannya melakukan fotosintesis secara efisien. Beberapa alga seperti cyanobacteria, dianggap sebagai organisme fotosintesis paling awal, yang berkontribusi pada Peristiwa Oksigenasi Besar sekitar 2,4 miliar tahun yang lalu, yang menyebabkan peningkatan oksigen di atmosfer.

Selain tanaman dan alga, bakteri tertentu, seperti cyanobacteria dan bakteri belerang ungu, mampu melakukan fotosintesis. Cyanobacteria, juga dikenal sebagai ganggang biru-hijau, melakukan fotosintesis oksigen, menghasilkan oksigen sebagai produk sampingan. Mereka dapat hidup di lingkungan yang ekstrem, dari danau air tawar hingga sumber air panas. Bakteri belerang ungu, di sisi lain, melakukan fotosintesis anoksigenik, yang tidak menghasilkan oksigen, melainkan menggunakan hidrogen sulfida sebagai donor elektron. Bakteri ini umumnya ditemukan di lingkungan yang kaya belerang, seperti ventilasi hidrotermal laut dalam dan mata air panas. Secara keseluruhan, organisme fotosintesis sangat penting untuk mempertahankan kehidupan dengan menyediakan oksigen dan bahan organik untuk makhluk hidup lainnya (Khoerurrahmah, 2025).

6.3 Struktur dan Organ Fotosintesis

Fotosintesis terutama terjadi dalam struktur dan organ khusus dalam organisme. Organ utama yang bertanggung jawab untuk fotosintesis pada tanaman adalah daun, yang mengandung sel dan organel khusus yang dirancang untuk menangkap dan mengubah sinar matahari menjadi energi kimia. Pada ganggang dan beberapa bakteri, fotosintesis terjadi dalam struktur seluler yang mengandung pigmen yang mampu menyerap cahaya. Efisiensi fotosintesis bergantung pada keberadaan struktur khusus ini, yang

memfasilitasi penyerapan cahaya, pertukaran gas, dan proses biokimia yang terlibat dalam produksi energi.

1. Daun: Organ Utama Fotosintesis

Pada tanaman, daun adalah tempat utama terjadinya fotosintesis. Bentuk daun yang lebar dan datar memberikan area permukaan yang luas untuk penyerapan cahaya yang maksimal. Daun memiliki bukaan kecil yang disebut stomata, yang diatur oleh sel penjaga untuk mengontrol pertukaran gas, seperti karbon dioksida (CO_2) dan oksigen (O_2) dengan atmosfer. Lapisan mesofil di dalam daun memiliki banyak kloroplas, tempat fotosintesis terjadi. Epidermis atas melindungi daun dan sering kali mengandung kutikula lilin untuk mencegah kehilangan air yang berlebihan, sedangkan epidermis bawah mengandung sebagian besar stomata untuk pertukaran gas yang efisien.

2. Kloroplas: Tempat Fotosintesis

Kloroplas adalah organel khusus yang ditemukan dalam sel tanaman dan alga yang melakukan fotosintesis. Organel ini mengandung klorofil, pigmen hijau yang bertanggung jawab untuk menangkap sinar matahari. Di dalam kloroplas, membran tilakoid menampung reaksi fotosintesis yang bergantung pada cahaya, di mana cahaya matahari digunakan untuk menghasilkan ATP dan NADPH. Thylakoid ditumpuk menjadi struktur yang disebut grana untuk meningkatkan area permukaan untuk penyerapan cahaya. Di sekeliling grana terdapat stroma, ruang berisi cairan tempat siklus Calvin (reaksi yang tidak bergantung pada cahaya) berlangsung, mengubah CO_2 menjadi glukosa.

3. Xilem dan Floem: Pengangkutan Air dan Nutrisi

Untuk menopang proses fotosintesis, tanaman bergantung pada jaringan xilem dan floem untuk mengangkut air, mineral, dan molekul organik. Xilem membawa air dan nutrisi terlarut dari akar ke daun, memastikan pasokan yang berkelanjutan untuk proses fotosintesis. Floem mengangkut produk fotosintesis, seperti glukosa, dari daun ke bagian lain tanaman untuk penyimpanan energi dan pertumbuhan. Sistem ini sangat penting untuk menjaga efisiensi fotosintesis dengan memasok

sumber daya penting dan mendistribusikan gula yang disintesis.

4. Struktur Fotosintesis pada Organisme Lain

Alga dan bakteri tertentu juga melakukan fotosintesis menggunakan adaptasi struktural yang berbeda. Alga mengandung kloroplas yang mirip dengan yang ada pada tanaman tetapi tidak memiliki daun, batang, atau akar yang sebenarnya. Alga menyerap nutrisi dan gas secara langsung dari air di sekitarnya. Cyanobacteria, sejenis bakteri fotosintetik, tidak memiliki kloroplas tetapi memiliki membran tilakoid khusus di dalam sel mereka yang berfungsi mirip dengan kloroplas tanaman. Beberapa bakteri, seperti bakteri belerang ungu, melakukan fotosintesis anoksigenik dengan menggunakan pigmen seperti bakterioklorofil, bukan klorofil. Adaptasi ini memungkinkan organisme fotosintetik untuk berkembang di berbagai lingkungan.

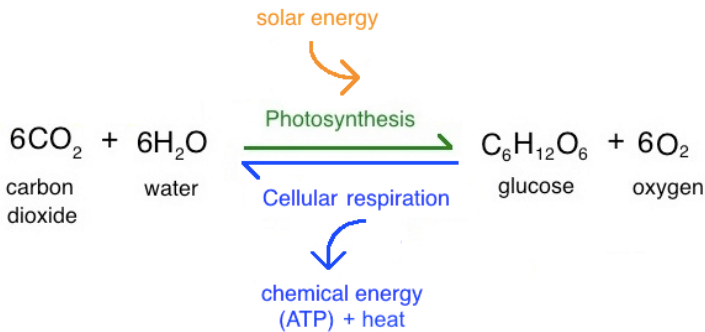
Struktur dan organ fotosintesis dikhususkan untuk mengoptimalkan penangkapan cahaya, pertukaran gas, dan konversi energi biokimia. Daun, kloroplas, dan jaringan pembuluh darah pada tanaman bekerja sama untuk memfasilitasi fotosintesis yang efisien, sementara ganggang dan bakteri telah berevolusi dengan struktur yang berbeda untuk melakukan proses mendasar yang sama. Memahami struktur-struktur ini sangat penting untuk mempelajari biologi tanaman, pertanian, dan peran fotosintesis dalam mempertahankan kehidupan di Bumi.

6.4 Proses Fotosintesis

Proses fotosintesis terjadi di dalam kloroplas sel tanaman dan terdiri dari dua tahap utama: reaksi yang bergantung pada cahaya (reaksi terang) dan reaksi yang tidak bergantung pada cahaya (siklus Calvin/reaksi gelap). Reaksi-reaksi ini melibatkan penyerapan cahaya matahari, produksi molekul kaya energi, dan konversi karbon dioksida (CO_2) menjadi glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), yang berfungsi sebagai sumber energi utama bagi tanaman dan organisme lainnya (Pertamawati, 2010).

1. Reaksi Fotosintesis Secara Keseluruhan

Persamaan umum untuk fotosintesis adalah:



Gambar 6.1. Reaksi Fotosintesis

(Rakhmat, 2024)

Persamaan ini menunjukkan bahwa karbon dioksida dan air, dengan adanya cahaya, diubah menjadi glukosa dan oksigen.

2. Reaksi Terang (Terjadi di Membran Thylakoid)

Reaksi yang bergantung pada cahaya terjadi dalam membran tilakoid kloroplas. Reaksi-reaksi ini membutuhkan cahaya matahari dan menghasilkan ATP (adenosin trifosfat) dan NADPH (nikotinamida adenin dinukleotida fosfat), yang digunakan pada tahap fotosintesis berikutnya.

Langkah-langkah Reaksi yang Tergantung pada Cahaya:

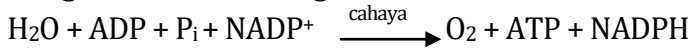
- Penyerapan Cahaya: Cahaya diserap oleh klorofil dalam fotosistem II (PSII), menarik elektron ke keadaan energi yang lebih tinggi.
- Pemecahan Air (Fotolisis): Molekul air dipecah untuk menghasilkan oksigen (O_2), proton (H^+), dan elektron (e^-).



- Rantai Transportasi Elektron: Elektron yang tereksitasi bergerak melalui rantai transpor elektron (ETC), melepaskan energi yang memompa ion H^+ ke dalam lumen thylakoid, menciptakan gradien proton.
- Sintesis ATP: Proton bergerak kembali melalui ATP sintase, menghasilkan ATP.

- e. Pembentukan NADPH: Elektron mencapai fotosistem I (PSI), mendapatkan energi kembali, dan membantu mengubah NADP^+ menjadi NADPH.

Ringkasan reaksi terang:



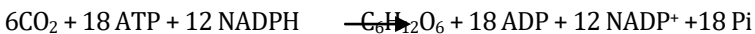
3. Reaksi Gelap (Siklus Calvin, Terjadi di Stroma)

Siklus Calvin terjadi dalam stroma kloroplas dan tidak memerlukan sinar matahari langsung. Siklus ini menggunakan ATP dan NADPH dari reaksi cahaya untuk mengubah CO_2 menjadi glukosa melalui serangkaian langkah yang digerakkan oleh enzim.

Langkah-langkah Siklus Calvin:

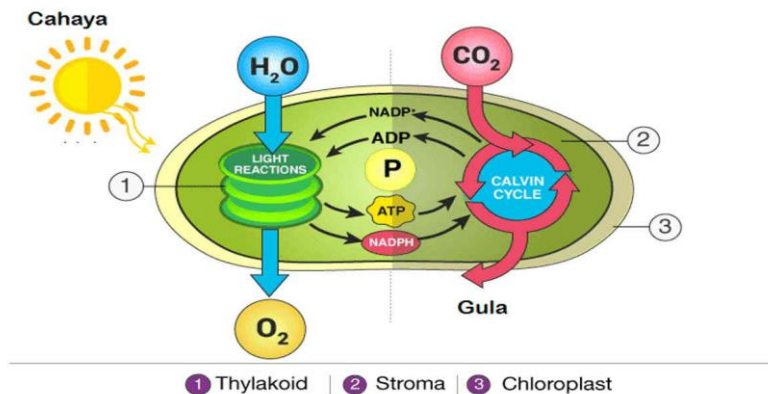
- Fiksasi Karbon:** CO_2 ditangkap oleh ribulosa-1,5-bisfosfat (RuBP) dan dikatalisis oleh enzim RuBisCO, membentuk 3-fosfoglisarat (3-PGA).
- Reduksi:** ATP dan NADPH digunakan untuk mengubah 3-PGA menjadi gliseraldehida-3-fosfat (G3P), gula tiga karbon.
- Regenerasi RuBP:** Beberapa molekul G3P digunakan untuk meregenerasi RuBP menggunakan ATP, sehingga siklus dapat berlanjut.
- Pembentukan Glukosa:** Dua molekul G3P bergabung untuk membentuk satu molekul glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) setelah beberapa siklus.

Ringkasan reaksi gelap:



4. Diagram Fotosintesis

Di bawah ini adalah gambar yang mewakili keseluruhan proses fotosintesis, termasuk reaksi yang bergantung pada cahaya di membran tilakoid dan siklus Calvin di stroma.



Gambar 6.2. Proses Reaksi Terang dan Gelap Fotosintesis (Nilasari, 2022)

6.5 Faktor yang Mempengaruhi Fotosintesis

Fotosintesis dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan dan internal yang menentukan efisiensi dan laju keseluruhannya. Faktor utama yang mempengaruhi fotosintesis meliputi intensitas cahaya, konsentrasi karbon dioksida, suhu, dan ketersediaan air (Mustika, 2019). Masing-masing faktor ini memainkan peran penting dalam proses fotosintesis dan jika terjadi kekurangan pada salah satu faktor tersebut maka dapat mengurangi laju fotosintesis. Berikut adalah faktor-faktor yang sangat penting untuk mengoptimalkan pertumbuhan tanaman baik di lingkungan alami maupun pertanian (Irianto, 2008).

1. Intensitas Cahaya

Cahaya adalah sumber energi utama untuk fotosintesis, karena cahaya mendorong reaksi yang bergantung pada cahaya dalam kloroplas. Ketika intensitas cahaya meningkat, laju fotosintesis juga meningkat hingga titik tertentu, setelah itu menurun karena faktor lain, seperti karbon dioksida atau suhu, menjadi pembatas. Jika intensitas cahaya terlalu rendah, pasokan energi untuk fotosintesis tidak mencukupi, sehingga mengurangi produksi ATP dan NADPH. Namun, intensitas cahaya yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penghambatan foto, merusak klorofil dan mengurangi efisiensi fotosintesis.

Tanaman yang berbeda memiliki kebutuhan cahaya yang berbeda-beda pula.

2. Konsentrasi Karbon Dioksida

Karbon dioksida (CO_2) adalah substrat penting dalam siklus Calvin, di mana karbon dioksida difiksasi menjadi molekul organik seperti glukosa. Ketika konsentrasi CO_2 meningkat, laju fotosintesis juga meningkat, asalkan faktor lain seperti cahaya dan suhu tidak membatasi. Namun, setelah konsentrasi tertentu, laju fotosintesis mencapai maksimum karena enzim RuBisCO (Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase-oxygenase) menjadi jenuh. Di lingkungan yang terkendali seperti rumah kaca, pengayaan CO_2 sering digunakan untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman. Sebaliknya, di lingkungan terbuka dengan tingkat CO_2 yang rendah, pertumbuhan tanaman dapat dibatasi karena fiksasi karbon yang tidak mencukupi.

3. Suhu

Suhu mempengaruhi aktivitas enzim yang terlibat dalam fotosintesis, seperti RuBisCO dan ATP sintase. Laju fotosintesis biasanya meningkat dengan suhu hingga kisaran optimum (25-35°C untuk sebagian besar tanaman). Di luar kisaran ini, aktivitas enzim menurun, dan pada suhu yang sangat tinggi, enzim dapat terdenaturasi, yang menyebabkan penurunan fotosintesis yang signifikan. Selain itu, suhu tinggi meningkatkan fotorespirasi, sebuah proses di mana RuBisCO mengikat oksigen dan bukannya CO_2 , sehingga mengurangi efisiensi fiksasi karbon. Tanaman yang beradaptasi dengan suhu ekstrem, seperti tanaman C4 dan CAM, telah mengembangkan mekanisme untuk mengoptimalkan fiksasi CO_2 dalam berbagai kondisi.

4. Ketersediaan Air

Air sangat penting untuk fotosintesis karena air menyediakan elektron dan proton yang dibutuhkan dalam reaksi yang bergantung pada cahaya. Kekurangan air menyebabkan penutupan stomata, mengurangi penyerapan CO_2 dan membatasi fotosintesis. Stres air yang parah dapat menyebabkan layu, berkurangnya produksi klorofil, dan

ketidakseimbangan metabolisme, yang pada akhirnya menurunkan pertumbuhan tanaman. Di lingkungan yang rawan kekeringan, tanaman menggunakan adaptasi seperti sistem perakaran yang dalam, kutikula berlilin, atau jalur fotosintesis yang dimodifikasi (misalnya, fotosintesis CAM pada sukulen) untuk menghemat air dan mempertahankan fotosintesis.

5. Faktor Lingkungan dan Internal Tambahan

Beberapa faktor lain yang mempengaruhi efisiensi fotosintesis:

- a. Konsentrasi Oksigen: Kadar oksigen yang tinggi dapat meningkatkan fotorespirasi, yang bersaing dengan fiksasi karbon dan mengurangi efisiensi fotosintesis.
- b. Ketersediaan Nutrisi: Nutrisi seperti nitrogen (untuk asam amino), magnesium (untuk klorofil), dan fosfor (untuk sintesis ATP) sangat penting untuk fotosintesis yang optimal. Kekurangan salah satu unsur tersebut dapat mengurangi kemampuan tanaman untuk menghasilkan energi.
- c. Kandungan Klorofil: Klorofil adalah pigmen yang bertanggung jawab untuk menangkap energi cahaya. Kadar klorofil yang rendah karena kekurangan nutrisi, penuaan, atau penyakit dapat mengurangi kapasitas fotosintesis.

6.6 Produk Fotosintesis

Produk fotosintesis memainkan peran penting dalam menopang kehidupan di Bumi dengan menjadi dasar rantai makanan dan menjaga tingkat oksigen di atmosfer. Selain produk utama ini, fotosintesis juga menghasilkan senyawa sekunder seperti pati, selulosa, dan molekul organik lainnya yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

1. Glukosa: Sumber Energi Utama

Glukosa ($C_6H_{12}O_6$) adalah produk organik utama fotosintesis dan berfungsi sebagai sumber energi utama bagi tanaman dan organisme lainnya. Glukosa diproduksi dalam siklus Calvin selama reaksi fotosintesis yang tidak bergantung pada cahaya, di mana karbon dioksida (CO_2) difiksasi menjadi molekul organik menggunakan ATP dan NADPH. Reaksi pembentukan glukosa adalah:

Tanaman menggunakan glukosa dengan berbagai cara:

- a. Respirasi Seluler: Tanaman memecah glukosa melalui respirasi aerobik dalam mitokondria untuk menghasilkan ATP, yang menjadi bahan bakar untuk aktivitas seluler.
 - b. Penyimpanan sebagai Pati: Kelebihan glukosa diubah menjadi pati dan disimpan dalam akar, batang, biji, dan umbi untuk digunakan di kemudian hari.
 - c. Biosintesis Senyawa Lain: Glukosa berfungsi sebagai bahan penyusun untuk mensintesis selulosa (untuk dinding sel), sukrosa (gula pengangkut), dan molekul organik lainnya yang penting untuk pertumbuhan dan perkembangan.
2. Oksigen: Produk Sampingan yang Vital

Oksigen (O_2) adalah produk sampingan penting dari fotosintesis, dilepaskan selama reaksi yang bergantung pada cahaya ketika molekul air terpecah dalam fotolisis. Reaksinya adalah sebagai berikut:

Oksigen yang dilepaskan sangat penting untuk:

- a. Mendukung Respirasi Aerobik: Oksigen digunakan oleh tanaman, hewan, dan organisme lain untuk respirasi sel, yang menghasilkan ATP untuk proses biologis.
 - b. Mempertahankan Keseimbangan Atmosfer: Fotosintesis adalah sumber utama oksigen di atmosfer, yang memungkinkan kehidupan organisme aerobik.
 - c. Pembentukan Lapisan Ozon: Beberapa oksigen yang dilepaskan berkontribusi pada pembentukan lapisan ozon (O_3), yang melindungi Bumi dari radiasi ultraviolet (UV) yang berbahaya.
3. Produk Fotosintesis Lainnya

Selain glukosa dan oksigen, fotosintesis juga berkontribusi pada sintesis molekul organik lainnya:

- a. Pati dan Sukrosa: Pati adalah bentuk glukosa yang disimpan dalam tanaman, sedangkan sukrosa digunakan untuk transportasi gula.
- b. Selulosa: Karbohidrat struktural yang memperkuat dinding sel tanaman.

- c. Lipid dan Protein: Tanaman mengubah glukosa menjadi lipid (lemak dan minyak) untuk penyimpanan energi dan protein menggunakan nitrogen dari tanah.
 - d. Metabolit Sekunder: Tanaman juga menghasilkan vitamin, pigmen (klorofil, karotenoid), alkaloid, dan flavonoid, yang memiliki peran ekologis dan pengobatan.
4. Pentingnya Produk Fotosintesis
- Produk fotosintesis sangat penting bagi kehidupan di Bumi. Glukosa berfungsi sebagai energi untuk tanaman dan semua organisme dalam rantai makanan, sementara oksigen mendukung kehidupan aerobik. Selain itu, produk fotosintesis juga berkontribusi pada:
- a. Siklus Karbon Global: Fotosintesis membantu mengatur tingkat CO₂, mengurangi perubahan iklim.
 - b. Pertanian dan Produksi Pangan: Semua makanan nabati berasal dari fotosintesis.
 - c. Aplikasi Industri dan Pengobatan: Senyawa yang berasal dari tanaman digunakan dalam obat-obatan, bahan bakar nabati, dan industri lainnya

6.7 Peran Fotosintesis dalam Kehidupan

Fotosintesis adalah proses biologis mendasar yang menopang kehidupan di Bumi. Proses ini tidak hanya menyediakan makanan dan energi bagi hampir semua organisme hidup, tetapi juga memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan ekologi, mengatur gas atmosfer, dan mendukung ekosistem global. Pentingnya fotosintesis tidak hanya untuk tanaman, tetapi juga mempengaruhi iklim, keanekaragaman hayati, dan kelangsungan hidup manusia.

1. Fotosintesis sebagai Dasar Rantai Makanan

Fotosintesis membentuk dasar dari rantai makanan dengan memproduksi bahan organik yang berfungsi sebagai makanan bagi semua organisme. Autotrof (produsen), seperti tanaman, alga, dan cyanobacteria, menggunakan sinar matahari untuk menghasilkan glukosa, yang kemudian dikonsumsi oleh heterotrof (konsumen), termasuk herbivora, karnivora, dan

pengurai. Transfer energi ini mendukung kehidupan di semua tingkat trofik.

- a. Produsen Primer: Tumbuhan, ganggang, dan bakteri fotosintetik menciptakan senyawa organik yang menjadi bahan bakar ekosistem.
 - b. Konsumen Bergantung pada Tumbuhan: Herbivora memperoleh energi dengan mengonsumsi tanaman, sementara karnivora bergantung pada herbivora untuk mendapatkan makanan.
 - c. Pengurai Mendaur Ulang Unsur Hara: Jamur dan bakteri menguraikan bahan organik, mengembalikan nutrisi penting ke tanah, yang mendukung pertumbuhan tanaman. Tanpa fotosintesis, seluruh jaring makanan akan runtuh, yang menyebabkan kepunahan sebagian besar bentuk kehidupan.
2. Fotosintesis dan Produksi Oksigen

Salah satu peran fotosintesis yang paling penting adalah produksi oksigen (O_2), yang sangat penting untuk kelangsungan hidup organisme aerobik. Selama reaksi fotosintesis yang bergantung pada cahaya, molekul air dipecah dalam proses yang disebut fotolisis, dan melepaskan oksigen sebagai produk samping.

- a. Mendukung Respirasi Aerobik: Oksigen yang dihasilkan oleh fotosintesis digunakan oleh tanaman, hewan, dan manusia untuk respirasi sel, yang menghasilkan ATP (energi).
- b. Menjaga Keseimbangan Atmosfer: Fotosintesis membantu mempertahankan tingkat oksigen di atmosfer Bumi, sehingga membuatnya layak huni.
- c. Pembentukan Ozon: Beberapa molekul oksigen berkontribusi pada pembentukan lapisan ozon (O_3), yang melindungi kehidupan dari radiasi ultraviolet (UV) yang berbahaya.

Tanpa fotosintesis, kadar oksigen akan menurun, membuat kehidupan tidak berkelanjutan bagi sebagian besar organisme.

3. Fotosintesis dalam Pengaturan Iklim dan Siklus Karbon

Fotosintesis memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan gas-gas atmosfer dengan menghilangkan karbon dioksida (CO_2) dari udara. Tanaman menyerap CO_2 selama siklus Calvin dan mengubahnya menjadi molekul organik.

- a. Mengurangi Efek Rumah Kaca: Kelebihan CO_2 di atmosfer berkontribusi terhadap pemanasan global. Dengan menyerap CO_2 , tanaman membantu mengurangi perubahan iklim.
- b. Mempertahankan Siklus Karbon: Karbon secara terus menerus dipertukarkan antara atmosfer, tanaman, dan organisme hidup melalui fotosintesis dan respirasi.
- c. Hutan sebagai Penyimpan Karbon: Hutan besar, seperti Hutan Hujan Amazon, bertindak sebagai penyerap karbon utama, menyimpan CO_2 dan mengurangi dampaknya terhadap perubahan iklim. Deforestasi dan pembakaran bahan bakar fosil mengganggu keseimbangan ini, yang menyebabkan peningkatan kadar CO_2 dan ketidakstabilan iklim.

4. Pentingnya Ekonomi, Pertanian, dan Industri

Fotosintesis sangat penting untuk pertanian, industri, dan kelangsungan hidup manusia, karena fotosintesis menyediakan makanan, bahan baku, dan sumber energi.

- a. Produksi Makanan: Semua makanan nabati berasal dari fotosintesis. Tanaman seperti gandum, beras, dan jagung bergantung pada fotosintesis yang efisien untuk mendapatkan hasil panen yang tinggi.
- b. Oksigen untuk Kelangsungan Hidup Manusia: Oksigen yang kita hirup terutama dihasilkan oleh organisme fotosintesis.
- c. Bahan Baku: Tanaman menyediakan kayu, kapas, kertas, dan senyawa obat yang berasal dari produk fotosintesis.
- d. Bahan Bakar Nabati dan Energi Terbarukan: Ganggang dan tanaman digunakan untuk memproduksi bahan bakar nabati, menawarkan alternatif energi yang berkelanjutan untuk bahan bakar fosil.

DAFTAR PUSTAKA

- Irianto, S.Y. 2008. *Ilmu Pengetahuan Alam*. Jakarta: PT. Gramedia.
- Khoerurrahmah, A, Fdilah, A.A, Lindiyani, Umami, M. 2025. Peran Cyanobacteria terhadap Oksigenasi Bumi dan Evolusi Kloroplas. *Flora : Jurnal Kajian Ilmu Pertanian dan Perkebunan*. 2(1): 30-43.
- Mustika, N & Negeri, S. 2019. Pengaruh Intensitas Cahaya Terhadap Pertumbuhan Dan Perkembangan Tanaman Kacang Merah. *Agroswagati*. 7(1).
- Nilasari. 2022. Reaksi Fotosintesis Pada Tumbuhan. <https://www.harapanrakyat.com/2022/06/reaksi-fotosintesis-pada-tumbuhan/>
- Ningsih, dkk. 2024. *Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan*. Padang: CV. Hei Publishing Indonesia.
- Pertamawati. 2010. Pengaruh Fotosintesis Terhadap Pertumbuhan Tanaman Kentang (*Solanum Tuberosum L.*) Dalam Lingkungan Fotoautotrof Secara Invitro. *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*. 12(1), 31-37.
- Rakhmat, P. 2024. *Respirasi Aerobik dan Fotosintesis: Pengertian, Reaksi, Faktor-Faktor yang Mempengaruhi*. <https://warstek.com/fotosintesis-respirasi/>
- Suyatman. 2020. Menyelidiki Energi Pada Fotosintesis Tumbuhan. *INKUIRI: Jurnal Pendidikan IPA*. 9(2), 125-131.
- Yuniarti. 2018. *Penerapan Strategi Pembelajaran Dp4 Menggunakan Kit Fotosintesis Terhadap Penguasaan Konsep Dan Literasi Kuantitatif, Serta Hubungannya Dengan Kemampuan Berpikir Logis*. Bandung: Universitas Pendidikan Indonesia.

BAB 7

LIPID, MEMBRAN, SERTA METABOLISME

Oleh Aliyah Fahmi

7.1 Pendahuluan Tentang Lipid, Membran, Serta Metabolisme Lipid

Lipid tersedia bagi tubuh baik dari makanan yang dicerna atau disintesis de novo terutama di hati. Lipid yang dicerna dalam bentuk triasilgliserol dipecah menjadi asam lemak bebas (*Free Fatty Acid/FFA*). FFA mengalami β -oksidasi dalam mitokondria untuk menghasilkan asetil CoA, yang digunakan dalam siklus asam trikarboksilat atau ketogenesis untuk menghasilkan energi. FFA juga dapat disalurkan ke jalur biosintesis yang berbeda untuk menghasilkan lipid membran seperti fosfolipid, glikolipid, sphingolipid, atau kolesterol. Sekali lagi, molekul sinyal seperti prostaglandin, leukotrien, dan tromboksan dapat disintesis dari asam lemak esensial, sebagian besar asam arakidonat. Demikian pula, "lipid yang terbentuk" ini dapat dihidrolisis oleh fosfolipase atau glikohidrolase menjadi komponen dasar sebagai bagian dari homeostasis tubuh dan mekanisme daur ulang. Selain itu, karbohidrat atau protein yang berlebih dari makanan dapat diubah menjadi triasilgliserol dan disimpan dalam jaringan adiposa untuk digunakan selama periode kekurangan energi. Jalur metabolisme lipid ini melibatkan reaksi yang dikatalisis oleh enzim yang sangat diatur, dan karenanya cacat pada salah satu jalur tersebut dapat dikaitkan dengan berbagai masalah Kesehatan (Gyamfi et.al., 2019).

Lipid, salah satu dari berbagai kelompok senyawa organik termasuk lemak, minyak, hormon, dan komponen membran tertentu yang dikelompokkan bersama karena tidak berinteraksi secara berarti dengan air. Salah satu jenis lipid, trigliserida, disimpan sebagai lemak dalam sel adiposa, yang berfungsi sebagai depot penyimpanan energi bagi organisme dan juga menyediakan isolasi

termal. Beberapa lipid seperti hormon steroid berfungsi sebagai pembawa pesan kimiawi antara sel, jaringan, dan organ, dan yang lainnya mengomunikasikan sinyal antara sistem biokimia dalam satu sel. Membran sel dan organel (struktur dalam sel) adalah struktur tipis mikroskopis yang terbentuk dari dua lapisan molekul fosfolipid. Membran berfungsi untuk memisahkan sel-sel individual dari lingkungannya dan untuk mengkompartementalisasi bagian dalam sel menjadi struktur yang menjalankan fungsi khusus. Begitu pentingnya fungsi pengkompartementalisasi ini sehingga membran, dan lipid yang membentuknya, pasti sangat penting bagi asal usul kehidupan itu sendiri.

Lipid bersifat hidrofobik ("takut air"). Beberapa lipid bersifat amfipatik, sebagian dari strukturnya bersifat hidrofilik dan bagian lain, biasanya bagian yang lebih besar, bersifat hidrofobik. Lipid amfipatik menunjukkan perilaku unik dalam air: mereka secara spontan membentuk agregat molekuler yang teratur, dengan ujung hidro. Lipid di luar, bersentuhan dengan air, dan bagian hidrofobiknya di dalam, terlindung dari air. Sifat ini adalah kunci peran mereka sebagai komponen dasar membran sel dan organel.

Meskipun lipid biologis bukanlah polimer makromolekul besar (misalnya, protein, asam nukleat, dan polisakarida), banyak yang terbentuk melalui ikatan kimia beberapa molekul penyusun kecil. Banyak dari blok penyusun molekul ini memiliki struktur yang serupa, atau homolog. Homologi tersebut memungkinkan lipid diklasifikasikan ke dalam beberapa kelompok utama: asam lemak, turunan asam lemak, kolesterol dan turunannya, dan lipoprotein.

7.2 Asam lemak

Asam lemak jarang ditemukan sebagai molekul bebas di alam, tetapi biasanya ditemukan sebagai komponen dari banyak molekul lipid kompleks seperti lemak (senyawa penyimpan energi) dan fosfolipid (komponen lipid utama membran sel). Bagian ini menjelaskan struktur serta sifat fisik dan kimia asam lemak. Bagian ini juga menjelaskan bagaimana organisme hidup memperoleh asam lemak, baik dari makanan mereka maupun melalui pemecahan metabolik lemak yang tersimpan.

Asam lemak biologis, anggota golongan senyawa yang dikenal sebagai asam karboksilat, tersusun dari rantai hidrokarbon dengan satu gugus karboksil terminal (COOH). Fragmen asam karboksilat yang tidak mengandung gugus hidroksil (OH) disebut gugus asil. Dalam kondisi fisiologis di dalam air, gugus asam ini biasanya telah kehilangan ion hidrogen (H⁺) untuk membentuk gugus karboksilat bermuatan negatif (COO⁻). Sebagian besar asam lemak biologis mengandung jumlah atom karbon genap karena jalur biosintesis yang umum bagi semua organisme melibatkan pengikatan kimia unit dua karbon bersama-sama (meskipun jumlah asam lemak ganjil yang relatif kecil memang terdapat pada beberapa organisme). Meskipun molekul secara keseluruhan tidak larut dalam air berdasarkan rantai hidrokarbon hidrofobiknya, karboksilat bermuatan negatif bersifat hidrofilik. Bentuk umum untuk lipid biologis ini yang mengandung bagian hidrofobik dan hidrofilik yang terpisah dengan baik disebut amfipatik. Selain hidrokarbon rantai lurus, asam lemak juga dapat mengandung pasangan karbon yang dihubungkan oleh satu atau lebih ikatan rangkap, cabang metil, atau cincin siklopropana tiga karbon di dekat pusat rantai karbon.

7.2.1 Asam Lemak Jenuh

Asam lemak yang paling sederhana adalah rantai CH₂ linear tak bercabang yang dihubungkan oleh ikatan tunggal karbon-karbon dengan satu gugus asam karboksilat terminal. Istilah jenuh menunjukkan bahwa jumlah maksimum atom hidrogen yang mungkin terikat pada setiap karbon dalam molekul. Banyak asam lemak jenuh memiliki nama umum atau nama yang mudah dipahami serta nama sistematis yang bersifat deskriptif secara kimia. Nama sistematis didasarkan pada penomoran atom karbon, dimulai dengan karbon yang bersifat asam. Tabel ini memberikan nama dan sumber biologis khas dari asam lemak jenuh yang paling umum. Meskipun rantai biasanya memiliki panjang antara 12 dan 24 karbon, beberapa asam lemak rantai pendek penting secara biokimia. Misalnya, asam butirrat (C₄) dan asam kaproat (C₆) adalah lipid yang ditemukan dalam susu. Minyak inti sawit, sumber lemak

makanan penting di wilayah tertentu di dunia, kaya akan asam lemak yang mengandung 8 dan 10 karbon (C_8 dan C_{10}).

7.2.2 Asam Lemak Tak Jenuh

Asam lemak tak jenuh memiliki satu atau lebih ikatan rangkap karbon-karbon. Istilah tak jenuh menunjukkan bahwa jumlah atom hidrogen yang terikat pada setiap karbon dalam molekul lebih sedikit dari jumlah maksimum yang mungkin. Jumlah ikatan rangkap ditunjukkan dengan nama generik *monounsaturated* untuk molekul dengan satu ikatan rangkap atau *polyunsaturated* untuk molekul dengan dua atau lebih ikatan rangkap. Asam oleat adalah contoh asam lemak tak jenuh tunggal. Asam lemak tak jenuh tunggal yang umum beserta nama dan sumbernya tercantum dalam tabel. Awalan *cis-9* dalam nama sistematis asam palmitoleat menunjukkan bahwa posisi ikatan rangkap berada di antara karbon 9 dan 10. Dua kemungkinan konformasi, *cis* dan *trans*, dapat diambil oleh dua gugus CH_2 yang berdekatan dengan karbon berikatan rangkap. Dalam konfigurasi *cis*, yang terjadi pada semua asam lemak tak jenuh biologis, dua karbon yang berdekatan terletak pada sisi yang sama dari karbon berikatan rangkap. Dalam konfigurasi *trans*, dua karbon yang berdekatan terletak pada sisi yang berlawanan dari karbon berikatan rangkap.

Asam lemak yang mengandung lebih dari satu ikatan rangkap karbon-karbon (asam lemak tak jenuh ganda) ditemukan dalam jumlah yang relatif kecil. Beberapa ikatan rangkap hampir selalu dipisahkan oleh gugus CH_2 ($-CH_2-CH=CH-CH_2-CH=CH-CH_2-$), motif jarak teratur yang merupakan hasil mekanisme biosintesis yang dengannya ikatan rangkap dimasukkan ke dalam rantai hidrokarbon. Asam lemak tak jenuh ganda yang paling umum, linoleat dan arakidonat, bersama dengan beberapa yang kurang umum. Asam arakidonat sangat menarik sebagai prekursor yang dikenal sebagai eikosanoid (dari bahasa Yunani *eikosi*, "dua puluh"), yang meliputi prostaglandin, tromboksan, dan leukotrien. Senyawa-senyawa ini, yang diproduksi oleh sel dalam kondisi tertentu, memiliki sifat fisiologis yang kuat, seperti yang dijelaskan dalam bagian pembawa pesan intraseluler dan ekstraseluler. Hewan tidak dapat mensintesis dua asam lemak penting, asam linoleat (asam lemak omega-6) dan asam alfa-

linolenat (asam lemak omega-3), yang merupakan prekursor eikosanoid dan karenanya harus memperolehnya dari sumber nabati dalam makanan. Karena alasan ini, prekursor ini disebut asam lemak esensial.

Asam lemak tak jenuh ganda trans, meskipun tidak diproduksi secara biosintesis oleh mamalia, diproduksi oleh mikroorganisme dalam usus hewan ruminansia seperti sapi dan kambing, dan juga diproduksi secara sintetis melalui hidrogenasi parsial lemak dan minyak dalam pembuatan margarin (yang disebut lemak trans). Riset membuktikan bahwa konsumsi lemak trans dapat memiliki efek metabolik yang merugikan.

7.2.3 Kelompok Substituen

Selain asam lemak yang sangat umum dengan rantai asil jenuh atau tak jenuh lurus, banyak asam lemak yang dimodifikasi secara kimia oleh substituen pada rantai hidrokarbon. Misalnya, kelenjar bulu bebek mengeluarkan asam lemak sepanjang 10 karbon dengan gugus metil (CH_3) yang menggantikan salah satu hidrogen pada karbon 2, 4, 6, dan 8. Beberapa bakteri menghasilkan asam lemak yang memiliki gugus metil pada atom karbon terjauh dari gugus asam atau pada karbon kedua terakhir. Bakteri lain menggabungkan cincin siklopropana di dekat bagian tengah rantai asil. Bakteri penyebab tuberkulosis (*Mycobacterium tuberculosis*) mensintesis seluruh keluarga asam lemak yang mengandung siklopropana yang disebut asam α -mikolat. Asam lemak serupa ditemukan pada bakteri terkait. Konstituen umum ketiga adalah gugus hidroksil (OH). Asam monohidroksil ditemukan pada tumbuhan dan hewan dalam jumlah yang relatif kecil, tetapi lebih umum pada bakteri.

7.2.4 Sifat Fisik Asam Lemak

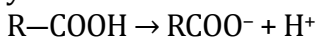
Asam lemak murni membentuk kristal yang terdiri dari lapisan molekul yang bertumpuk, dengan setiap lapisan setebal dua molekul yang memanjang. Molekul-molekul dalam satu lapisan tersusun sedemikian rupa sehingga rantai hidrokarbon hidrofobik (takut air) membentuk bagian dalam lapisan dan gugus asam karboksilat hidrofilik (suka air) membentuk dua sisi. Untuk asam

lemak tertentu, detail pengepakan molekuler dapat bervariasi, sehingga menghasilkan bentuk kristal yang berbeda yang dikenal sebagai polimorf.

Suhu leleh asam lemak jenuh yang penting secara biologis berada di atas 27 °C (81 °F) dan meningkat seiring dengan bertambahnya panjang rantai hidrokarbon. Molekul tak jenuh tunggal dan tak jenuh ganda meleleh pada suhu yang jauh lebih rendah daripada molekul jenuhnya, dengan suhu leleh terendah terjadi ketika ikatan rangkap karbon-karbon terletak di dekat pusat rantai hidrokarbon, seperti pada sebagian besar molekul biologis. Akibatnya, molekul-molekul ini membentuk cairan kental pada suhu ruangan.

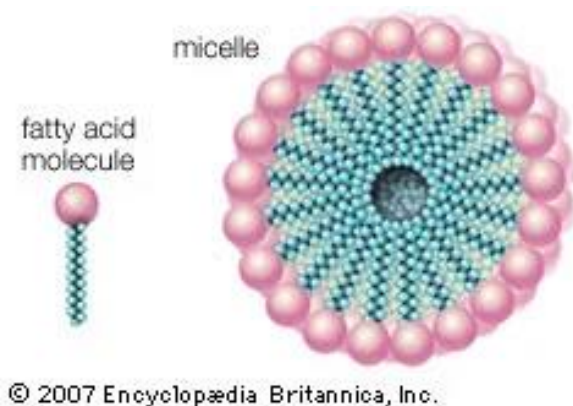
Sifat hidrofobik rantai hidrokarbon pada sebagian besar asam lemak biologis melebihi sifat hidrofilik gugus asam karboksilat, sehingga kelarutan molekul-molekul ini dalam air menjadi sangat rendah. Misalnya, pada suhu 25 °C (77 °F), kelarutan dalam gram asam lemak per gram larutan adalah 3×10^{-6} . Kelarutan dalam air menurun secara eksponensial dengan penambahan setiap atom karbon ke rantai hidrokarbon. Hubungan ini mencerminkan energi yang dibutuhkan untuk memindahkan molekul dari pelarut hidrokarbon murni ke air. Misalnya, dengan setiap gugus CH_2 , lebih banyak energi diperlukan untuk menyusun molekul air di sekitar rantai hidrokarbon asam lemak, yang menghasilkan efek hidrofobik.

Dalam air murni, gugus karboksilat dapat memisahkan ion hidrogen bermuatan positif hanya dalam tingkat yang sangat kecil, yaitu:



Di sini R melambangkan rantai hidrokarbon. Ion karboksilat, yang bermuatan negatif, lebih polar daripada asam yang tidak terdisosiasi. RCOOH dapat diubah sepenuhnya menjadi ion RCOO^- dengan menambahkan sejumlah molekul basa seperti natrium hidroksida (NaOH) yang sama. Ini secara efektif menggantikan H^+ dengan Na^+ untuk menghasilkan garam asam lemak, yang merupakan sabun. Sifat deterjen yang sangat berguna dari sabun berasal dari fakta bahwa anion RCOO^- dalam air secara spontan membentuk agregat bulat yang stabil yang disebut misel. Bagian dalam struktur ini, yang dibentuk oleh rantai hidrokarbon, adalah

pelarut yang sangat baik di mana minyak dan kotoran hidrofobik dari segala jenis dapat diserap. Diameter setiap misel kira-kira dua kali panjang asam lemak yang diperpanjang. Dispersi misel dalam air dapat dibuat cukup pekat dan menunjukkan daya pembersihan yang hebat. Dispersi ini stabil dan umumnya sangat mirip dengan air murni. Gelembung dan busa pada permukaan dispersi sabun merupakan hasil penyerapan spontan ion RCOO^- pada antarmuka antara dispersi berair dan udara, sehingga antarmuka udara-air menjadi stabil secara energetik dan karenanya dapat diekspansi secara mekanis.



Gambar 7.1. Molekul Asam Lemak

7.2.5 Sifat Kimia Asam Lemak

Bagian asam lemak yang paling reaktif secara kimia adalah gugus karboksil asam (COOH). Gugus ini bereaksi dengan alkohol ($\text{R}'\text{OH}$) untuk membentuk produk yang dikenal sebagai ester (RCOOR') dan melepaskan air dalam prosesnya. Ikatan ester ini adalah ikatan kovalen utama yang menghubungkan gugus asam lemak dengan gugus lain dalam lipid yang lebih kompleks. Ikatan kimia kedua, yang lebih jarang terjadi dalam lipid biologis yang melibatkan asam lemak, adalah ikatan eter ($\text{R}'\text{—O—R}$). Ikatan eter secara kimia lebih stabil daripada ikatan ester. Secara umum, semakin tinggi tingkat ketidakjenuhan asam lemak, semakin mudah asam lemak tersebut teroksidasi.

7.2.6 Sumber Biologis Asam Lemak

Asam lemak ditemukan dalam sistem biologis baik sebagai molekul bebas maupun sebagai komponen lipid yang lebih kompleks. Asam lemak berasal dari sumber makanan atau diproduksi melalui metabolisme, seperti dijelaskan di bawah ini.

Pencernaan asam lemak makanan

Sumber utama asam lemak dalam makanan adalah trigliserida, yang secara umum disebut lemak. Pada manusia, lemak merupakan bagian penting dari makanan, dan di beberapa negara lemak dapat menyumbang hingga 45 persen dari asupan energi. Trigliserida terdiri dari tiga molekul asam lemak, yang masing-masing dihubungkan oleh ikatan ester ke salah satu dari tiga gugus OH dari molekul gliserol. Setelah trigliserida yang dicerna melewati lambung dan masuk ke usus halus, deterjen yang disebut garam empedu disekresikan oleh hati melalui kantung empedu dan menyebarkan lemak sebagai misel. Enzim pankreas yang disebut lipase kemudian menghidrolisis lemak yang tersebar untuk menghasilkan monogliserida dan asam lemak bebas. Produk-produk ini diserap ke dalam sel-sel yang melapisi usus halus, tempat mereka disintesis ulang menjadi trigliserida. Trigliserida, bersama dengan jenis lipid lainnya, kemudian disekresikan oleh sel-sel ini dalam lipoprotein, kompleks molekul besar yang diangkut dalam getah bening dan darah ke organ penerima. Secara rinci, proses penyerapan trigliserida atau lemak dari sumber makanan cukup rumit dan sedikit berbeda tergantung pada spesies hewan.

Penyimpanan

Setelah diangkut melalui sirkulasi, trigliserida dihidrolisis lagi menjadi asam lemak dalam jaringan adiposa. Di sana, trigliserida diangkut ke sel-sel adiposa, di mana trigliserida disintesis ulang menjadi trigliserida dan disimpan sebagai tetesan. Lemak atau jaringan adiposa pada dasarnya terdiri dari sel-sel, di mana bagian dalam setiap sel sebagian besar ditempati oleh tetesan lemak. Trigliserida dalam tetesan ini tersedia bagi tubuh sesuai permintaan karena dikomunikasikan ke jaringan adiposa oleh pembawa pesan hormon.

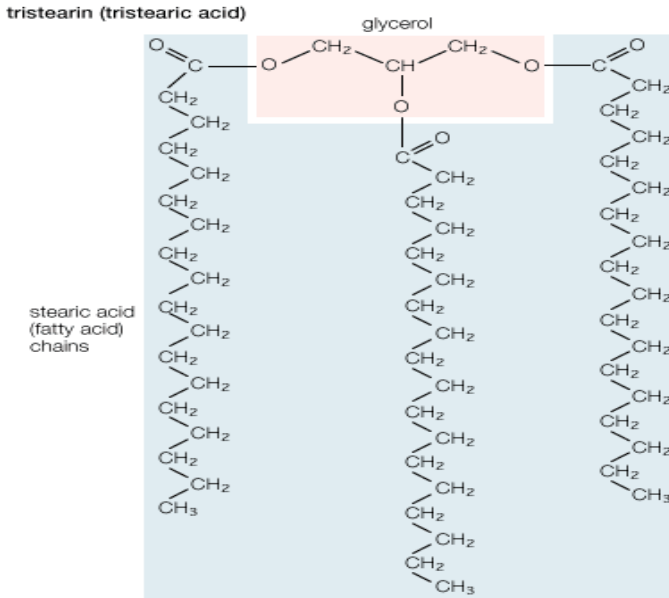
Biosintesis

Pada mamalia, asam lemak disintesis dalam sel adiposa dan sel hati dari glukosa melalui jalur yang cukup rumit. Intinya, enam karbon dari molekul glukosa dioksidasi menjadi sepasang fragmen asam karboksilat dua karbon yang disebut asetat. Titik awal untuk biosintesis adalah gugus asetat yang secara kimiawi terkait dengan molekul CoA (koenzim A). Proses pembentukan rantai asil asam lemak kemudian dimulai, pada dasarnya melalui penambahan kimiawi berurutan dari fragmen dua karbon dari CoA-asetat untuk menghasilkan, misalnya, asam lemak jenuh 16 karbon palmitat. Proses ini dikatalisis oleh enzim kompleks yang dikenal sebagai sintase asam lemak.

7.2.7 Turunan Asam Lemak

1. Trigliserida

Trigliserida (nama kimia triasilgliserol), cara utama penyimpanan asam lemak dalam sistem biologis, adalah golongan senyawa yang terdiri dari gliserol (alkohol trihidroksi tiga karbon) dengan asam lemak yang terikat pada masing-masing dari tiga gugus OH melalui ikatan ester. Contoh trigliserida yang umum adalah tristearin. Karena molekul ini hanya mengandung satu jenis asam lemak, molekul ini disebut sebagai trigliserida sederhana. Akan tetapi, hampir semua molekul trigliserida yang terdapat di alam mengandung lebih dari satu jenis asam lemak; jika dua atau lebih dalam molekul tertentu berbeda, molekul tersebut disebut trigliserida campuran. Untuk setiap kombinasi spesifik dari tiga asam lemak, tiga molekul berbeda mungkin terjadi, tergantung pada asam lemak mana dari ketiganya yang terikat pada karbon pusat gliserol. Jika mempertimbangkan jumlah asam lemak jenuh, tak jenuh tunggal, dan tak jenuh ganda yang umum, jelaslah bahwa terdapat banyak sekali jenis trigliserida.



Gambar 7.2. Struktur kimia tristearin (contoh trigliserida)

Trigliserida adalah zat hidrofobik yang hanya larut dalam beberapa pelarut organik. Tidak seperti banyak jenis lipid kompleks lainnya, trigliserida tidak memiliki muatan listrik dan oleh karena itu disebut sebagai lipid netral. Struktur molekul beberapa trigliserida yang telah dipelajari dalam bentuk kristal menunjukkan bahwa rantai asil pada karbon 1 dan 2 gliserol, bersama dengan karbon 1 dan 2 gliserol itu sendiri, membentuk garis lurus. Karbon 3 menonjol tegak lurus dengan garis ini, tetapi rantai asil pada gliserolnya terlipat pada karbon karboksil untuk berada di samping rantai asil pada karbon 1. Molekul trigliserida tampak seperti garpu tala dan, ketika dikemas bersama, menghasilkan kristal berlapis.

Suhu leleh trigliserida campuran kira-kira merupakan rata-rata suhu leleh asam lemak penyusunnya. Dalam trigliserida sederhana, suhu leleh meningkat seiring bertambahnya panjang rantai asil tetapi turun seiring bertambahnya jumlah ikatan rangkap. Trigliserida yang dicairkan umumnya berupa minyak yang cukup kental. Dari sudut pandang fisiologis, penting bahwa sebagian besar

trigliserida yang disimpan berbentuk cair pada suhu tubuh untuk memungkinkan mobilisasi cepatnya sebagai sumber energi. Likuiditas juga penting karena lemak yang disimpan di bawah kulit berfungsi sebagai isolasi yang tidak boleh mengganggu mobilitas organisme dan bagian-bagiannya.

2. Lilin

Kelompok kedua lipid netral yang penting secara fisiologis, meskipun merupakan komponen minor dari sistem biologis, adalah lilin. Pada dasarnya, lilin terdiri dari asam lemak rantai panjang yang dihubungkan melalui oksigen ester ke alkohol rantai panjang. Molekul-molekul ini sama sekali tidak larut dalam air dan umumnya padat pada suhu biologis. Sifatnya yang sangat hidrofobik memungkinkannya berfungsi sebagai penolak air pada daun beberapa tanaman, pada bulu, dan pada kutikula serangga tertentu. Lilin juga berfungsi sebagai zat penyimpan energi pada plankton (tanaman dan hewan akuatik mikroskopis) dan pada anggota rantai makanan akuatik yang lebih tinggi. Plankton tampaknya menggunakan biosintesis lilin untuk menyesuaikan kepadatan daya apungnya dan dengan demikian kedalamannya di laut. Sumber utama minyak bumi yang ditemukan di sedimen laut dalam berasal dari pengendapan plankton mati yang kaya lilin selama periode waktu yang lama. Paus dan banyak ikan juga menyimpan lilin dalam jumlah besar.

7.3 Lipid Membran

Tiga kelas utama lipid yang membentuk matriks dwilapis membran biologis adalah gliserofosfolipid, sfingolipid, dan sterol (terutama kolesterol). Karakteristik terpenting molekul dalam dua kelompok pertama adalah struktur amfipatiknya daerah hidrofilik (polar) dan hidrofobik (non-polar) yang terpisah dengan baik. Umumnya, bentuknya memanjang, dengan ujung atau kepala hidrofilik yang melekat pada bagian hidrofobik oleh daerah pendek yang berpolaritas antara. Karena pemisahan polaritas dan non-polaritas, molekul amfipatik dalam pelarut apa pun akan secara spontan membentuk agregat yang meminimalkan kontak yang

secara energetik tidak menguntungkan (dengan menjaga daerah molekul yang tidak sama tetap terpisah) dan memaksimalkan kontak yang menguntungkan dengan pelarut (dengan menjaga daerah molekul yang serupa tetap menyatu). Susunan molekul agregat bergantung pada pelarut dan detail struktur amfipatik lipid.

Dalam air, misel yang dibentuk oleh sabun (garam natrium atau kalium dari asam lemak) merupakan salah satu agregat tersebut. Bagian polar atau hidrofilik dari molekul sabun membentuk permukaan misel, sementara rantai hidrokarbon membentuk bagian dalamnya dan dengan demikian sepenuhnya terlindungi dari kontak yang secara energetik tidak menguntungkan dengan air. Namun, lipid membran biologis tidak membentuk misel bulat dalam air, melainkan membentuk struktur lamelar (berlapis) yang tertutup secara topologi. Kepala polar dari molekul komponen membentuk dua sisi lamela, sementara bagian hidrofobik membentuk bagian dalamnya. Dengan demikian, setiap lamela memiliki ketebalan dua molekul, dengan sumbu panjang molekul komponen tegak lurus terhadap bidang dwilapis. Jenis agregat lain juga terbentuk di dalam air oleh lipid amfipatik tertentu. Misalnya, liposom adalah kumpulan lipid buatan yang tersusun dalam lapisan ganda, yang memiliki permukaan dalam dan luar. Lapisan ganda lipid membentuk bola yang dapat menjebak molekul di dalamnya. Struktur liposom dapat berguna untuk melindungi molekul sensitif yang akan diberikan secara oral.

7.3.1 Gliserofosfolipid

Lipid dari golongan ini merupakan yang paling melimpah dalam membran biologis. Dalam gliserofosfolipid, asam lemak dihubungkan melalui oksigen ester ke karbon 1 dan 2 dari gliserol, tulang punggung molekul. Fosfat dihubungkan secara ester ke karbon 3, sementara salah satu dari beberapa substituen yang mungkin juga dihubungkan ke gugus fosfat. Gliserofosfolipid bersifat amfipatik—gliserol dan fosfat membentuk ujung polar molekul, sementara rantai hidrokarbon membentuk ujung nonpolar. Meskipun asam lemak dapat berupa salah satu dari asam lemak yang umum dalam sistem biologis, biasanya asam lemak yang terikat pada karbon 1 bersifat jenuh dan asam lemak yang terikat

pada karbon 2 bersifat tidak jenuh. Berbagai kombinasi dari dua asam lemak menghasilkan banyak molekul berbeda yang memiliki gugus substituen yang sama. Karena hal ini berlaku untuk setiap gugus kepala, secara keseluruhan terdapat sekitar seribu jenis gliserofosfolipid yang mungkin. Sebagian besar ditemukan dalam membran biologis.

Dari sudut pandang sifat fisik, perbedaan terbesar di antara berbagai molekul terletak pada substituen tertentu. Hal ini sebagian disebabkan oleh perbedaan ukuran berbagai jenis dan sebagian lagi karena perbedaan muatan listriknya. Fosfatidilkolin dan fosfatidiletanolamin bersifat zwitterionik, artinya mereka memiliki satu muatan negatif dan satu muatan positif pada gugus substituen. Asam fosfatidat, fosfatidilserin, dan fosfatidilinositol memiliki muatan negatif bersih. Perbedaan dalam komposisi asam lemak juga berkontribusi terhadap perbedaan sifat fisik serangkaian molekul dengan substituen yang sama. Dengan adanya kelebihan air, molekul-molekul tersebut membentuk agregat dengan berbagai geometri, yang paling umum adalah lapisan ganda.

Dalam lapisan ganda, banyak gliserofosfolipid serta sfingomielin (dibahas di bawah) dapat berada dalam salah satu dari dua keadaan, gel atau kristal cair. Dalam keadaan gel seperti padatan, molekul lipid di setiap bagian lapisan ganda tersusun dalam kisi dua dimensi, dengan dua rantai asilnya dalam bentuk memanjang. Dengan penerapan panas, gel berubah menjadi keadaan kristal cair pada beberapa suhu yang merupakan karakteristik campuran lipid. Dalam keadaan ini, molekul-molekul di setiap bagian lapisan ganda tetap berada dalam kisi dua dimensi yang cukup teratur tetapi bebas berputar di sekitar sumbu panjangnya dan meluncur secara lateral melalui lapisan tersebut. Rantai asilnya sekarang mengalami gerakan yang cukup besar, yang mengarah ke konformasi yang tertekuk sementara. Gerakan-gerakan ini memberi lapisan ganda perilaku kuasi-cair yang merupakan karakteristik lapisan ganda di semua membran biologis.

7.3.2 Sphingolipid

Kelas utama kedua lipid yang biasanya dikaitkan dengan membran yang mengelilingi sel adalah sphingolipid. Sphingolipid

didasarkan pada alkohol amina 18 karbon, sphingosin, dan pada tingkat yang jauh lebih rendah pada analog 20 karbon, fitosphingosin. Semua kecuali satu anggota generik dari kelas ini memiliki gula sederhana atau kompleks yang terkait dengan alkohol pada karbon 1. Anggota tunggal yang menyimpang adalah sphingomyelin, molekul dengan gugus fosforilkolin (gugus kepala polar yang sama seperti pada fosfatidilkolin) sebagai pengganti bagian gula, menjadikannya analog fosfatidilkolin. Semua sphingolipid memiliki, selain gula, asam lemak yang terikat pada gugus amino sphingosin. Di antara sphingolipid, hanya sphingomyelin, suatu fosfolipid, yang merupakan komponen utama membran biologis.

Faktor utama yang menentukan sifat fisik sphingolipid adalah gugus substituen yang terikat pada karbon 1 dari sphingosin. Variasi kecil dalam sifat-sifat bergantung pada komponen asam lemak tertentu. Glikosphingolipid, yang semuanya mengandung gula yang terikat pada karbon 1 dari sphingosin, memiliki sifat fisik yang terutama bergantung pada kompleksitas dan komposisi substituen ini. Dua jenis umum glikosphingolipid dikenal: glikosphingolipid netral, yang hanya mengandung gula netral, dan gangliosida, yang mengandung satu atau lebih residu asam sialik yang terikat pada gula. Ratusan glikosphingolipid yang berbeda telah diisolasi, dan mungkin masih banyak jenis yang belum teridentifikasi. Glikosphingolipid ditemukan secara eksklusif pada permukaan luar membran sel, tempat gugus gulanya sering bertindak sebagai antigen dan sebagai reseptor untuk hormon dan molekul pemberi sinyal lainnya.

7.3.3 Kolesterol dan Turunannya

Ada dua kompleks protein utama yang mengangkut kolesterol melalui aliran darah: lipoprotein densitas tinggi (HDL/*high density lipoprotein*) dan lipoprotein densitas rendah (LDL/*low density lipoprotein*). Kolesterol yang melekat pada LDL terutama adalah yang terbentuk dalam endapan aterosklerosis di pembuluh darah; karena alasan ini, LDL sering digambarkan sebagai bentuk kolesterol "jahat". HDL, di sisi lain, sebenarnya dapat berfungsi untuk memperlambat atau mengurangi penumpukan

aterosklerosis, dan karenanya HDL sering disebut sebagai bentuk kolesterol "baik".

Kolesterol merupakan anggota utama dari golongan besar lipid yang disebut isoprenoid yang tersebar luas di alam. Nama golongan ini berasal dari fakta bahwa molekul-molekul ini terbentuk melalui kondensasi kimia dari molekul sederhana berkarbon lima, isoprena. Isoprenoid mencakup beragam molekul biologis seperti hormon steroid, sterol (kolesterol, ergosterol, dan sitosterol), asam empedu, vitamin yang larut dalam lemak (A, D, E, dan K), fitol (komponen lipid dari pigmen fotosintesis klorofil), hormon serangga muda, hormon tanaman (giberelin), dan poliisoprena (komponen utama karet alam).

Struktur dan Sifat Kolesterol

Sterol merupakan komponen utama membran biologis pada eukariota (organisme yang selnya memiliki nukleus) tetapi jarang ditemukan pada prokariota (sel tanpa nukleus, seperti bakteri). Kolesterol merupakan sterol utama pada hewan, sedangkan sterol utama pada jamur adalah ergosterol dan pada tumbuhan adalah sitosterol. Ciri khas dari masing-masing dari ketiga molekul penting ini adalah empat cincin karbon yang menyatu secara kaku yang membentuk nukleus steroid dan gugus hidroksil (OH) yang melekat pada cincin pertama. Satu molekul dibedakan dari yang lain berdasarkan posisi ikatan rangkap karbon-karbon dan berdasarkan struktur rantai samping hidrokarbon pada cincin keempat.

Kolesterol dan kerabatnya merupakan molekul hidrofobik dengan kelarutan air yang sangat rendah. Secara keseluruhan, hidrofobisitas tidak banyak dipengaruhi oleh gugus OH yang bersifat hidrofilik. Struktur kolesterol sedemikian rupa sehingga tidak membentuk agregat dalam air, meskipun ia menyelip di antara molekul-molekul membran biologis, dengan gugus OH-nya terletak di antarmuka air-membran. Struktur cincin kolesterol yang kaku dan menyatu menambah kekakuan pada lapisan ganda fosfolipid kristal cair dan memperkuatnya terhadap kerusakan mekanis. Dengan demikian, kolesterol merupakan komponen penting dari membran yang mengelilingi sel, di mana konsentrasinya dapat meningkat hingga 50 persen berat.

Biosintesis Kolesterol

Biosintesis kolesterol dapat dibagi menjadi empat tahap. Tahap pertama menghasilkan senyawa enam karbon yang disebut asam mevalonat dari tiga unit asetat dua karbon (berasal dari oksidasi molekul bahan bakar misalnya, glukosa) dalam bentuk asetil-KoA, blok penyusun awal yang sama yang digunakan untuk membentuk asam lemak biologis yang dijelaskan dalam bagian Asam lemak: Biosintesis. Pada tahap kedua, mevalonat diubah menjadi molekul lima karbon isopentenil pirofosfat dalam serangkaian empat reaksi. Konversi produk ini menjadi senyawa 30 karbon, skualena, pada tahap ketiga memerlukan kondensasi enam molekul isopentenil pirofosfat. Pada tahap keempat, molekul skualena linier dibentuk menjadi cincin dalam urutan reaksi kompleks untuk menghasilkan kolesterol 27 karbon.

Turunan Biosintesis Kolesterol

Dua kelas molekul penting, asam empedu dan hormon steroid, berasal dari kolesterol pada vertebrata. Turunan ini dijelaskan di bawah ini.

1. Asam Empedu

Asam empedu dan garamnya adalah deterjen yang mengemulsi lemak dalam usus selama proses pencernaan. Mereka disintesis dari kolesterol di hati melalui serangkaian reaksi yang memasukkan gugus hidroksil ke dalam cincin B dan cincin C dan memperpendek rantai samping asil cincin D menjadi tujuh karbon dengan karbon terminal diubah menjadi gugus karboksil. Molekul yang dihasilkan, asam kolat—serta asam kenodeoksikolat (kerabat dekat yang tidak memiliki OH pada cincin C)—biasanya ditemukan dalam bentuk garamnya, di mana asam amino taurin dan glisin secara kimiawi terikat pada gugus karboksil rantai samping. Deterjen ini disekresikan dari hati ke dalam kantung empedu, tempat mereka disimpan sebelum dilepaskan melalui saluran empedu ke usus halus. Setelah melakukan tindakan pengemulsi yang penting dalam pencernaan lemak (dijelaskan dalam bagian Asam lemak), lemak diserap kembali di usus halus bagian bawah, dikembalikan melalui darah ke hati, dan digunakan kembali.

Proses siklus ini, yang disebut sirkulasi enterohepatik, menangani 20 hingga 30 gram asam empedu per hari pada manusia. Fraksi kecil yang lolos dari sirkulasi ini hilang dalam tinja. Ini adalah rute ekskresi utama untuk kolesterol (meskipun fraksi yang lebih kecil hilang melalui pengelupasan sel kulit mati secara normal).

2. Hormon steroid

Hormon steroid mengonsumsi sebagian kecil dari total kolesterol yang tersedia dalam organisme, tetapi hormon ini sangat penting secara fisiologis. (Lihat di bawah Fungsi biologis lipid.) Ada lima kelas utama, yang semuanya berasal dari kolesterol: progestin (aktif selama kehamilan), glukokortikoid (mendorong sintesis glukosa dan menekan reaksi inflamasi), mineralokortikoid (mengatur keseimbangan ion), estrogen (mendorong karakteristik seks wanita), dan androgen (mendorong karakteristik seks pria). Kecuali progesteron, semua molekul aktif biologis yang terkait erat ini memiliki kesamaan rantai samping yang diperpendek pada cincin D dan, dalam beberapa kasus, gugus OH teroksidasi pada cincin A. Molekul-molekul individual disintesis sesuai permintaan oleh plasenta pada wanita hamil, oleh korteks adrenal, dan oleh gonad.

Pengaturan Metabolisme Kolesterol

Kadar kolesterol darah yang tinggi telah dikenal sebagai faktor risiko utama penyakit jantung. Karena alasan ini, banyak penelitian difokuskan pada pengendalian biosintesis kolesterol, pengangkutannya dalam darah, dan penyimpanannya dalam tubuh. Kadar kolesterol secara keseluruhan dalam tubuh merupakan hasil keseimbangan antara asupan makanan dan biosintesis seluler di satu sisi dan, di sisi lain, pembuangan kolesterol dari tubuh (terutama sebagai produk metabolismenya, asam empedu). Seiring meningkatnya asupan kolesterol dalam makanan pada orang normal, terjadi penurunan penyerapan dari usus dan peningkatan sintesis dan ekskresi asam empedu yang biasanya menyumbang sekitar 70 persen kolesterol yang hilang dari tubuh.

Pengaturan biosintesis kolesterol di hati dan sel-sel tubuh lainnya lebih dipahami. Enzim awal yang membentuk mevalonat pada tahap pertama biosintesis dikendalikan oleh dua proses. Salah satunya adalah penghambatan sintesis enzim ini oleh kolesterol itu sendiri atau turunannya. Yang lainnya adalah pengaturan aktivitas katalitik enzim melalui fosforilasi/defosforilasi sebagai respons terhadap sinyal intraseluler. Beberapa agen farmakologis juga menghambat enzim, sehingga kadar kolesterol yang tidak sehat dapat diturunkan dalam jangka waktu tertentu.

Pengangkutan dan Penyimpanan Kolesterol

Tubuh manusia normal mengandung sekitar 100 gram kolesterol, meskipun jumlah ini dapat sangat bervariasi di antara orang yang sehat. Sekitar 60 gram dari jumlah total ini bergerak secara dinamis melalui organisme. Karena kolesterol tidak larut dalam air, yang merupakan dasar dari cairan tubuh, kolesterol dibawa melalui sistem peredaran darah oleh partikel pengangkut dalam darah yang disebut lipoprotein. Kompleks mikroskopis ini mengandung lipid dan protein yang dapat menampung kolesterol dan tetap larut dalam darah. Kolesterol diserap ke dalam sel-sel lapisan usus, di mana ia dimasukkan ke dalam kompleks lipoprotein yang disebut kilomikron dan kemudian disekresikan ke dalam sirkulasi limfatik. Getah bening akhirnya memasuki aliran darah, dan lipoprotein dibawa ke hati. Kolesterol, baik yang berasal dari makanan atau yang baru disintesis oleh hati, diangkut dalam darah dalam lipoprotein (VLDL dan LDL) ke jaringan dan organ tubuh. Di sana kolesterol dimasukkan ke dalam membran biologis atau disimpan sebagai ester kolesterol-molekul yang terbentuk oleh reaksi asam lemak (paling umum oleat) dengan gugus hidroksil kolesterol. Ester kolesterol bahkan lebih hidrofobik daripada kolesterol itu sendiri, dan di dalam sel mereka menyatu menjadi tetesan yang analog dengan tetesan lemak dalam sel adiposa. Kolesterol hilang dari sel-sel di jaringan perifer melalui pemindahan ke jenis lipoprotein (HDL) lain yang bersirkulasi dalam darah dan kemudian dikembalikan ke hati, di mana ia dimetabolisme menjadi asam empedu dan garam.

7.4 Lipoprotein

Kompleks LDL pada dasarnya adalah tetesan triasilgliserol dan ester kolesteril yang terbungkus dalam bola yang terbuat dari fosfolipid, kolesteril bebas, dan molekul protein yang dikenal sebagai apoprotein B-100 (ApoB-100). Kompleks LDL adalah kendaraan utama untuk mengantarkan kolesteril ke jaringan tubuh melalui darah. Lipoprotein adalah kompleks lipid-protein yang memungkinkan semua lipid yang berasal dari makanan atau disintesis dalam organ tertentu untuk diangkut ke seluruh tubuh oleh sistem peredaran darah. Struktur dasar agregat ini adalah tetesan minyak yang terbuat dari trigliserida dan ester kolesteril yang dikelilingi oleh lapisan protein dan lipid amfipatik—sangat mirip dengan misel, struktur bulat yang dijelaskan dalam bagian Asam lemak. Jika konsentrasi satu atau beberapa lipoprotein menjadi terlalu tinggi, maka sebagian dari kompleks menjadi tidak larut dan mengendap di dinding arteri dan kapiler. Penumpukan endapan ini disebut aterosklerosis dan akhirnya menyebabkan penyumbatan arteri penting yang menyebabkan serangan jantung atau stroke. Karena beratnya kondisi ini, banyak penelitian difokuskan pada lipoprotein dan fungsinya. Oleh karena itu, penekanan dalam pembahasan berikut ini diberikan pada lipoprotein manusia.

Terdapat empat kelas utama lipoprotein yang beredar, masing-masing dengan karakteristik protein dan komposisi lipidnya sendiri. Kelas-kelas tersebut adalah kilomikron, lipoprotein dengan kepadatan sangat rendah (VLDL), lipoprotein dengan kepadatan rendah (LDL), dan lipoprotein dengan kepadatan tinggi (HDL). Dalam semua kelas kompleks ini, berbagai komponen molekuler tidak saling terkait secara kimiawi, tetapi hanya dikaitkan sedemikian rupa untuk meminimalkan kontak hidrofobik dengan air. Ciri yang paling membedakan dari setiap kelas adalah jumlah relatif lipid dan protein. Karena komposisi lipid dan protein tercermin dalam kepadatan setiap lipoprotein (molekul lipid kurang padat daripada protein), kepadatan, atribut yang mudah diukur, membentuk dasar operasional untuk mendefinisikan kelas-kelas lipoprotein.

Komponen lipid utama adalah trigliserida, kolesterol, ester kolesterol, dan fosfolipid. Inti hidrofobik partikel dibentuk oleh trigliserida dan ester kolesterol. Rantai asil lemak dari komponen-komponen ini tidak jenuh, sehingga struktur intinya cair pada suhu tubuh. Tabel tersebut memberikan rincian lebih lanjut tentang sembilan komponen protein yang berbeda, yang disebut apoprotein, dari kelas-kelas lipoprotein. Kecuali LDL, yang hanya mengandung satu jenis apoprotein, semua kelas memiliki beberapa komponen apoprotein. Semua apoprotein, seperti fosfolipid, bersifat amfipatik dan berinteraksi dengan baik dengan lipid dan air (Thompson, T.E., 2025).

7.5 Metabolisme Lipid

Lipid mendapat reputasi buruk karena dianggap sebagai penyebab utama pandemi obesitas di seluruh dunia. Apa yang disebut diet cepat saji yang diekspor Amerika Serikat ke seluruh dunia disalahkan atas peningkatan indeks massa tubuh (IMT), yang dikaitkan dengan risiko kesehatan. Penelitian terkini telah menekankan bahwa tempat penyimpanan lemak memengaruhi risiko kesehatan. Misalnya, orang yang memiliki lemak berlebih di perut memiliki risiko kanker dan penyakit kardiovaskular yang lebih tinggi. Jelas bahwa biologi lemak itu rumit. Lemak, yang identik dengan lipid, memainkan peran penting dalam sel kita untuk menjaga homeostasis. Lipid menghasilkan ATP dan terlibat dalam sintesis vitamin, hormon, garam empedu, eikosanoid, dan membran sel, serta pengaturan sinyal sel. Kolesterol dan fosfolipid merupakan komponen penting membran dalam sel. Anabolisme dan katabolisme lipid terbagi-bagi. Anabolisme terutama terjadi di sitosol dan retikulum endoplasma, sedangkan katabolisme terutama terjadi di mitokondria (Chandel, 2021).

Metabolisme lipid melibatkan sintesis lipid struktural dan fungsional (seperti fosfolipid, glikolipid, sphingolipid, kolesterol, prostaglandin, dll.) yang merupakan karakteristik jaringan individu dan degradasi lipid untuk memenuhi kebutuhan metabolisme tubuh (misalnya, produksi energi). Metabolisme lipid berada dalam keadaan keseimbangan dinamis yang konstan. Ini berarti bahwa beberapa lipid terus-menerus dioksidasi untuk memenuhi

kebutuhan metabolisme tubuh, sedangkan yang lain disintesis dan disimpan. Oleh karena itu, bab ini berfokus pada jalur metabolisme tempat berbagai kategori lipid disintesis dan/atau didegradasi dalam tubuh (Gyamfi et.al., 2019).

DAFTAR PUSTAKA

- Chandel, N. S. (2021). Lipid metabolism. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 13(9), a040576.
- Gyamfi, D., Awuah, E. O., & Owusu, S. (2019). Lipid metabolism: an overview. *The molecular nutrition of fats*, 17-32.
- Thompson, T.E. (2025). Lipid. *Encyclopedia Britannica*. Diakses melalui laman <https://www.britannica.com/science/lipid>. Diakses pada tanggal 8 Maret 2025.

BAB 8

ASAM AMINO, PROTEIN, SERTA METABOLISME NITROGEN

Oleh Alfiah Alif

8.1 Pendahuluan

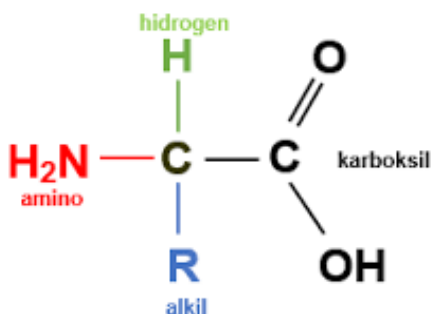
Asam amino dan protein merupakan komponen dasar dalam biokimia dan fisiologi tubuh manusia. Asam amino berfungsi sebagai blok bangunan utama protein yang esensial untuk berbagai fungsi biologis, termasuk dukungan struktural, katalisis reaksi biokimia, dan pengaturan proses seluler. Tubuh manusia memanfaatkan 21 jenis asam amino, dengan 20 asam amino standar yang sangat penting dalam sintesis protein, sementara selenosistein memiliki peran unik dalam berbagai proses seluler seperti respons stres oksidatif dan jalur pensinyalan (Aliu dkk., 2018). Peran asam amino tidak hanya terbatas pada struktur protein, tetapi juga berfungsi sebagai prekursor bagi berbagai biomolekul dan berpartisipasi dalam jalur metabolik yang penting untuk menjaga homeostasis tubuh (Calvez dkk., 2024)

Memahami struktur asam amino sangat penting untuk memahami fungsinya dalam sintesis protein. Setiap asam amino terdiri dari atom karbon pusat yang terikat dengan gugus amino, gugus karboksil, atom hidrogen, dan rantai samping (gugus R) yang menentukan sifat uniknya (Pennington dkk., 2014). Urutan dan komposisi spesifik asam amino dalam sebuah protein menentukan struktur tiga dimensi dan fungsinya, yang krusial untuk aktivitas biologis (Halmo dkk., 2018). Proses sintesis protein, atau translasi, melibatkan perakitan asam amino menjadi rantai polipeptida berdasarkan informasi genetik yang terkode dalam mRNA. Proses yang rumit ini difasilitasi oleh ribosom dan melibatkan berbagai faktor, termasuk transfer RNA (tRNA) dan aminoasil-tRNA sintetas, yang memastikan pemasukan asam amino yang tepat (Reed & Richardson, 2013)

Metabolisme nitrogen juga merupakan aspek penting dalam biokimia asam amino dan protein. Nitrogen adalah elemen kunci dalam asam amino, dan metabolisme nitrogen sangat vital untuk sintesis dan degradasi protein. Tubuh harus menjaga keseimbangan antara asupan nitrogen dari protein makanan dan ekskresi nitrogen melalui urea dan limbah nitrogen lainnya (Wang dkk., 2019). Glutamin, khususnya, memainkan peran signifikan dalam metabolisme nitrogen dengan berfungsi sebagai donor nitrogen dalam berbagai jalur biosintetik dan mempengaruhi fungsi seluler, terutama pada sel yang berkembang cepat seperti yang ditemukan pada tumor (Guo, 2024). Memahami jalur metabolik ini sangat penting untuk mengembangkan strategi terapeutik, terutama dalam konteks penyakit seperti kanker, di mana metabolisme asam amino yang berubah dapat berdampak signifikan pada perkembangan penyakit dan hasil pengobatan (Krishnamurthy dkk., 2017).

8.2 Struktur Asam Amino dan Klasifikasinya

Asam amino adalah senyawa organik yang berfungsi sebagai blok bangunan dasar protein, memainkan peran penting dalam biokimia dan fisiologi makhluk hidup. Setiap asam amino terdiri dari atom karbon pusat (C) yang terikat pada gugus amina (NH_2), gugus karboksil (COOH), atom hidrogen (H), dan rantai samping (gugus R) yang berbeda-beda antar asam amino (Estève & Falceto, 2004).

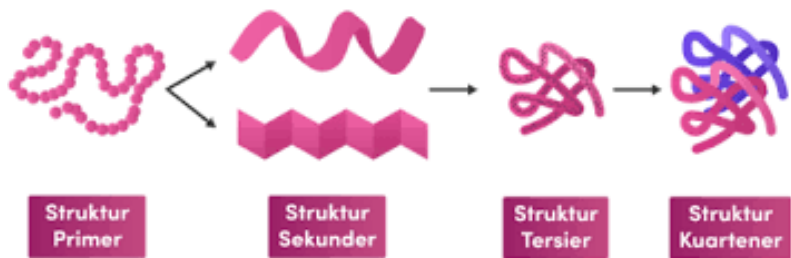


Gambar 8.1. Struktur asam amino (Sorimachi & Okayasu, 2004)

Struktur umum ini memungkinkan asam amino saling menghubungkan melalui ikatan peptida, membentuk rantai

polipeptida yang terlipat menjadi protein fungsional. Urutan dan komposisi asam amino ini menentukan sifat dan fungsi spesifik dari protein yang terbentuk, yang sangat penting untuk berbagai proses biologis, termasuk katalisis enzimatik, pensinyalan seluler, dan dukungan structural (Sorimachi & Okayasu, 2004).

Asam amino dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama: asam amino esensial dan non-esensial. Asam amino esensial tidak dapat disintesis oleh tubuh manusia dan harus diperoleh melalui diet, sedangkan asam amino non-esensial dapat diproduksi secara endogen (Bhasin & Raghava, 2004). Selain itu, asam amino juga dapat dikategorikan berdasarkan sifat rantai sampingnya menjadi beberapa kelompok, termasuk alifatik (misalnya, alanin, leusin), aromatik (misalnya, fenilalanin, triptofan), mengandung sulfur (misalnya, sistein, metionin), serta asam/basa (misalnya, asam aspartat, lisin) (Purkayastha dkk., 2014). Klasifikasi ini sangat penting karena memengaruhi sifat biokimia protein, termasuk kelarutan, reaktivitas, dan interaksinya dengan biomolekul lain.



Gambar 8.2. Konformasi struktur protein (sekunder, tersier, kuartener) (Cai dkk., 2004)

Konformasi tiga dimensi dari protein ditentukan oleh interaksi antar asam amino dalam rantai polipeptida. Protein biasanya menunjukkan empat tingkat organisasi struktural: primer (urutan linear asam amino), sekunder (pola pelipatan lokal seperti alfa-heliks dan beta-sheet), tersier (bentuk tiga dimensi keseluruhan dari satu polipeptida), dan kuartener (perakitan beberapa rantai polipeptida menjadi kompleks fungsional) (Cai dkk., 2004). Pembentukan ikatan peptida antar asam amino terjadi melalui

reaksi sintesis dehidrasi, di mana gugus karboksil dari satu asam amino bereaksi dengan gugus amina dari asam amino lainnya, melepaskan molekul air dan membentuk ikatan kovalen (Shi & Wang, 2011).

8.3 Fungsi Asam Amino dan Protein

Asam amino memainkan peran penting dalam berbagai proses biokimia di dalam tubuh manusia, termasuk katalisis enzimatik, sintesis neurotransmitter, dan pembentukan metabolit penting. Enzim yang merupakan protein yang mengkatalisis reaksi biokimia, sering bergantung pada asam amino spesifik di situs aktifnya untuk memfasilitasi reaksi tersebut. Sebagai contoh, asam amino seperti serin, sistein, dan histidin sering terlibat dalam mekanisme katalitik enzim (Jones dkk., 2012). Selain itu, asam amino berfungsi sebagai prekursor bagi neurotransmitter, yang sangat penting untuk komunikasi antar neuron. Misalnya, asam amino triptofan adalah prekursor serotonin, sementara tirosin diperlukan untuk sintesis dopamin dan norepinefrin (Kölker, 2018). Hal ini menekankan pentingnya asam amino tidak hanya dalam peran struktural tetapi juga dalam fungsi regulasi dan pensinyalan dalam tubuh.

Protein, yang terdiri dari asam amino, menjalankan berbagai fungsi yang esensial untuk menjaga integritas fisiologis. Protein struktural, seperti kolagen dan keratin, memberikan dukungan dan kekuatan pada jaringan, sementara enzim seperti laktase dan amilase memfasilitasi pencernaan dengan memecah karbohidrat dan laktosa, masing-masing (Han dkk., 2022). Protein pengangkut, termasuk hemoglobin dan albumin, memainkan peran penting dalam mengangkut oksigen dan nutrisi ke seluruh tubuh (Kato dkk., 2015). Selain itu, protein integral untuk sistem imun, dengan antibodi sebagai protein khusus yang mengidentifikasi dan menetralkan patogen, sehingga berkontribusi pada mekanisme pertahanan tubuh (Kölker, 2018). Dalam jaringan otot, protein seperti aktin dan miosin sangat penting untuk kontraksi otot, yang memungkinkan gerakan dan aktivitas fisik (Chung dkk., 2015).

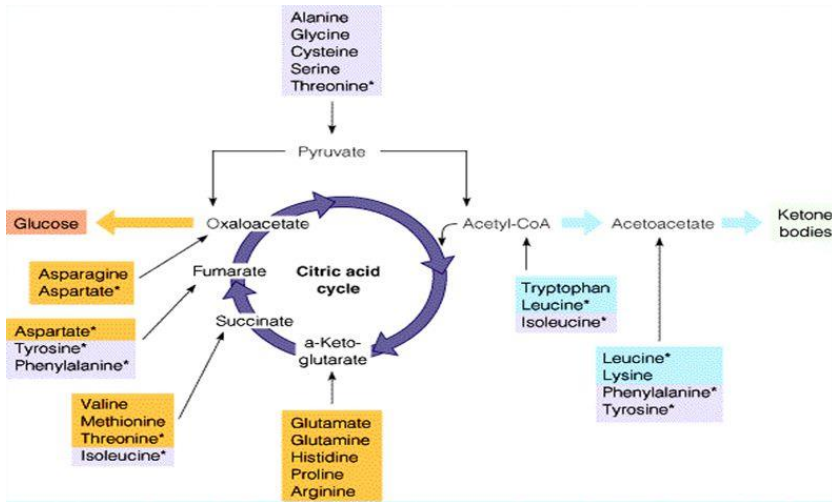
Asam amino juga memainkan peran signifikan dalam metabolisme energi. Proteolisis, yaitu pemecahan protein menjadi

asam amino, merupakan proses penting yang memungkinkan tubuh mendaur ulang asam amino untuk sintesis protein baru atau mengubahnya menjadi substrat energi bila diperlukan (Merino dkk., 2014). Selama periode puasa atau asupan karbohidrat rendah, asam amino dapat digunakan untuk glukoneogenesis, jalur metabolik yang menghasilkan glukosa dari sumber non-karbohidrat, memastikan pasokan energi yang terus-menerus untuk fungsi vital (Kato dkk., 2015). Selain itu, dalam keadaan ketosis, beberapa asam amino dapat diubah menjadi tubuh keton, memberikan sumber energi alternatif bagi otak dan jaringan lainnya (He dkk., 2014).

Secara ringkas, asam amino sangat penting dalam berbagai proses biokimia, berfungsi sebagai blok bangunan bagi protein, prekursor bagi neurotransmitter, dan peserta dalam jalur metabolik. Peran mereka yang beragam menyoroti kompleksitas interaksi biokimia yang menopang kehidupan dan menekankan pentingnya asupan asam amino yang memadai untuk kesehatan secara keseluruhan.

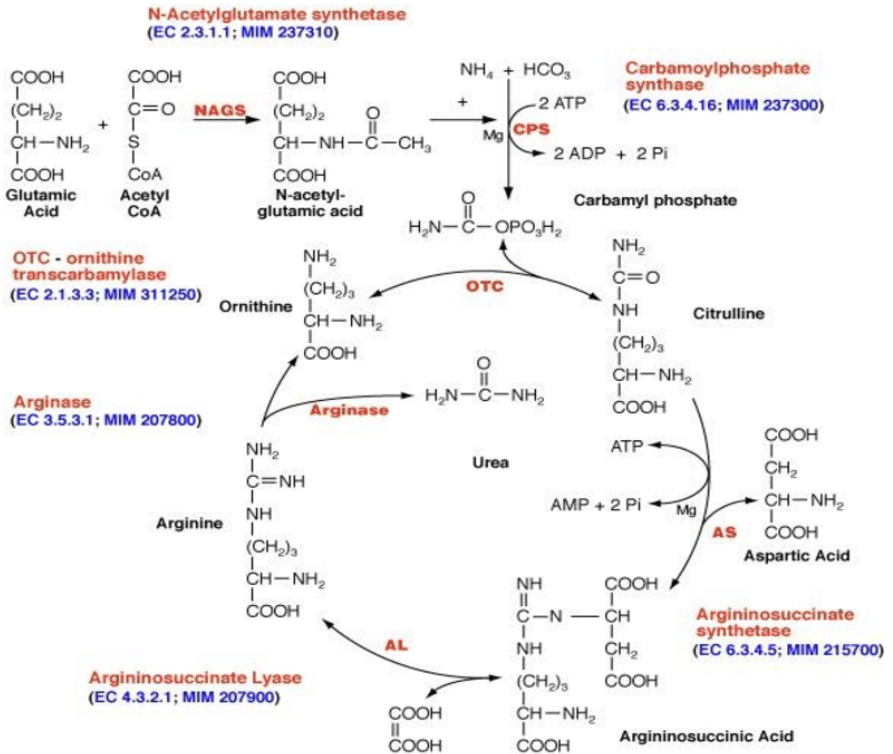
8.4 Metabolisme Nitrogen

Metabolisme nitrogen adalah aspek penting dalam biokimia manusia, memengaruhi berbagai proses fisiologis dan menjaga homeostasis tubuh. Sumber utama nitrogen dalam tubuh termasuk protein dari makanan, yang dipecah menjadi asam amino, serta daur ulang senyawa nitrogen melalui jalur metabolik. Mengatur metabolisme nitrogen sangat penting untuk mencegah penumpukan produk sampingan beracun, seperti amonia, yang dapat mengganggu fungsi seluler dan menyebabkan masalah kesehatan yang serius (Jiang dkk., 2021). Siklus nitrogen, yang mencakup konversi nitrogen dari bentuk atmosferik menjadi senyawa organik dan kembali, sangat terkait dengan berbagai proses biologis, termasuk sintesis asam amino, pergantian protein, dan metabolisme energi (Xu dkk., 2022).



Gambar 8.3. Degradasi Asam amino (Jaques dkk., 2019)

Degradasi asam amino adalah komponen vital dari metabolisme nitrogen, yang melibatkan proses-proses seperti transaminasi dan deaminasi. Transaminasi, yang dikatalisis oleh enzim aminotransferase, memfasilitasi pemindahan gugus amino antara asam amino dan α -keto asam, memungkinkan sintesis asam amino baru (Jaques dkk., 2019). Deaminasi, yang sering dimediasi oleh enzim dehidrogenase, melibatkan penghilangan gugus amino, yang menghasilkan pembentukan amonia dan keto asam yang sesuai. Reaksi-reaksi ini sangat penting untuk pengaturan kadar asam amino dan produksi substrat energi (Wase dkk., 2014). Amonia yang dihasilkan kemudian diubah menjadi urea, senyawa yang lebih tidak beracun, melalui siklus urea, yang merupakan jalur utama detoksifikasi amonia di hati (Schlüter dkk., 2012).



Gambar 8.4. Diagram siklus urea (Beatty dkk., 2016)

Siklus urea terdiri dari serangkaian reaksi enzimatik yang mengubah amonia menjadi urea, yang kemudian diekskresikan dari tubuh. Enzim kunci dalam siklus ini termasuk karbamoil fosfat sintase, ornithine transcarbamylase, dan arginase, yang masing-masing memainkan peran spesifik dalam proses konversi (Miranda dkk., 2012). Regulasi siklus urea dipengaruhi oleh berbagai substrat dan produk, seperti ATP dan sitrulin, yang memastikan siklus ini berjalan dengan efisien dalam kondisi fisiologis yang bervariasi (Beatty dkk., 2016). Regulasi ini sangat penting untuk menjaga keseimbangan nitrogen dan mencegah penumpukan amonia yang beracun dalam aliran darah.

Transportasi amonia dalam tubuh terutama difasilitasi oleh asam amino seperti glutamin dan asam glutamat, yang berfungsi sebagai pembawa amonia ke hati (Rieck dkk., 2017). Di hati, amonia didetoksifikasi melalui siklus urea, yang menyoroti peran sentral

organ ini dalam metabolisme nitrogen. Proses ini sangat penting untuk menjaga homeostasis metabolik, karena kadar amonia yang berlebihan dapat menyebabkan gangguan neurologis dan komplikasi kesehatan lainnya (Williams dkk., 2015). Memahami rincian metabolisme nitrogen sangat penting untuk mengembangkan strategi terapeutik bagi kondisi yang terkait dengan ketidakseimbangan nitrogen, seperti penyakit hati dan gangguan metabolik. Secara keseluruhan metabolisme nitrogen adalah proses kompleks dan penting yang melibatkan degradasi asam amino, siklus urea, dan transportasi amonia. Regulasi jalur-jalur ini sangat penting untuk menjaga keseimbangan nitrogen dan mencegah toksisitas, menegaskan pentingnya asam amino dan protein dalam kesehatan manusia.

8.5 Sintesis Asam Amino dan Metabolisme Protein

Biosintesis asam amino adalah aspek penting dalam metabolisme manusia, yang membedakan antara asam amino yang dapat disintesis oleh tubuh dan yang harus diperoleh dari sumber makanan. Manusia dapat mensintesis asam amino non-esensial, seperti alanin dan aspartat, sementara asam amino esensial, termasuk leusin dan triptofan, harus didapatkan melalui makanan. Penting untuk dicatat bahwa manusia dan hewan lainnya hanya mampu mensintesis asam amino non-esensial, sementara asam amino esensial harus diperoleh dari sumber makanan (Safi dkk., 2012). Jalur biosintesis untuk asam amino esensial melibatkan reaksi enzimatik yang kompleks. Misalnya, triptofan disintesis dari korismat melalui serangkaian langkah yang melibatkan beberapa enzim, sementara fenilalanin disintesis dari tirosin, yang diperoleh dari fenilalanin melalui proses hidroxilasi (Safi dkk., 2012). Memahami jalur-jalur ini sangat penting untuk menghargai bagaimana asupan makanan mempengaruhi ketersediaan asam amino dan kesehatan metabolik secara keseluruhan.

Regulasi sintesis protein adalah proses multifaset yang melibatkan transkripsi dan translasi. Transkripsi adalah langkah pertama, di mana messenger RNA (mRNA) disintesis dari DNA, yang berfungsi sebagai template untuk sintesis protein (Duncan & Millar, 2021). Peran ribosom sangat sentral dalam translasi, karena

mereka memfasilitasi pengkodean mRNA menjadi rantai polipeptida. Ribosom membaca urutan mRNA dalam kodon, yang masing-masing sesuai dengan asam amino tertentu, dan mengkatalisis pembentukan ikatan peptida antar asam amino (Yuan & Burrell, 2013). Berbagai faktor mengatur sintesis protein, termasuk hormon, ketersediaan nutrisi, dan kondisi lingkungan. Sebagai contoh, jalur target mekanistik rapamycin (mTOR) memainkan peran penting dalam mendeteksi tingkat nutrisi dan memodulasi sintesis protein sesuai kebutuhan (Loayza-Puch dkk., 2013). Selain itu, kondisi stres dapat menyebabkan fosforilasi eIF2 α , yang mengurangi sintesis protein global sambil secara selektif meningkatkan translasi mRNA tertentu (Mittal dkk., 2017)

Degradasi protein juga penting untuk menjaga homeostasis seluler, melibatkan proses yang menghilangkan protein yang rusak atau tidak dibutuhkan. Dua metode utama penghancuran protein adalah melalui proteasom dan lisosom. Sistem ubiquitin-proteasom adalah mekanisme kunci untuk kontrol kualitas protein, di mana protein yang akan didegradasi diberi tanda dengan molekul ubiquitin, yang menandakan untuk pengangkutannya ke proteasom (Ivanov dkk., 2018). Sistem ini memastikan bahwa protein yang rusak atau terlipat salah dapat dihilangkan secara efisien, mencegah disfungsi seluler. Di sisi lain, lisosom mendekonstruksi protein melalui autofagi, sebuah proses yang mendaur ulang komponen sel dan menyediakan asam amino untuk sintesis protein baru selama kekurangan nutrisi (Ciandrini dkk., 2013). Secara ringkas, biosintesis asam amino, regulasi sintesis protein, dan degradasi protein adalah proses yang saling terkait dan esensial untuk menjaga keseimbangan metabolik dan fungsi seluler. Memahami proses-proses ini memberikan wawasan tentang bagaimana tubuh mengelola sumber daya proteinnya dan merespon berbagai tuntutan fisiologis.

8.6 Penutup

Sebagai kesimpulan, Bab 8 yang membahas tentang asam amino, protein, dan metabolisme Nitrogen menekankan pentingnya peran asam amino dalam berbagai proses biokimia tubuh manusia. Asam amino bukan hanya sebagai blok bangunan dasar untuk

sintesis protein, tetapi juga sebagai prekursor berbagai molekul penting seperti neurotransmitter, serta terlibat dalam jalur metabolik utama yang mendukung homeostasis tubuh. Pemahaman tentang struktur asam amino dan klasifikasinya memberikan dasar bagi pemahaman lebih dalam tentang bagaimana protein berfungsi dan berperan dalam tubuh.

Metabolisme nitrogen, yang mencakup degradasi asam amino, siklus urea, dan transportasi amonia, adalah aspek yang sangat penting dalam menjaga keseimbangan nitrogen dalam tubuh dan mencegah penumpukan senyawa beracun seperti amonia yang dapat merusak fungsi seluler. Regulasi yang ketat dalam proses-proses ini, dari biosintesis asam amino hingga degradasi protein, memastikan kelancaran proses-proses metabolik yang mendukung berbagai fungsi fisiologis.

DAFTAR PUSTAKA

- Aliu, E., Kanungo, S., & Arnold, G. L. (2018). Amino Acid Disorders. *Annals of Translational Medicine*, 6(24), 471. <https://doi.org/10.21037/atm.2018.12.12>
- Beatty, P. H., Klein, M. S., Fischer, J., Lewis, I. A., Muench, D. G., & Good, A. G. (2016). Understanding Plant Nitrogen Metabolism Through Metabolomics and Computational Approaches. *Plants*, 5(4), 39. <https://doi.org/10.3390/plants5040039>
- Bhasin, M., & Raghava, G. P. S. (2004). Classification of Nuclear Receptors Based on Amino Acid Composition and Dipeptide Composition. *Journal of Biological Chemistry*, 279(22), 23262–23266. <https://doi.org/10.1074/jbc.m401932200>
- Cai, Y., Pong-Wong, R., Jen, C., & Chou, K. (2004). Application of SVM to Predict Membrane Protein Types. *Journal of Theoretical Biology*, 226(4), 373–376. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2003.08.015>
- Calvez, J., Azzout-Marniche, D., & Tomé, D. (2024). Protein Quality, Nutrition and Health. *Frontiers in Nutrition*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1406618>
- Chung, Y. H., Lee, Y. J., Lee, H. S., Chung, S. J., Lim, C. H., Oh, K. W., Sohn, U. D., Park, E. S., & Jeong, J. H. (2015). Extremely Low Frequency Magnetic Field Modulates the Level of Neurotransmitters. *Korean Journal of Physiology and Pharmacology*, 19(1), 15. <https://doi.org/10.4196/kjpp.2015.19.1.15>
- Ciandrini, L., Stansfield, I., & Romano, M. C. (2013). Ribosome Traffic on mRNAs Maps to Gene Ontology: Genome-Wide Quantification of Translation Initiation Rates and Polysome Size Regulation. *Plos Computational Biology*, 9(1), e1002866. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1002866>
- Duncan, O., & Millar, A. H. (2021). *BREAKTHROUGH REPORT - Large Scale Measurement of Protein Synthesis Rates Over the Diurnal Cycle Reveal Pathway Specific Regulation of Translation*. <https://doi.org/10.1101/2021.03.15.435498>
- Estève, J., & Falceto, F. (2004). A General Clustering Approach With Application to the Miyazawa–Jernigan Potentials for Amino

- Acids. *Proteins Structure Function and Bioinformatics*, 55(4), 999–1004. <https://doi.org/10.1002/prot.10570>
- Guo, X. (2024). Glutamine Metabolism in Prostate Cancer. *Annals of Urologic Oncology*. <https://doi.org/10.32948/auo.2024.08.01>
- Halmo, S. M., Sensibaugh, C. A., Bhatia, K. S., Howell, A. L., Ferryanto, E. P., Choe, B., Kehoe, K., Watson, M., & Lemons, P. P. (2018). Student Difficulties During Structure–function Problem Solving. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 46(5), 453–463. <https://doi.org/10.1002/bmb.21166>
- Han, Y., Peng, L., & Wang, T. (2022). Tadr Is an Axonal Histidine Transporter Required for Visual Neurotransmission in *Drosophila*. *Elife*, 11. <https://doi.org/10.7554/elife.75821>
- He, J., Teng, L., Hong, F., Zhang, C., & Wang, H. (2014). Compound Formula Rehmannia Alleviates Levodopa-Induced Dyskinesia in Parkinson's Disease. *Neural Regeneration Research*, 9(4), 407. <https://doi.org/10.4103/1673-5374.128246>
- Ivanov, I. P., Shin, B.-S., Loughran, G., Tzani, I., Young, S. K., Cao, C., Atkins, J. F., & Dever, T. (2018). Polyamine Control of Translation Elongation Regulates Start Site Selection on Antizyme Inhibitor mRNA via Ribosome Queuing. *Molecular Cell*, 70(2), 254–264.e6. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2018.03.015>
- Jaques, L. B. A., Carvalho, I. R., Szareski, V. J., Rodrigues, H. E., Dubal, Í. T. P., Troyjack, C., Pimentel, J. R., Mendonça, M. T., Conte, G. G., Paraginski, R. T., Villela, F. A., Aumonde, T. Z., & Pedó, T. (2019). Physiologic Quality and Biochemical Characters of Barley Seeds Produced Under Nitrogen Doses and Growing Environments. *Journal of Agricultural Science*, 11(12), 65. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n12p65>
- Jiang, Y., Sun, Y., Zheng, D., Han, C., Cao, K., Xu, L., Liu, S., Cao, Y., & Feng, N. (2021). Physiological and Transcriptome Analyses for Assessing the Effects of Exogenous Uniconazole on Drought Tolerance in Hemp (*Cannabis Sativa* L.). *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93820-6>

- Jones, C. B., Ott, E. M., Keener, J., Curtiss, M., Sandrin, V., & Babst, M. (2012). Regulation of Membrane Protein Degradation by Starvation-Response Pathways. *Traffic*, *13*(3), 468–482. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0854.2011.01314.x>
- Kato, H., Suzuki, H., Mimura, M., Inoue, Y., Sugita, M., Suzuki, K., & Kobayashi, H. (2015). Leucine-Enriched Essential Amino Acids Attenuate Muscle Soreness and Improve Muscle Protein Synthesis After Eccentric Contractions in Rats. *Amino Acids*, *47*(6), 1193–1201. <https://doi.org/10.1007/s00726-015-1946-9>
- Kölker, S. (2018). Metabolism of Amino Acid Neurotransmitters: The Synaptic Disorder Underlying Inherited Metabolic Diseases. *Journal of Inherited Metabolic Disease*, *41*(6), 1055–1063. <https://doi.org/10.1007/s10545-018-0201-4>
- Krishnamurthy, R., Suryawanshi, Y. R., & Essani, K. (2017). Nitrogen Isotopes Provide Clues to Amino Acid Metabolism in Human Colorectal Cancer Cells. *Scientific Reports*, *7*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02793-y>
- Loayza-Puch, F., Drost, J., Rooijers, K., Lopes, R., Elkon, R., & Agami, R. (2013). P53 Induces Transcriptional and Translational Programs to Suppress Cell Proliferation and Growth. *Genome Biology*, *14*(4). <https://doi.org/10.1186/gb-2013-14-4-r32>
- Merino, J. J., Arce, C., Naddaf, A., Bellver-Landete, V., Oset-Gasque, M. J., & González, M. P. (2014). The Nitric Oxide Donor SNAP-Induced Amino Acid Neurotransmitter Release in Cortical Neurons. Effects of Blockers of Voltage-Dependent Sodium and Calcium Channels. *Plos One*, *9*(3), e90703. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090703>
- Miranda, L. F., Rodríguez, N. M., Pereira, E. S., Queiróz, A. C. d., Sainz, R. D., Pimentel, P. G., & Neto, M. M. G. (2012). Chemical Composition and Ruminal Degradation Kinetics of Crude Protein and Amino Acids, and Intestinal Digestibility of Amino Acids From Tropical Forages. *Revista Brasileira De Zootecnia*, *41*(3), 717–725. <https://doi.org/10.1590/s1516-35982012000300035>
- Mittal, N., Guimaraes, J. C., Gross, T. P., Schmidt, A., Viña-Vilaseca, A., Nedialkova, D. D., Aeschmann, F., Leidel, S. A., Spang, A., &

- Zavolan, M. (2017). The Gcn4 Transcription Factor Reduces Protein Synthesis Capacity and Extends Yeast Lifespan. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00539-y>
- Pennington, B. O., Sears, D. W., & Clegg, D. (2014). Interactive <sc>H</Sc>angman Teaches Amino Acid Structures and Abbreviations. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 42(6), 495–500. <https://doi.org/10.1002/bmb.20826>
- Purkayastha, P., Rallapalli, A., Murthy, N. L. B., Malapati, A., Yogeewari, P., & Sriram, D. (2014). *Effect of Feature Selection on Kinase Classification Models*. 81–86. https://doi.org/10.1007/978-981-287-260-9_8
- Reed, K. E., & Richardson, J. M. (2013). Using Microbial Genome Annotation as a Foundation for Collaborative Student Research. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 41(1), 34–43. <https://doi.org/10.1002/bmb.20663>
- Rieck, B., Degiacomi, G., Zimmermann, M., Cascioferro, A., Boldrin, F., Adler, N. R. L., Bottrill, A. R., Chevalier, F. L., Frigui, W., Bellinzoni, M., Lisa, M., Alzari, P. M., Nguyen, L., Brosch, R., Sauer, U., Manganelli, R., & O'Hare, H. M. (2017). PknG Senses Amino Acid Availability to Control Metabolism and Virulence of Mycobacterium Tuberculosis. *Plos Pathogens*, 13(5), e1006399. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1006399>
- Safi, C., Charton, M., Pignolet, O., Pontalier, P.-Y., & Vaca-García, C. (2012). Evaluation of the Protein Quality of Porphyridium Cruentum. *Journal of Applied Phycology*, 25(2), 497–501. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9883-4>
- Schlüter, U., Mascher, M., Colmsee, C., Scholz, U., Bräutigam, A., Fahnenstich, H., & Sonnewald, U. (2012). Maize Source Leaf Adaptation to Nitrogen Deficiency Affects Not Only Nitrogen and Carbon Metabolism but Also Control of Phosphate Homeostasis. *Plant Physiology*, 160(3), 1384–1406. <https://doi.org/10.1104/pp.112.204420>
- Shi, X. H., & Wang, X. H. (2011). Discussing the Syntheses Table of the Standard Amino Acid Based on the Graph Theory. *Applied Mechanics and Materials*, 105–107, 1784–1787.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.105-107.1784>

- Sorimachi, K., & Okayasu, T. (2004). Classification of Eubacteria Based on Their Complete Genome: Where Does Mycoplasmataceae Belong? *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences*, 271(suppl_4). <https://doi.org/10.1098/rsbl.2003.0141>
- Wang, Y., Bai, C., Ruan, Y., Liu, M., Chu, Q., Li, Q., Yang, C., & Li, B. (2019). Coordinative Metabolism of Glutamine Carbon and Nitrogen in Proliferating Cancer Cells Under Hypoxia. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08033-9>
- Wase, N., Black, P. N., Stanley, B. A., & Dirusso, C. (2014). Integrated Quantitative Analysis of Nitrogen Stress Response In *Chlamydomonas Reinhardtii* Using Metabolite and Protein Profiling. *Journal of Proteome Research*, 13(3), 1373–1396. <https://doi.org/10.1021/pr400952z>
- Williams, K. J., Jenkins, V. A., Barton, G., Bryant, W., Krishnan, N., & Robertson, B. D. (2015). Deciphering the Metabolic Response of *Mycobacterium Tuberculosis* to Nitrogen Stress. *Molecular Microbiology*, 97(6), 1142–1157. <https://doi.org/10.1111/mmi.13091>
- Xu, Y., Zhang, K., Li, S., Zhou, Y., Ran, S., Xu, R., Yizhang, L., Li, S., Huang, W., & Zhong, F. (2022). Responses of Different Nitrogen Concentrations to Carbon and Nitrogen Metabolism in Tomato Leaves. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1579854/v1>
- Yuan, S., & Burrell, B. D. (2013). Endocannabinoid-Dependent Long-Term Depression in a Nociceptive Synapse Requires Coordinated Presynaptic and Postsynaptic Transcription and Translation. *Journal of Neuroscience*, 33(10), 4349–4358. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.3922-12.2013>

BAB 9

STRUKTUR, FUNGSI DAN KLASIFIKASI ENZIM

Oleh Ayusti Dirga

9.1 Pendahuluan

Enzim adalah biomolekul yang berperan penting dalam berbagai proses biokimia di dalam tubuh manusia. Sebagai katalis alami, enzim mempercepat reaksi kimia tanpa ikut bereaksi, sehingga memungkinkan tubuh menjalankan fungsi metabolisme dengan efisien. Tanpa enzim, banyak reaksi biologis yang mendukung kehidupan akan berlangsung terlalu lambat atau bahkan tidak terjadi sama sekali. Oleh karena itu, enzim memiliki peran yang sangat krusial dalam menjaga keseimbangan fisiologis tubuh.

Dalam bidang kesehatan, enzim memiliki berbagai manfaat, baik dalam proses pencernaan, detoksifikasi, hingga terapi medis. Misalnya, enzim pencernaan seperti amilase, protease, dan lipase membantu tubuh menguraikan makanan menjadi nutrisi yang lebih kecil agar dapat diserap dengan mudah. Selain itu, enzim juga digunakan dalam diagnosis medis, seperti enzim laktat dehidrogenase (LDH) yang dapat menjadi indikator adanya kerusakan jaringan atau penyakit tertentu.

Pemanfaatan enzim dalam dunia medis terus berkembang, termasuk dalam terapi penyakit genetik, produksi obat-obatan, serta dalam teknologi biomedis seperti terapi enzim pengganti. Beberapa penyakit yang disebabkan oleh defisiensi enzim, seperti penyakit *Gaucher* atau Fenilketonuria, dapat diatasi dengan terapi enzim tertentu. Dengan berkembangnya ilmu bioteknologi, penelitian terhadap enzim terus dilakukan untuk menemukan aplikasi baru dalam dunia kesehatan yang dapat meningkatkan kualitas hidup manusia.

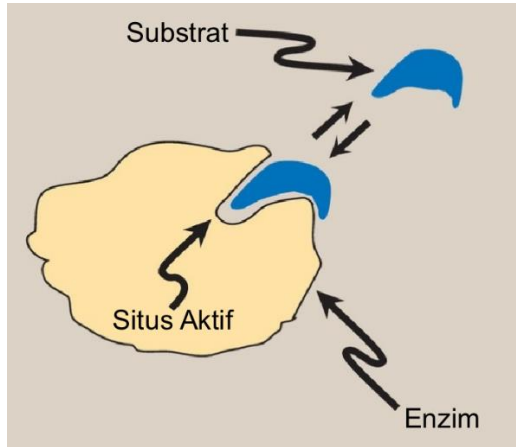
Dengan memahami peran enzim dalam kesehatan, kita dapat lebih menghargai bagaimana tubuh bekerja secara optimal dan bagaimana enzim dapat dimanfaatkan dalam bidang medis. Oleh karena itu, kajian tentang enzim terus menjadi topik penting dalam dunia kedokteran dan bioteknologi untuk menjawab tantangan kesehatan di masa depan.

9.2 Struktur Enzim

Enzim adalah protein yang memiliki struktur kompleks dan spesifik, yang menentukan fungsinya sebagai katalis dalam reaksi biokimia. Struktur enzim terdiri dari beberapa tingkatan organisasi dan memiliki komponen penting yang memengaruhi aktivitasnya (Punekar, 2018). Enzim memiliki berat molekul yang bervariasi, mulai dari sekitar 12.000 hingga lebih dari 1 juta. Beberapa enzim dapat berfungsi secara mandiri tanpa membutuhkan gugus kimia tambahan selain gugus asam aminonya. Namun, ada juga enzim yang memerlukan komponen kimia tambahan, yang dikenal sebagai kofaktor. Kofaktor ini dapat berupa satu atau lebih ion anorganik, seperti Fe^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , atau Zn^{2+} (**Tabel 9.1**), atau dapat pula berupa molekul organik atau metalorganik yang disebut koenzim. Koenzim berfungsi sebagai pembawa sementara untuk gugus fungsi tertentu (**Tabel 9.2**). Sebagian besar koenzim ini berasal dari vitamin, yaitu nutrisi organik yang diperlukan dalam jumlah kecil dan diperoleh dari makanan (Nelson and Cox, 2017).

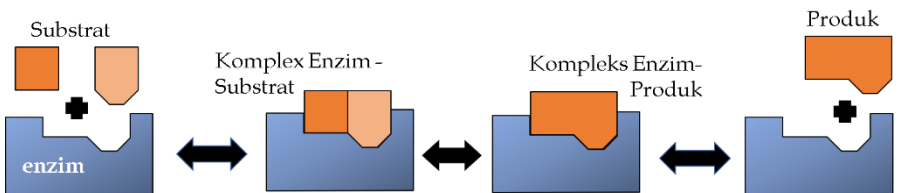
9.2.1 Situs Aktif Enzim

Enzim memiliki ukuran yang lebih besar dibandingkan dengan substrat. Molekul enzim mengandung kantong atau celah khusus yang disebut sebagai sisi aktif. Sisi aktif, yang dibentuk oleh pelipatan protein, mengandung rantai samping asam amino yang berpartisipasi dalam pengikatan dan katalisis substrat (**Gambar 9.1**).



Gambar 9.1. Sisi aktif enzim
(Sumber : (Ferrier, 2017))

Sisi aktif enzim adalah bagian spesifik dari enzim tempat substrat berikatan dan mengalami reaksi kimia. Struktur tiga dimensi enzim memungkinkan sisi aktif memiliki bentuk yang sangat spesifik, sehingga hanya substrat tertentu yang dapat berinteraksi dengannya. Hal ini menunjukkan bahwa enzim bekerja dengan prinsip selektivitas tinggi, mirip dengan mekanisme "kunci dan gembok" atau model "induced fit".

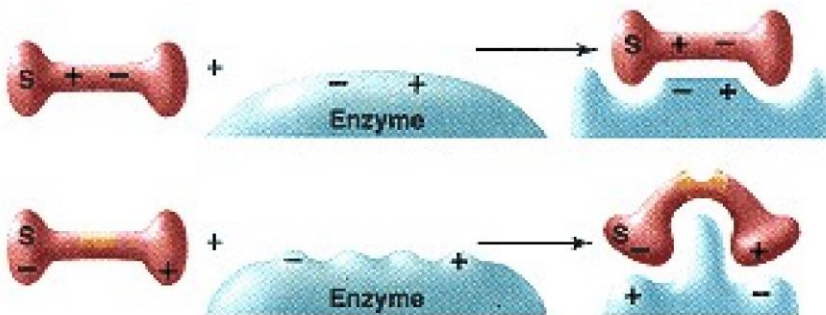


Gambar 9.2. Model *Lock and Key Analogy*
(Sumber : (Purich, 2010))

Dalam model **kunci dan gembok**, sisi aktif enzim memiliki bentuk yang pas dengan substrat, seperti kunci yang hanya cocok dengan satu jenis gembok. Namun, penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa enzim juga dapat mengalami sedikit perubahan bentuk setelah substrat berikatan, yang dikenal sebagai **model induced fit**. Dalam model ini, sisi aktif akan menyesuaikan

diri dengan substrat untuk meningkatkan efisiensi reaksi (Sutrisno, 2017).

Sisi aktif terdiri dari beberapa residu asam amino yang berperan langsung dalam katalisis reaksi. Beberapa residu ini membantu menstabilkan substrat melalui ikatan hidrogen, interaksi ionik, atau gaya Van der Waals, sementara residu lain bertindak sebagai katalis yang mempercepat perubahan substrat menjadi produk akhir. Perubahan ini terjadi tanpa mengubah struktur permanen enzim, sehingga enzim dapat digunakan kembali untuk reaksi berikutnya. Dengan keberadaan sisi aktif yang spesifik, enzim berperan penting dalam berbagai reaksi biologis di dalam tubuh, seperti metabolisme, sintesis DNA, dan pencernaan makanan. Gangguan pada struktur sisi aktif, misalnya akibat mutasi genetik atau pengaruh zat penghambat (inhibitor), dapat menyebabkan gangguan metabolik atau penyakit tertentu.



Gambar 9.3. Model *Induced-fit theory*
(Sumber : (Devlin, 1997))

9.2.2 Kofaktor dan Koenzim

Selain substrat, beberapa enzim memerlukan **kofaktor** atau **koenzim** untuk membantu reaksi pada sisi aktif. Kofaktor bisa berupa ion logam seperti Zn^{2+} atau Mg^{2+} , sedangkan koenzim adalah molekul organik seperti vitamin atau NAD^+ . Kehadiran kofaktor atau koenzim ini sering kali esensial untuk memastikan bahwa enzim dapat bekerja secara optimal. Kofaktor dan koenzim berperan penting dalam meningkatkan aktivitas enzim dan

memungkinkan reaksi biokimia berlangsung dengan efisien (Satyanarayana and Chakrapani, 2016).

Kofaktor adalah molekul non-protein yang membantu enzim dalam menjalankan fungsinya. Kofaktor dapat berupa ion logam, seperti **Zn²⁺ (seng)**, **Mg²⁺ (magnesium)**, **Fe²⁺ (besi)**, dan **Cu²⁺ (tembaga)**, yang berfungsi menstabilkan struktur enzim atau berpartisipasi dalam reaksi katalitik (Tabel 9.1). Sebagai contoh, enzim **karboksipeptidase** memerlukan ion seng (Zn²⁺) sebagai kofaktor untuk membantu pemecahan protein dalam pencernaan. Kofaktor dapat bersifat **terikat kuat** pada enzim (sebagai bagian permanen) atau hanya berikatan sementara selama reaksi berlangsung. Jika kofaktor terikat secara permanen, mereka sering disebut sebagai **gugus prostetik**, seperti ion besi dalam hemoglobin yang membantu pengikatan oksigen.

Beberapa enzim memerlukan kofaktor dan satu atau lebih ion logam agar dapat berfungsi dengan baik. Koenzim atau ion logam yang terikat erat, bahkan secara kovalen, pada protein enzim dikenal sebagai gugus prostetik. Enzim yang sudah lengkap dan aktif secara katalitik, bersama dengan koenzim dan/atau ion logam yang terikat, disebut holoenzim. Bagian protein dari enzim ini disebut apoenzim atau apoprotein. Selain itu, beberapa protein enzim mengalami modifikasi secara kovalen melalui proses seperti fosforilasi, glikosilasi, dan lainnya. Sebagian besar modifikasi ini berperan penting dalam pengaturan aktivitas enzim.

Tabel 9.1. Kofaktor Enzim

Ion	Enzim
Cu²⁺	Sitokrom oksidase
Mg²⁺	Heksokinase, glukosa 6-fosfatase, piruvat kinase
Fe²⁺ or Fe³⁺	Sitokrom oksidase, katalase, peroksidase
Zn²⁺	Karbonat anhidrase, alkohol dehidrogenase, karboksipeptidase A dan B
K⁺	Piruvat kinase
Mn²⁺	Arginase, ribonukleotida reduktase
Mo	Dinitrogenase
Ni²⁺	Urease

Sumber: (Nelson and Cox, 2017)

Koenzim adalah molekul organik kecil, sering kali merupakan turunan dari vitamin, yang berfungsi dengan enzim dalam proses katalitik (Tabel 9.2). Seringkali koenzim memiliki afinitas untuk enzim yang mirip dengan substrat; akibatnya, koenzim dapat dianggap sebagai substrat kedua. Dalam beberapa kasus, koenzim terikat secara kovalen ke apoenzim dan berfungsi pada atau dekat situs aktif dalam katalisis. Pada enzim lain, peran koenzim berada di antara kedua ekstrem ini. Contoh koenzim yang umum adalah **NAD⁺ (Nikotinamida Adenin Dinukleotida)** dan **FAD (Flavin Adenin Dinukleotida)**, yang berperan dalam reaksi oksidasi-reduksi untuk menghasilkan energi dalam metabolisme sel. Sebagai contoh, dalam proses respirasi seluler, enzim **dehidrogenase** membutuhkan NAD⁺ sebagai koenzim untuk mentransfer elektron dalam reaksi kimia yang menghasilkan ATP (energi sel). Begitu pula, **koenzim A (CoA)** berperan penting dalam metabolisme lemak dan sintesis asam lemak (Wimpy *et al.*, 2025).

Tabel 9.2. Beberapa Koenzim yang Berfungsi sebagai Pembawa Transien Atom atau Gugus Fungsi Tertentu

Koenzim	Contoh gugus kimia yang ditransfer	Prekursor makanan pada mamalia
Biositin	CO ₂	Biotin
Koenzim A	Gugus Asil	Asam Pantotenat dan senyawa lainnya
Nicotinamide adenin dinukleotida	Ion Hidrida (:H ⁻)	Asam Nikotinat (niasin)
5'-Deoksiadenosilkobalamin (koenzim B ₁₂)	Atom H dan gugus alkil	Vitamin B ₁₂
Flavin adenin dinukleotida	Electron	Riboflavin (vitamin B ₂)
Lipoat	Elektron and gugus asil	Tidak dibutuhkan dalam diet
Piridoksal fosfat	Gugus Amino	Pyridoksine (vitamin B ₆)
Tetrahidrofolat	Gugus 1-C	Folat
Tiamin pirofosfat	Aldehida	Tiamin (vitamin B ₁)

Sumber: (Nelson and Cox, 2017)

9.3 Fungsi Enzim

Enzim adalah biomolekul yang berfungsi sebagai **katalis** dalam reaksi kimia, mempercepat laju reaksi tanpa mengalami perubahan permanen. Enzim memainkan peran penting dalam berbagai proses biologis, termasuk metabolisme, pencernaan, sintesis molekul, dan regulasi aktivitas sel. Tanpa enzim, banyak reaksi kimia dalam tubuh akan berlangsung terlalu lambat untuk mempertahankan kehidupan (Purich, 2010).

9.3.1 Enzim dalam Pencernaan

Salah satu fungsi utama enzim adalah membantu proses **pencernaan makanan** dengan memecah molekul besar menjadi bentuk yang lebih sederhana agar dapat diserap oleh tubuh. Misalnya, enzim **amilase** dalam air liur mengubah karbohidrat menjadi gula sederhana, **protease** di lambung dan usus memecah protein menjadi asam amino, serta **lipase** yang menguraikan lemak menjadi asam lemak dan gliserol.

9.3.2 Enzim dalam Metabolisme Sel

Metabolisme melibatkan serangkaian reaksi kimia yang memungkinkan sel memperoleh energi dan membangun biomolekul yang diperlukan untuk fungsi tubuh. Enzim seperti **ATP sintase** berperan dalam produksi ATP (adenosin trifosfat), sumber energi utama sel. Sementara itu, enzim **dehidrogenase** membantu dalam reaksi oksidasi-reduksi yang terjadi dalam siklus Krebs dan rantai transpor elektron.

9.3.3 Enzim dalam Sintesis dan Perbaikan Molekul

Selain memecah molekul, enzim juga berperan dalam sintesis berbagai senyawa penting. Contohnya adalah **DNA polimerase**, enzim yang membantu mereplikasi DNA saat sel membelah. Tanpa enzim ini, sel tidak dapat memperbanyak diri atau memperbaiki kerusakan DNA yang terjadi akibat mutasi atau faktor lingkungan seperti radiasi UV.

9.3.4 Enzim dalam Regulasi dan Kontrol Biokimia

Enzim juga berperan dalam mengontrol jalannya reaksi biokimia dalam tubuh. Beberapa enzim bekerja sebagai pengatur kecepatan reaksi melalui mekanisme umpan balik (feedback inhibition). Misalnya, enzim dalam jalur glikolisis akan dihambat jika kadar ATP dalam sel sudah cukup tinggi, sehingga menghindari produksi energi yang berlebihan.

9.3.5 Enzim dalam Aplikasi Medis dan Industri

Di luar tubuh manusia, enzim digunakan dalam berbagai aplikasi medis dan industri. Dalam dunia medis, enzim seperti streptokinase digunakan untuk melarutkan bekuan darah pada pasien dengan serangan jantung. Di bidang industri, enzim seperti protease digunakan dalam deterjen untuk menghilangkan noda protein, dan laktase digunakan dalam produk susu bebas laktosa bagi penderita intoleransi laktosa.

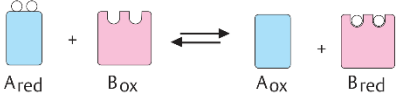
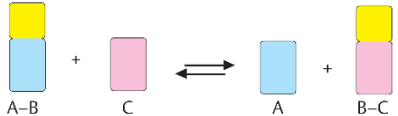
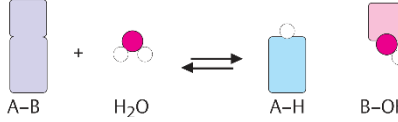
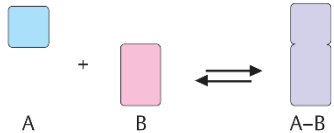
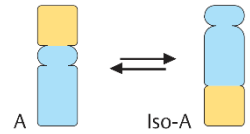
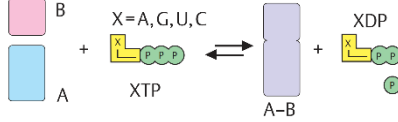
9.4 Klasifikasi Enzim

Enzim dibagi menjadi enam kelas utama (sesuai urutan) yaitu **oksidoreduktase, transferase, hidrolase, liase, isomerase, dan ligase**. Setiap kelas mewakili jenis reaksi umum yang dihasilkan oleh enzim-enzim dari kelas tersebut (**Tabel 9.3**) (Devlin, 1997; Koolman, Roehm and Wirth, 2005; Palmer and Bonner, 2007; Satyanarayana and Chakrapani, 2016).

9.4.1 Oksidoreduktase

Kelas Oksidoreduktase mengkatalisis transfer ekuivalen pereduksi dari satu sistem redoks ke sistem redoks lainnya yaitu mempercepat proses transfer atom Hidrogen (H), atau Oksigen (O) atau elektron dari satu substrat ke substrat lainnya, yang dikenal sebagai reaksi oksidasi-reduksi. Sebagai contoh, alkohol: NAD⁺ oksidoreduktase (alkohol dehidrogenase) mengkatalisis oksidasi alkohol menjadi aldehida. Enzim ini menghilangkan dua elektron dan dua atom hidrogen dari alkohol untuk menghasilkan aldehida, dan, dalam prosesnya, dua elektron yang awalnya berada dalam ikatan karbon-hidrogen alkohol dipindahkan ke NAD⁺, yang direduksi.

Tabel 9.3. Klasifikasi Internasional Enzim

Kelas	Jenis Reaksi	Sub-Kelas
1 Oksidoreduktase	<p>O = ekuivalensi reduksi</p>  <p>Ared + Box \rightleftharpoons Aox + Bred</p>	Dehidrogenase Oksidase, Peroksidase Reduktase Katalase Oksigenase Hidroksilase
2 Transferase	 <p>A-B + C \rightleftharpoons A + B-C</p>	C ₁ -Transferase Glikosiltransferase Aminotransferase Fosfotransferase
3 Hidrolase	 <p>A-B + H₂O \rightleftharpoons A-H + B-OH</p>	Esterase, Tiolase Glikosidase Peptidase Fosfatase, Amidase Fosfolipase Deaminase Ribonuklease
4 Liase	 <p>A + B \rightleftharpoons A-B</p>	Dekarboksilase Aldolase Hidratase Dehidratase Sintase Lyases
5 Isomerase	 <p>A \rightleftharpoons Iso-A</p>	Epimerase Cis-trans Isomerase Intramolekul transferase
6 Ligase	 <p>A + B + XTP \rightleftharpoons A-B + XDP</p> <p>X = A, G, U, C</p>	C-C-Ligase C-O-Ligase C-N-Ligase C-S-Ligase Sintetase Karboksilase

Sumber: Koolman *et al.*, 2005

Ada subkelas lain dari oksidoreduktase. **Oksidase** mentransfer dua elektron dari donor ke oksigen, yang biasanya menghasilkan pembentukan hidrogen peroksida (H₂O₂). Sebagai

contoh, glukosa oksidase mengkatalisis reaksi oksidasi glukosa. **Sitokrom oksidase** menghasilkan H_2O dan bukan H_2O_2 . **Oksigenase** mengkatalisis penggabungan oksigen ke dalam substrat. Dengan dioksigenase, kedua atom O_2 digabungkan dalam satu produk, sedangkan dengan monooksigenase, satu atom oksigen digabungkan sebagai gugus hidroksil, dan atom oksigen lainnya direduksi menjadi air oleh elektron dari substrat atau dari substrat kedua yang tidak beroksigen. Katekol oksigenase mengkatalisis reaksi dioksigenase; steroid hidroksilase mengilustrasikan reaksi monooksigenase (oksigenase fungsi campuran). Peroksidase menggunakan H_2O_2 daripada oksigen sebagai oksidan.

9.4.2 Transferase

Kelas Transferase mengkatalisis pemindahan gugus lain dari satu molekul ke molekul lainnya. Oksidoreduktase dan transferase umumnya membutuhkan koenzim. Enzim ini mentransfer gugus fungsional antara donor dan akseptor. Gugus amino, asil, fosfat, satu karbon, dan glikosil adalah gugus utama yang ditransfer. **Aminotransferase** (transaminase) memindahkan gugus amino dari satu asam amino ke akseptor asam aketo, menghasilkan pembentukan asam amino dan asam keto baru. **Kinase** adalah enzim fosforilasi yang mengkatalisis transfer gugus fosforil dari ATP atau nukleosida trifosfat lain ke akseptor gugus alkohol atau amino. Sebagai contoh, glukokinase mengkatalisis fosforilasi glukosa.

9.4.3 Hidrolase

Kelompok enzim ini dapat dianggap sebagai kelas khusus dari transferase di mana kelompok donor ditransfer ke air. Reaksi umum melibatkan pembelahan hidrolitik ikatan C-O, C-N, O-P, dan C-S. Pemecahan ikatan peptida adalah contoh yang baik untuk reaksi ini:

9.4.4 Liase

Lisase menambah atau mengurangi unsur air, amonia, atau karbon dioksida. Dekarboksilase menghilangkan unsur CO_2 dari asam α atau β keto atau asam amino. Enzim liase adalah kelompok enzim yang berfungsi untuk **memutus atau membentuk ikatan kimia tanpa menggunakan air atau ATP**. Berbeda dengan enzim

hidrolase yang memecah molekul dengan bantuan air, enzim liase bekerja dengan cara menghilangkan atau menambahkan gugus kimia tertentu, sering kali menghasilkan ikatan rangkap dalam produk akhirnya.

9.4.5 Isomerase

Kelompok enzim yang sangat heterogen ini mengkatalisis isomerisasi dari beberapa jenis. Ini termasuk interkonversi cis-trans dan aldosa-ketosa. Isomerase yang mengkatalisis inversi pada atom karbon asimetris adalah epimerase atau racemase. **Mutase** melibatkan transfer intramolekul suatu gugus seperti fosforil. Transfer ini mungkin bersifat langsung tetapi dapat melibatkan enzim terfosforilasi sebagai perantara. Fosfoglisarat mutase mengkatalisis konversi 2-fosfoglisarat menjadi 3-fosfoglisarat.

9.4.6 Ligase

Enzim ligase adalah kelompok enzim yang berperan dalam **menggabungkan dua molekul dengan membentuk ikatan kimia baru**, menggunakan energi dari hidrolisis ATP atau molekul berenergi tinggi lainnya. Ligase sering disebut sebagai **enzim pengikat** karena kemampuannya untuk menyatukan molekul yang lebih kecil menjadi satu kesatuan yang lebih besar. Karena meligasi berarti mengikat, enzim ini terlibat dalam reaksi sintesis di mana dua molekul bergabung dengan mengorbankan “ikatan fosfat berenergi tinggi” dari ATP. Istilah sintetase digunakan untuk kelompok enzim ini. Pembentukan aminoasil tRNA, asil koenzim A, dan glutamin serta penambahan CO₂ ke piruvat adalah reaksi yang dikatalisis oleh ligase. Piruvat karboksilase adalah contoh yang baik dari enzim ligase (Gambar 4.11). Substrat bikarbonat dan piruvat diikat untuk membentuk asam α -keto empat karbon (C₄).

DAFTAR PUSTAKA

- Devlin, T.M. (1997) *Textbook of biochemistry with biochemical correlations*, Wiley-Liss.
- Ferrier, D.R. (2017) *Biochemistry*. Seventh. Pennsylvania.
- Koolman, J., Roehm, K.-H. and Wirth, J. (2005) *Color Atlas of Biochemistry*. Second, 215 color plates. Second. New York: Thieme Stuttgart. Available at: <http://www.thieme.de>.
- Nelson, D.L. and Cox, M.M. (2017) *Lehninger Principles of Biochemistry*. 7th edn. New York.
- Palmer, T. and Bonner, P. (2007) *Enzymes: Biochemistry, Biotechnology and Clinical Chemistry*. 2nd edn. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Punekar, N.S. (2018) *ENZYMES: Catalysis, Kinetics and Mechanisms*. India: Springer. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-13-0785-0_22.
- Purich, D.L. (2010) *Enzyme Kinetics: Catalysis & Control, Enzyme Kinetics: Catalysis & Control*. Available at: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-61154-5>.
- Satyanarayana, U. and Chakrapani, U. (2016) *Biochemistry (4th edition)*, Elsevier.
- Sutrisno, A. (2017) *Teknologi Enzim*. 1st edn. Malang: UB Press. Available at: <https://books.google.co.id/books?id=WctTDwAAQBAJ&lpg=PP1&pg=PR4#v=onepage&q&f=false>.
- Wimpy, W. et al. (2025) *Biokimia Kedokteran*. 1st edn. Edited by O.A. Widyayanti. Purwokerto: Pena Persada Kerta Utama.

BAB 10

ASAM NUKLEAT, TRANSKRIPSI DAN TRANSLASI

Oleh Dessy Arisanty

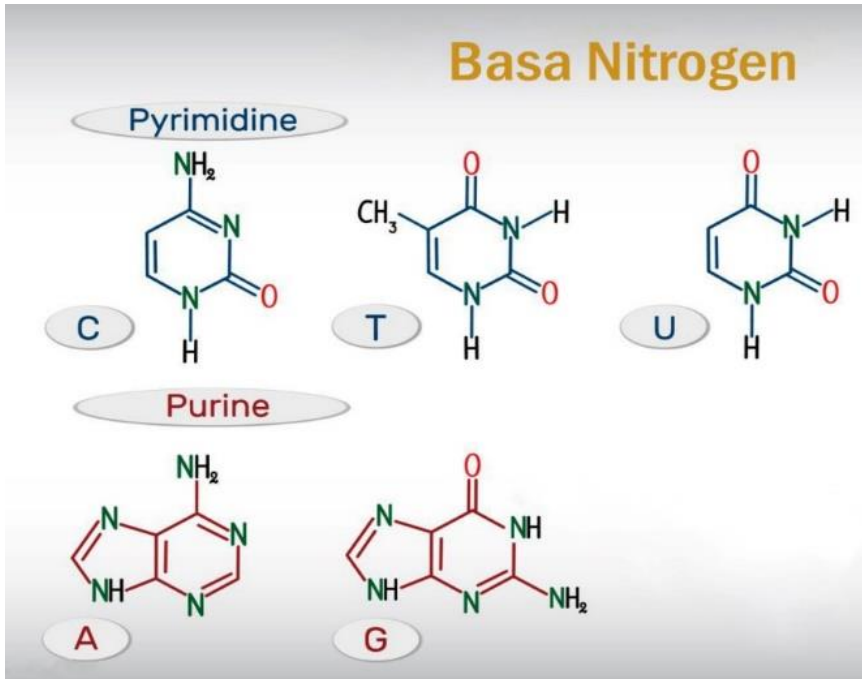
10.1 Pendahuluan

Genom manusia memiliki cetak biru yang diperlukan untuk pertumbuhan dan pemeliharaan manusia. Pada akhirnya, kita dapat memahami proses seluler dan molekuler manusia dalam kesehatan dan penyakit. Genom, yang merupakan pelengkap lengkap DNA organisme, mengandung semua informasi yang diperlukan untuk menentukan struktur setiap protein yang dapat diproduksi sel. Pengetahuan bahwa DNA bertanggung jawab atas semua aktivitas sel menyebabkan munculnya konsep keilmuan biologi molekuler.

Molekul dasar yang dibahas dalam biologi molekuler adalah asam nukleat yang secara luas sudah dikenal sebagai material genetik semua organisme termasuk virus. Asam nukleat adalah biomolekul besar yang sangat penting dalam semua sel dan virus, merupakan makromolekul yang terdiri dari monomer yang disebut nukleotida. Asam nukleat terdiri dari nukleotida, yang merupakan komponen monomer: gula 5-karbon, gugus fosfat, dan basa nitrogen. Dua kelas utama asam nukleat adalah asam deoksiribonukleat (DNA) dan asam ribonukleat (RNA). Jika gulanya adalah ribosa, polimernya adalah RNA; jika gulanya adalah deoksiribosa, varian dari ribosa, polimernya adalah DNA.

Asam nukleat, senyawa kimia alami yang berfungsi sebagai molekul pembawa informasi utama sel dan yang mengarahkan proses sintesis protein, sehingga menentukan karakteristik yang diwariskan setiap makhluk hidup. Molekul ini membawa informasi berupa mencetak biru untuk protein yang dibuat oleh sel dan membawa informasi genetik dan arahan untuk fungsi sel. Selain itu, asam nukleat berfungsi sebagai bahan keturunan dalam sel, karena sel yang bereproduksi meneruskan cetak biru tersebut kepada

keturunannya. Kemampuannya untuk diuraikan memungkinkan asam nukleat untuk menghasilkan asam fosfat, gula, dan campuran basa organik seperti pirimidin dan purin.



Gambar 10.1. Struktur basa nitrogen Purin dan Pirimidin (<https://www.istockphoto.com>)

Asam ribonukleat (RNA) dan asam deoksiribonukleat (DNA) adalah dua kelas utama asam nukleat. DNA adalah cetak biru utama kehidupan dan merupakan materi genetik dalam semua organisme yang hidup bebas dan sebagian besar virus. RNA juga ada di semua sel hidup, dan memainkan peran penting dalam beberapa proses, seperti pembuatan protein (Wilson dan Walker, 2010).

10.2 Metabolisme Asam Nukleat

Istilah "metabolisme asam nukleat" mengacu pada berbagai reaksi kimia yang mensintesis atau menghancurkan asam nukleat (DNA dan/atau RNA). Asam nukleat adalah polimer yang terdiri dari berbagai nukleotida, yang dikenal sebagai "biopolimer". Reaksi

kimia fosfat, gula pentosa, dan basa nitrogen biasanya terlibat dalam mekanisme anabolik yang dikenal sebagai sintesis nukleotida. Hal ini juga melibatkan modifikasi makromolekul ini dan mengeluarkannya. Sintesis nukleotida adalah mekanisme anabolik yang umumnya melibatkan reaksi kimia fosfat, gula pentosa, dan basa nitrogen. Degradasi asam nukleat adalah reaksi katabolik dan bagian nukleotida atau basa nukleat yang dihasilkan dapat diselamatkan untuk membuat nukleotida baru. Baik reaksi sintesis maupun degradasi memerlukan beberapa enzim untuk memfasilitasi peristiwa tersebut. Cacat atau kekurangan pada enzim-enzim ini dapat menyebabkan berbagai macam penyakit (Voet, et al., 2008).

10.2.1 Biosintesis asam nukleat

Nukleotida adalah monomer yang berpolimerisasi menjadi asam nukleat. Setiap nukleotida mengandung gula, fosfat, dan basa nitrogen, dan basa yang ditemukan dalam asam nukleat adalah purin atau pirimidin. Pada hewan multiseluler yang lebih kompleks, keduanya diproduksi sebagian besar di hati; namun, kedua kelompok disintesis dengan cara yang berbeda. Namun, fosforibosil pirofosfat (PRPP), yang menyumbangkan ribosa dan fosfat yang diperlukan untuk pembuatan nukleotida, diperlukan untuk setiap sintesis nukleotida.

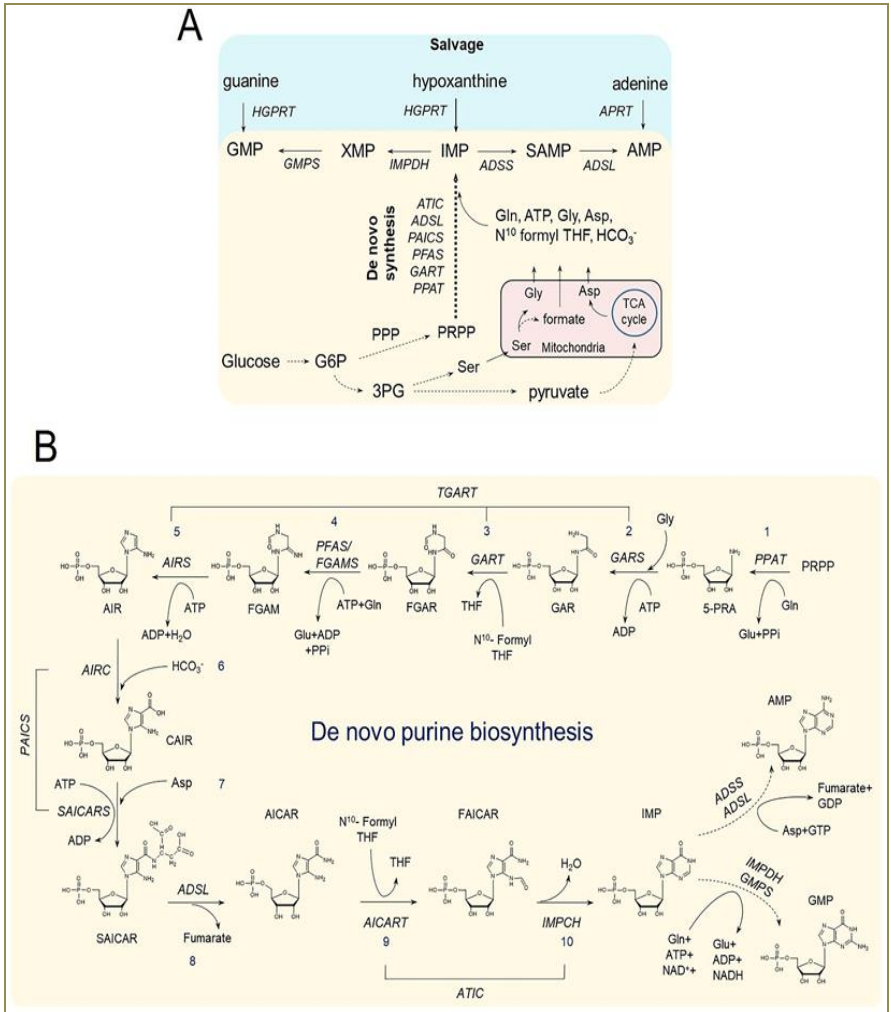
10.2.2 Biosintesis Purin

Baik adenin maupun guanin berasal dari nukleotida inosin monofosfat (IMP), senyawa pertama dalam jalur yang memiliki sistem cincin purin yang terbentuk sempurna. Purin disintesis secara biologis sebagai nukleotida, khususnya sebagai ribotida, yang merupakan basa yang melekat pada ribosa 5-fosfat. Untuk mengubah purin menjadi inosin monofosfat, atau IMP, PRPP memerlukan dua nukleotida purin, guanin dan glutamin. Untuk menghasilkan IMP, PRPP juga membutuhkan glutamin, glisin, aspartat, dan 6 ATP. Terdapat dua jalur dalam biosintesis purin yaitu:

1. Jalur *de novo*. Pada jalur ini, untuk biosintesis purin dilakukan dengan cara membangun purin dari awal, menggunakan asam

amino (aspartat, glisin, dan glutamin), CO₂, dan turunan folat (N¹⁰-formil-THF) , dan akan menghasilkan inosin monofosfat (IMP)

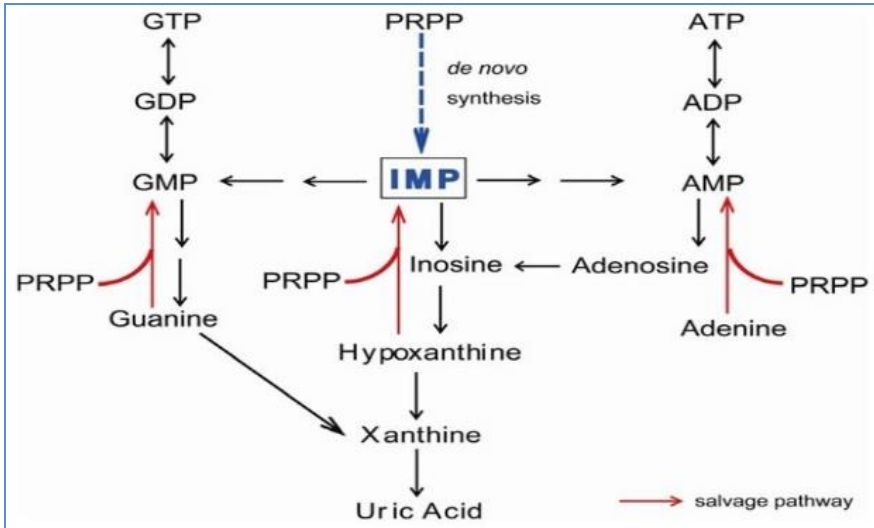
2. Jalur salvage. Sintesis jalur ini mendaur ulang basa yang ada
Pada manusia, sintesis de novo inosin 5'-monofosfat (IMP) dikatalisis oleh enam enzim yang secara berurutan menyusun basa purin menjadi fosforibosil pirofosfat (PRPP) dalam sepuluh langkah. Untuk mengkatalisis sepuluh reaksi berurutan yang mengubah PRPP menjadi IMP, enam enzim harus bekerja sama untuk mengkatalisis DNPB manusia. Banyak dari enzim-enzim ini memiliki banyak fungsi, seperti TGART bersifat trifungsional, PAICS dan ATIC bersifat bifungsional, sementara PPAT, FGAMS, dan ADSL mengkatalisis DNPB satu langkah. Reaksi-reaksi ini memerlukan penggunaan banyak substrat dan kofaktor yang dihasilkan dari proses metabolisme lainnya (Pareek et al., 2021)



Gambar 10.2. Biosintesis purin dari dua jalur, A. Jalur salvage : Purin dapat diregenerasi dengan mengambil kembali basa hipoksantin, guanin, dan adenin; atau itu dapat disintesis secara de novo dari PRPP dengan menggunakan substrat blok pembangun yang dibuat dari proses metabolisme lainnya, B. Jalur de novo: Skema menunjukkan langkah demi langkah konversi PRPP ke AMP dan GMP yang merupakan jalur DNPB. (Pareek et al., 2021)

10.2.3 Degradasi Purin

Degradasi purin adalah proses penguraian nukleotida purin menjadi asam urat. Proses ini terjadi secara terus-menerus dalam tubuh manusia.



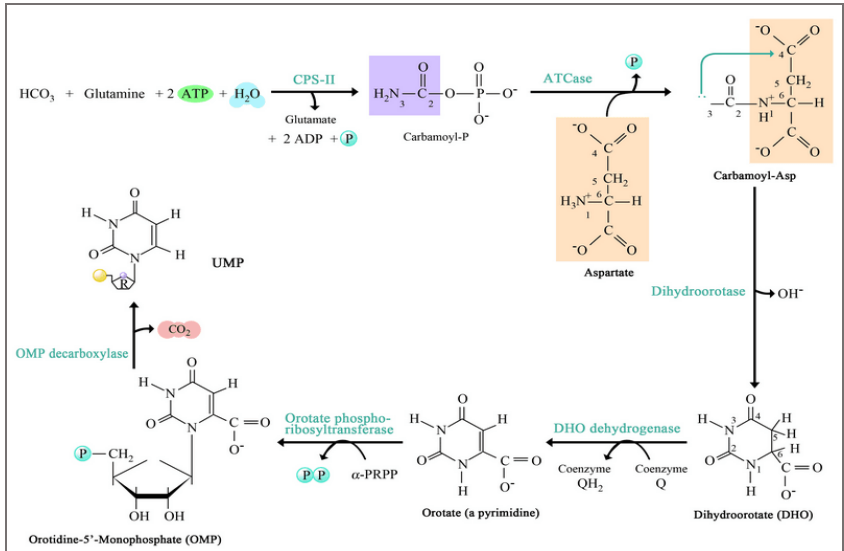
Gambar 10.3. Degradasi Purin (Ichida et al., 2012)

Tahapan degradasi purin

1. Purin yang tidak terpakai atau berlebihan diubah menjadi asam urat.
2. Proses ini melibatkan enzim xantin oksidase.
3. Asam urat terbentuk terutama di hati.
4. Asam urat dikeluarkan oleh ginjal ke dalam urine.

10.2.4 Biosynthesis Pirimidin

Pembentukan nukleotida pirimidin dari molekul prekursor dasar dalam sel dikenal sebagai biosintesis pirimidin. Proses ini sangat penting untuk sintesis DNA dan RNA, terutama saat sel membelah dan tumbuh.



Gambar 10.4. Biosintesis pirimidin

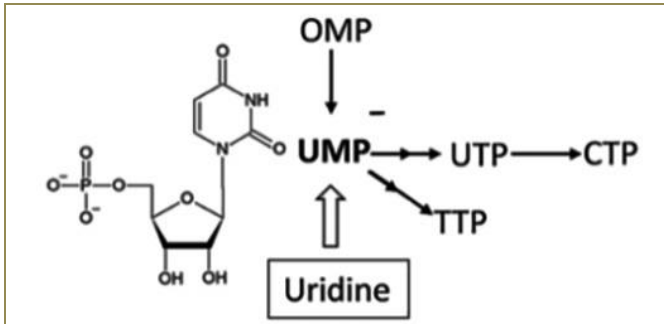
Sintesis pirimidin de novo: Jalur ini dimulai dari karbon dioksida, glutamin, dan adenosin trifosfat (ATP) untuk menghasilkan karbamoil fosfat (CAP).

Dalam Pirimidin, ada tiga molekul Nukleotida: UTP, CTP, dan TTP. Langkah-langkah berikut ini dapat menjelaskan jalur sintesis pirimidin Denovo.

1. Sintesis Karbamoil Fosfat
2. Sintesis Karbamoil Aspartat
3. Penutupan Cincin untuk membentuk dihidroorotat
4. Oksidasi Dihidro Orotat
5. Penambahan gugus ribosa Fosfat
6. Dekarboksilasi untuk membentuk UMP

Sintesis UTP membentuk UMP melalui mekanisme pertukaran fosfat. Reaksi ini dikatalisis oleh nukleosida monofosfat kinase dan Nukleosida difosfat Kinase.

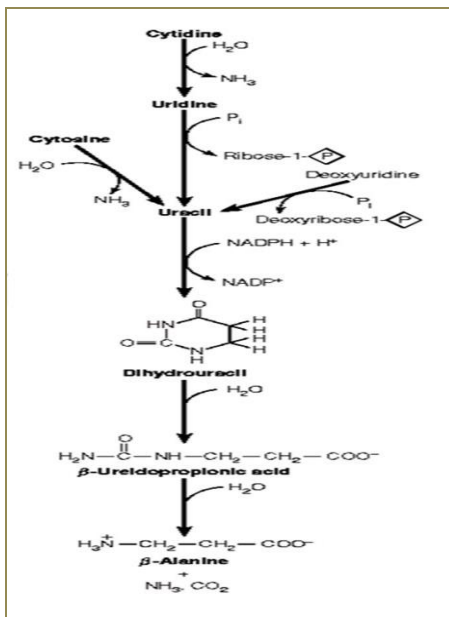
(Zang et al., 2020)



Gambar 10.5. Sintesis UMP menjadi UTP -- CTP dan TTP (Zang et al., 2020)

10.2.5 Degradasi Pirimidin

Pemecahan pirimidin adalah proses biokimia penting yang memecah nukleotida pirimidin, yaitu sitosin, urasil, dan timin, menjadi metabolit yang lebih sederhana dan tidak beracun yang dapat digunakan atau diekskresikan dari tubuh. Proses ini berbeda dengan pemecahan purin, yang menghasilkan asam urat, yang dapat menyebabkan kondisi patologis seperti asam urat jika terakumulasi terlalu banyak.



Gambar 10.6. Degradasi Pirimidin

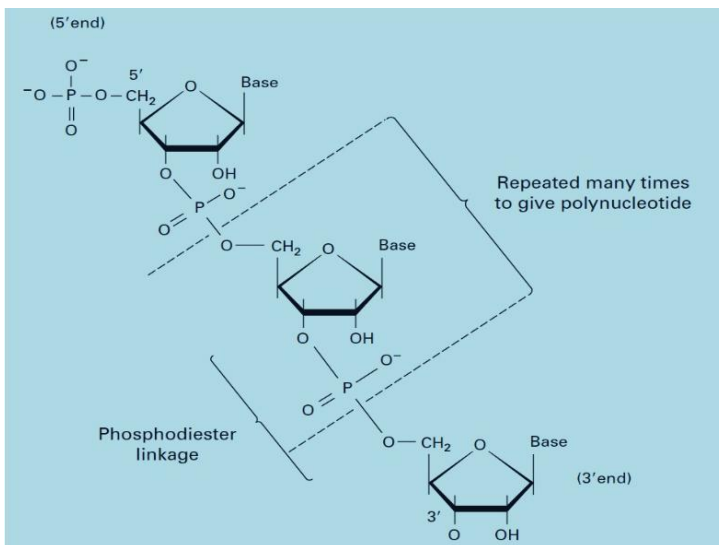
Hati adalah tempat yang paling sering mengalami degradasi pirimidin. Di sana, nukleotida pirimidin secara bertahap dipecahkan menjadi bagian yang lebih kecil oleh enzim tertentu. Barang terakhir ini dapat dibuang dengan aman dari tubuh atau digunakan kembali untuk jalur metabolisme lain.

10.3 Struktur Asam Nukleat

10.3.1 Struktur Primer

DNA dan RNA adalah struktur makromolekul yang terdiri dari polimer berulang yang terbentuk dari nukleotida. Ini adalah blok bangunan dasar asam nukleat dan berasal dari nukleosida yang terdiri dari dua elemen: gula segi lima atau gula karbon pentosa (2-deoksiribosa dalam DNA dan ribosa dalam RNA), dan basa nitrogen.

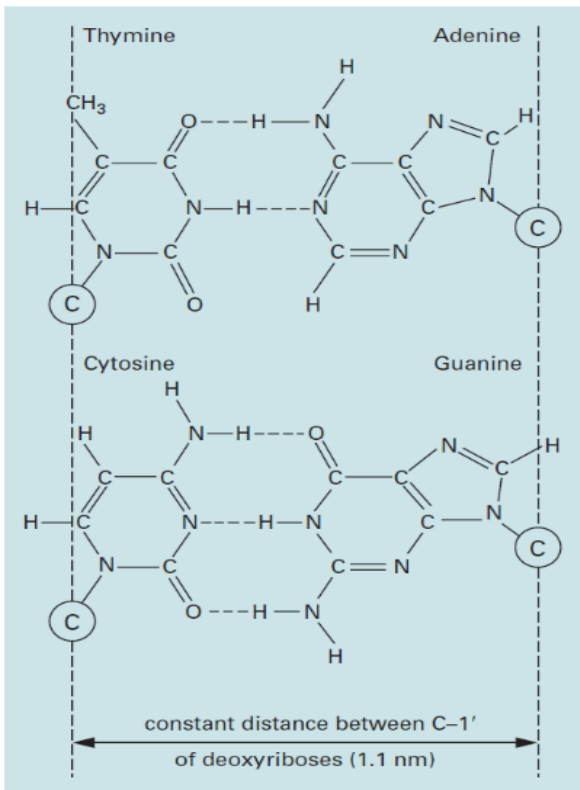
Nukleotida, atau nukleosida fosfat, dibentuk oleh ikatan fosfodiester dengan reaksi antara posfat dari suatu nukleotida dengan gugus 3- OH pada nukleotida lainnya. Sehingga menghasilkan ikatan 5' – 3' fosfodiester antara dua nukleotida yang berdekatan; proses ini dapat diulang tanpa batas waktu untuk menghasilkan molekul polinukleotida yang panjang (Gambar 10.7).



Gambar 10.7. Pembentukan polinukleotida dari mononukleotida melalui ikatan fosfodiester (Wilson dan Walker, 2010)

10.3.2 Struktur sekunder asam nukleat

Dua rantai polinukleotida dalam DNA biasanya ditemukan dalam bentuk heliks ganda *right-handed*, dengan tulang punggung gula-fosfat di luar tengah molekul basa-basa dari dua untai. Struktur untai ganda ini sangat penting karena bergantung pada urutan basa di satu untai yang saling melengkapi. Setiap kali basa pirimidin terikat pada residu gula pada satu untai, basa purin terikat secara hidrogen pada residu gula pada untai lainnya. Selain itu, adenin (A) selalu berpasangan dengan timin (T) atau urasil (U) dalam RNA dengan dua ikatan hidrogen, dan guanin (G) selalu berpasangan dengan sitosin (C) dengan tiga ikatan hidrogen.



Gambar 10.3. Pasangan basa dalam DNA. C dalam lingkaran melambangkan karbon pada posisi 1' deoksiribosa. (Wilson dan Walker, 2010)

Variasi dalam bentuk DNA molekul dapat disebabkan oleh urutan basa, yang sangat penting untuk interaksi khusus antara DNA dan berbagai protein. DNA memiliki struktur tiga dimensi yang berbeda pada in vivo, mereka biasanya menggunakan heliks ganda yang disebut bentuk B atau B-DNA. Bentuk DNA tangan kanan lain, seperti A dan C, terbentuk ketika serat DNA mengalami kelembapan yang berbeda. Hal ini membuat DNA memiliki beberapa variasi struktur yang dilihat dari berapa buah basa nitrogen disetiap lekukan lipatannya, sebagaimana table dibawah ini.

Tabel 10.1. Variasi bentuk DNA

DNA form	% humidity	Helix direction	Base/turn helix	Helix diameter (A)
B	92%	RH	10	19
A	75%	RH	11	23
C	66%	RH	9.3	19
Z	(Pu-Py) _n	LH	12	18

RH, *right-handed helix*; LH, *left-handed helix*; Pu, Purine; Py, Pyrimidine. Beberapa bentuk DNA dapat diperoleh dengan menempatkan serat DNA pada berbagai jenis kelembapan. Bentuk DNA yang paling umum adalah bentuk B, dan bentuk A dan C telah diturunkan dalam kondisi laboratorium. Bentuk Z dapat dibuat dengan urutan DNA yang terdiri dari purin dan pirimidin bergantian dengan nukleotida (Wilson dan Walker, 2010)

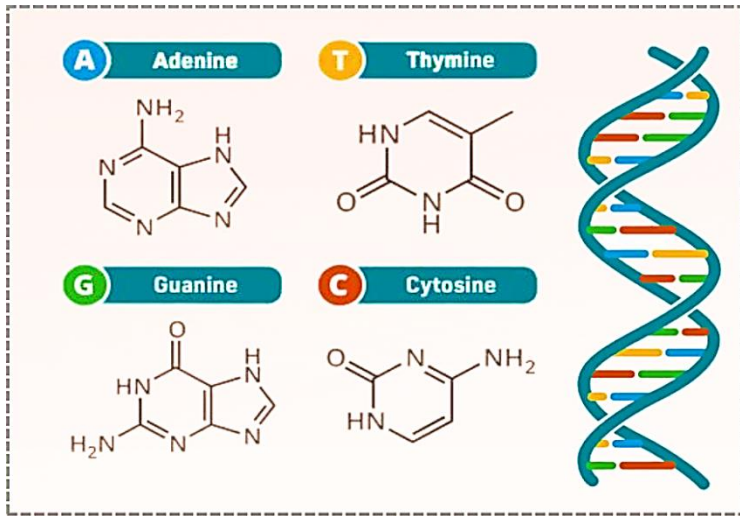
10.4 Material Genetik

Bahan genetik organisme disebut material genetik. Bahan genetik organisme disebut material genetik. Genetika adalah bidang yang mempelajari bagaimana gen secara umum dan secara khusus memberikan sifat-sifat kepada generasi berikutnya. Fokus genetika saat ini adalah zat kimia yang membentuk gen, Deoxyribonucleic Acid, atau DNA, dan Ribonucleic Acid atau RNA. Demikian juga perlu dipahami bagaimana zat tersebut memengaruhi reaksi kimia yang membentuk proses kehidupan di dalam sel. (Winchester, 2024).

10.4.1 Fungsi dan Struktur DNA

Informasi genetik yang membentuk perkembangan dan fungsi suatu organisme disimpan dalam molekul *Deoxyribonucleic Acid* (DNA). Setiap untai molekul DNA terdiri dari rantai molekul gula deoksiribosa yang terikat pada gugus fosfat dan basa nitrogen. DNA terdiri dari dua untai yang saling terkait yang melilit satu sama lain hingga membentuk bentuk heliks ganda. Basa yang membentuk urutan DNA adalah Adenin (A), timin (T), sitosin (C), dan Guanin (G), yang dihubungkan oleh ikatan kovalen antara fosfat dari satu nukleotida dan gula dari nukleotida berikutnya. Struktur ini membentuk tulang punggung gula-fosfat yang menjadi lokasi pelekatan basa-basa nitrogen.

Ikatan hidrogen mengaitkan antara basa-basa yang mengikat satu untai ke untai lainnya. Ikatan ini unik, sehingga Adenin hanya berikatan dengan Timin dan Sitosin hanya berikatan dengan Guanin. Konfigurasi molekul sangat stabil, yang memungkinkannya berfungsi sebagai cetakan untuk replikasi molekul DNA baru dan transkripsi molekul RNA terkait. Gen adalah bagian DNA yang mengatur pembentukan protein tertentu dalam sel. (Bates, 2024; Britannica, 2024e). Struktur DNA khas memungkinkan penyimpanan dan transmisi data genetik dari satu generasi ke generasi berikutnya. Secara khusus, urutan nukleotida yang dibentuk oleh empat basa nitrogen dalam molekul DNA memungkinkan penyimpanan data yang sangat besar dalam ruang yang sangat kecil. (Ghannam et al., 2023).



Gambar 10.4. Ilustrasi Struktur DNA
<https://onehealthlab.net/blog/dna>

Informasi genetik disimpan dalam DNA dalam bentuk cetak biru, atau blueprint, yang dapat disalin dan diperbanyak saat sel membelah, sehingga DNA yang sama dibawa ke dalam sel-sel baru. Inilah sebabnya sifat dan karakteristik seseorang berasal dari orang tua mereka dan akan diturunkan ke anak cucu mereka. Berikut rangkuman keunikan DNA yang sudah diketahui.

1. DNA adalah materi genetik kita dan membawa semua instruksi dari generasi ke generasi.
2. DNA yang terkandung dalam satu sel akan panjangnya lebih dari dua meter jika kita mengumpulkannya dan merentangkannya!
3. DNA dipadatkan, dikemas, dan dilipat berulang kali agar dapat masuk ke dalam sel. Pada akhirnya, ia dimasukkan ke dalam ruang kira-kira 6/1 juta meter.
4. DNA adalah dasar dari semua gen, tetapi tidak semua DNA adalah gen; kurang dari 2% DNA kita adalah gen. Gen tersebar di seluruh DNA kita, dengan berton-ton DNA "non-gen" di antaranya.

5. DNA terdiri dari “huruf”, yang direpresentasikan sebagai A, T, G dan C. Huruf-huruf ini adalah kependekan dari senyawa kimia yang dikandungnya.
6. Pada setiap sel terdapat 3 miliar huruf DNA didalamnya.
7. Gen bagaikan kata-kata dalam alfabet DNA. Gen selalu dimulai dengan kumpulan 3 huruf (ATG) yang sama. Begitulah cara para ilmuwan mengetahui bahwa itu adalah sebuah gen, dan gen tersebut secara harfiah dapat dibaca oleh instrumen yang dikenal sebagai pengurut DNA.
8. Kita mempunyai sekitar 25.000 gen, dan gen ini dapat ditemukan di setiap sel.
9. Tidak semua gen akan digunakan oleh setiap sel karena beberapa di antaranya sangat khusus untuk organ (seperti otak, atau jantung). Epigenetika secara dinamis mengontrol gen mana yang aktif dan mana yang tidak aktif.
10. DNA manusia terbagi menjadi 23 pasang unit terpisah (total 46). Ini dikenal sebagai kromosom. Masing-masing dari 23 pasangan kromosom cocok dan mempunyai set gen yang sama, sehingga kita mempunyai dua salinan dari setiap gen.
(Luftig dan Richey, 2000)

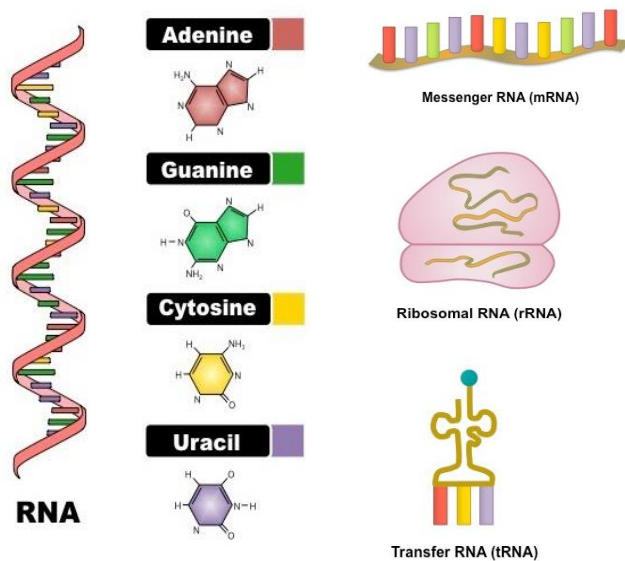
10.4.2 Fungsi dan struktur RNA

Nukleotida, atau gula ribosa yang terikat pada basa nitrogen dan gugus fosfat, membentuk ribonucleic acid (RNA). Basa nitrogen seperti adenin (A), urasil (U), guanin (G), dan sitosin (C) adalah beberapa contoh basa nitrogen. Meskipun virus RNA tertentu memiliki untai ganda, sebagian besar RNA adalah untai tunggal. Struktur dan panjang molekul RNA dapat berbeda. Molekul RNA tertentu juga mengatur ekspresi gen dan mungkin bertindak sebagai pengobatan untuk penyakit manusia. (Wang & Farhana, 2023) (Wan & Chatterjee, 2024; Wang & Farhana, 2023).

Fungsi utama RNA adalah untuk membentuk protein. RNA membentuk protein selama tahapan translasi. RNA membawa informasi genetik yang diterjemahkan oleh ribosom menjadi berbagai protein yang diperlukan untuk proses seluler. Tiga jenis RNA utama yang terlibat dalam sintesis protein adalah *messenger RNA* (mRNA), *transfer RNA* (tRNA), dan *ribosomal RNA* (rRNA).

Fungsi regulasi gen, penyuntingan RNA, dan interferensi RNA juga dilakukan oleh sekelompok kecil regulator RNA, termasuk *microRNA* (miRNA), *small nuclear RNA* (snRNA), dan *small interferensi RNA*. (Wan & Chatterjee, 2024; Wang & Farhana, 2023).

RNA secara spontan akan disintesis dari DNA, digunakan, didegradasi, dan didaur ulang kembali ketika diperlukan. Gugus hidroksil pada RNA membuatnya tidak stabil dan rentan terhadap basa sehingga RNA tidak dapat bertahan lama.



Gambar 10.5. Ilustrasi Struktur RNA.

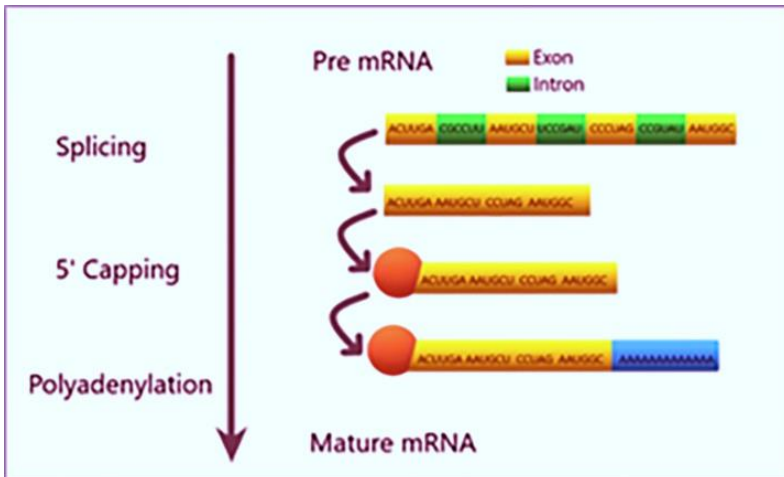
Ada tiga jenis utama RNA: messenger RNA (mRNA), ribosomal RNA (rRNA), dan transfer RNA (tRNA) yang terlibat dalam jalur utama sintesis protein. RNA tersebut adalah sebagai berikut

1. mRNA

mRNA ditranskripsi dari DNA dan mengandung cetak biru genetik untuk membuat protein. mRNA prokariotik tidak perlu diproses dan dapat langsung memulai sintesis protein. Hal ini berbeda dengan mRNA eukaryotik. Pre-mRNA, yang baru

ditranskripsikan pada eukariota, perlu mengalami pematangan sebelum membentuk mRNA. Pre-mRNA mengandung daerah coding dan non-coding yang disebut intron dan ekson, dan intron dihilangkan dari mRNA selama pemrosesan pre-mRNA.

Intron adalah bagian gen yang tidak mengkode protein. mRNA yang terbentuk setelah pemrosesan hanya terdiri dari ekson, yaitu bagian yang mengkode protein. Dalam transkrip RNA, cap 5' yang disebut 7-methylguanosine ditambahkan ke ujung 5', dan ujung 3' dipoliadenilasi. Ekor (*tail*) poli (A), urutan nukleotida adenin, ditambahkan ke transkrip. Proses ini dikenal sebagai poliadenilasi. Tutup 5' melindungi mRNA dari degradasi dan memungkinkan ribosom untuk mengikat mRNA pada lokasi yang tepat. Ekor poli (A) 3' meningkatkan stabilitas mRNA, menandai ujung untai mRNA, dan membantu mengangkut mRNA dari nukleus ke sitoplasma. (Wan & Chatterjee, 2024).



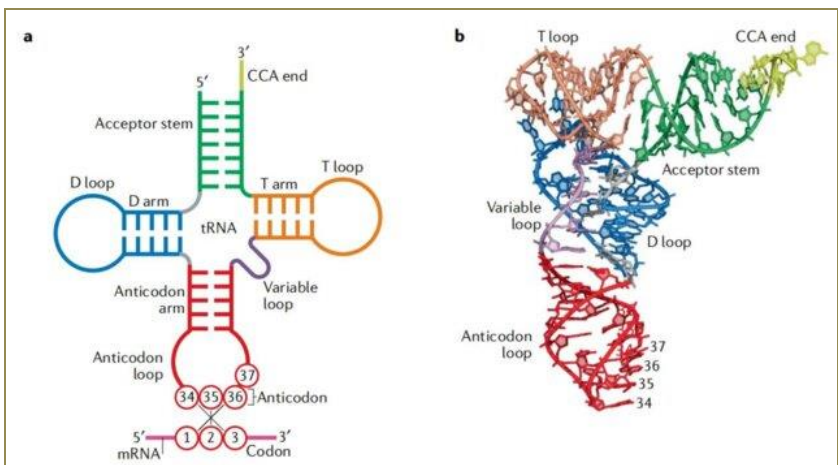
Gambar 10.6. Tahapan pra-mRNA sebelum meninggalkan nukleus.

Sumber: (<https://creativecommons.org>)

2. tRNA

RNA Transfer adalah molekul RNA yang bertanggung jawab untuk mengubah mRNA menjadi protein. Situs akseptor 3',

terminal fosfat 5', lengan D, lengan T, dan lengan antikodon adalah bagian dari struktur tRNA. Fungsi utamanya adalah mengangkut asam amino ke situs akseptor 3' dan membawanya ke kompleks ribosom dengan bantuan enzim aminoasil-tRNA sintetase. Enzim ini memuat asam amino ke tRNA bebas untuk mensintesis protein. RNA Transfer atau tRNA memiliki bentuk yang paling kecil jika dibandingkan dengan mRNA dan rRNA. TRNA membaca asam amino yang dibutuhkan dengan melekat pada mRNA dan kemudian mengirimkannya ke ribosom.



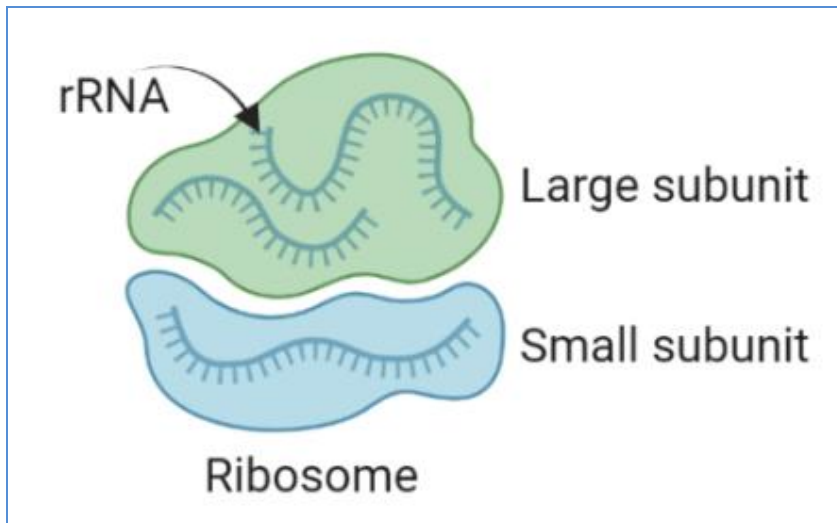
Gambar 10.7. Ilustrasi Struktur RNA transfer. a. Struktur dasar tRNA, b. Struktur daun clover dari tRNA (Ding et al., 2022)

Setelah asam amino terikat pada tRNA, tRNA dianggap sebagai aminoasil-tRNA. Jenis asam amino pada tRNA bergantung pada kodon mRNA, yang merupakan urutan tiga nukleotida yang mengkode asam amino. Lengan antikodon tRNA adalah situs antikodon yang komplementer terhadap kodon mRNA dan menentukan asam amino mana yang akan dibawa (Wan & Chatterjee, 2024; Wang & Farhana, 2023).

10.4.3 rRNA

rRNA membentuk ribosom yang penting dalam sintesis protein. Ribosom mengandung subunit ribosom besar dan kecil. Pada prokariota, subunit ribosom 30S kecil dan 50S besar

membentuk ribosom 70S. pada eukariota, subunit 40S dan 60S membentuk ribosom 80S. ribosom mengandung situs keluar E, peptidil (P), dan akseptor (A) untuk mengikat aminoasil-tRNA dan menghubungkan asam amino bersama-sama untuk membentuk polipeptida (Wan & Chatterjee, 2024; Wang & Farhana, 2023).



Gambar 10.8. Ilustrasi struktur rRNA dalam ribosom.

10.5 Ekspresi Gen

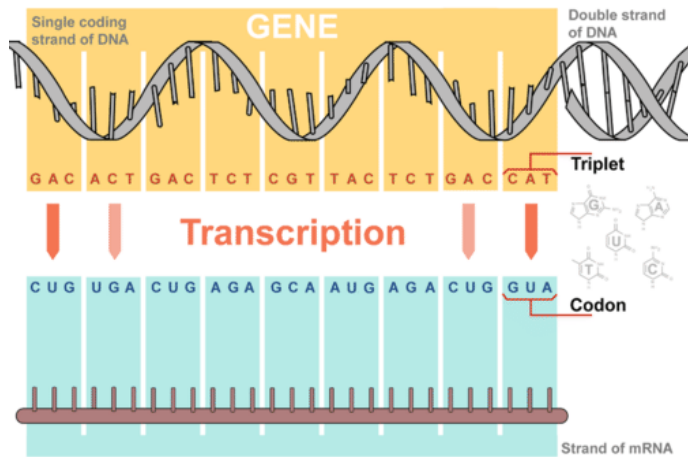
Lima tahun setelah penemuan DNA, Francis Crick menemukan ujung proses ekspresi gen adalah sintesis protein. Crick menyebut penemuan ini sebagai Dogma Sentral Biologi. Dogma sentral biologi molekuler merupakan teori yang menyatakan bahwa informasi genetik hanya mengalir dalam satu arah, dari DNA, ke RNA, ke protein, atau RNA langsung ke protein. Aliran informasi dari gen ke polipeptida melibatkan beberapa langkah (Ostrander, 2024; Taktak & Kock, 2023).

Aliran genetic ini menggambarkan proses dari ekspresi gen. Proses ini diregulasi agar ekspresi gen benar proses nya.. Promotor dan komponen pengatur lainnya, serta protein tertentu yang disebut sebagai faktor transkripsi, berperan dalam memulai transkripsi gen. Proses ekspresi gen melibatkan proses transkripsi dan translasi.

10.6 Transkripsi

Dogma sentra biologi molekuler adalah transkripsi. Proses ini melibatkan membuat salinan RNA dari urutan DNA pada gen yang disebut mRNA. Untai mRNA membawa informasi genetik yang dikodekan oleh DNA. Transkripsi adalah proses di mana segmen DNA digunakan untuk menghasilkan templat RNA. Segmen DNA “dibaca” oleh enzim yang disebut RNA polimerase, yang menghasilkan untai RNA yang melengkapi DNA. Dalam untai RNA komplementer ini, semua basa timin digantikan oleh urasil.

Transkripsi adalah proses pembuatan salinan RNA dari untai DNA. Ini dilakukan oleh polimerase RNA, yang menambahkan satu ribonukleotida sekaligus ke untai RNA yang sedang berkembang sesuai dengan hukum komplementaritas basa nukleotida. RNA ini saling melengkapi dengan untai DNA template 3' → 5', kecuali untuk pengganti timin (T) dalam RNA oleh urasil (U) dan kemungkinan kesalahan (Brueckner et al., 2009).



Gambar 10.9. Ilustrasi proses transkripsi
(<https://courses.lumenlearning.com/>)

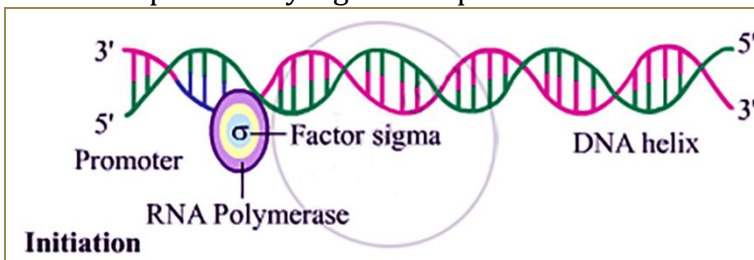
Dalam transkripsi, ada tiga langkah dasar yaitu **inisiasi**, **ekstensi**, dan **terminasi** yang terjadi pada eukariota dan prokariota. Meskipun proses transkripsi secara umum sangat mirip

pada prokariota dan eukariota, ada juga beberapa perbedaan yang signifikan.

Step 1 : Initiation

Inisiasi adalah awal dari transkripsi. Ini terjadi ketika enzim RNA polimerase mengikat area gen yang disebut promotor. Ini menunjukkan bahwa DNA telah melepaskan diri, memungkinkan enzim untuk "membaca" basa-basa di salah satu untai DNA. Sekarang enzim siap untuk membuat untaian mRNA yang memiliki urutan basa yang saling melengkapi.

Untuk memulai proses transkripsi, RNA polimerase pertama-tama harus mengidentifikasi gen yang akan ditranskripsi, untai dsDNA yang benar yang harus disalin, dan berikatan dengan urutan tertentu pada DNA yang disebut promotor.



Gambar 10.10. Inisiasi pada Proses Transkripsi
(<https://www.shaalaa.com>)

Pada proses ini, RNA polimerase mengikat urutan promotor di dekat awal gen. Kemudian DNA akan terlepas sehingga RNA polimerase dapat membaca basa. Untaian DNA dibaca oleh RNA polimerase dalam arah 3'-5' dan transkrip RNA-nya disintesis dalam arah 5'-3'. Daerah promotor dikenal sebagai *TATA box* karena adanya frekuensi tinggi adenin dan timin. Pada prokariota, urutan konsensus kotak TATA adalah TATAAT. Urutan konsensus serupa TATA (A/T) A terdapat pada eukariota (Arayachi et al., 2014)

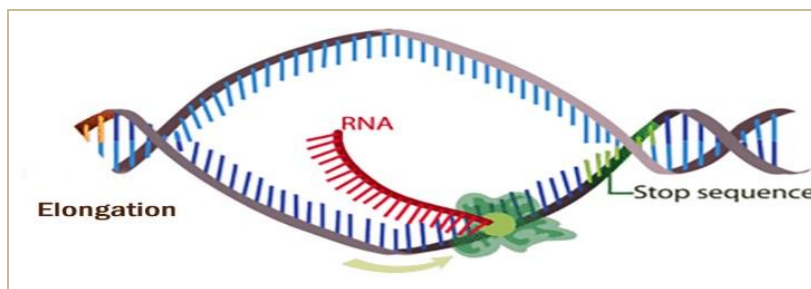
Step 2 : Elongasi

Elongasi adalah penambahan nukleotida pada untai mRNA. RNA polimerase membaca untai DNA yang tidak terputus dan membangun molekul mRNA, dengan menggunakan pasangan basa

yang saling melengkapi. Selama proses ini, adenin (A) dalam DNA berikatan dengan urasil (U) dalam RNA. Enzim RNA polimerase mensintesis untai RNA di sepanjang rantai DNA, sedangkan enzim yang bekerja membuka bagian depan DNA untai ganda, menciptakan struktur heliks setelah reaksi.

Tahapan elongasi

1. RNA polimerase lolos dari promotor dan memasuki fase pemanjangan
2. RNA polimerase membaca untai DNA dan membangun molekul RNA.
3. Nukleosida trifosfat (NTP) ditambahkan ke untai RNA yang sedang tumbuh
4. RNA polimerase mempertahankan gelembung transkripsi, memisahkan untaian DNA
5. Untai RNA yang baru lahir membentuk hibrida DNA-RNA pendek dengan untai templat
6. RNA polimerase bergerak di sepanjang untai templat, mensintesis RNA dalam arah 5' ke 3'
7. Polimerase RNA menambahkan nukleotida baru ke untai RNA, membuatnya lebih panjang.(Mercadante, et al., 2023)



Gambar 10.11. Elongasi pada Proses Transkripsi
(<https://bio.libretexts.org>)

Step 3 : Terminasi

Terminasi adalah akhir dari transkripsi, dan terjadi ketika RNA polimerase melintasi urutan penghentian (terminasi) dalam gen. Terminasi terjadi ketika faktor terminasi (protein Rho)

mengubah spesifisitas RNA polimerase untuk mengakhiri transkripsi. Untaian mRNA selesai, dan terlepas dari DNA.

Pada prokariota:

1. Terminasi yang bergantung pada Rho melibatkan pengikatan protein Rho ke RNA yang baru lahir dan menyebabkan disosiasi
2. Penghentian independen Rho terjadi pada sekuens tertentu yang membentuk struktur batang-lingkar, menyebabkan polimerase RNA terhenti dan terdisosiasi
3. Pada Eukaryota :
4. Pemutusan dikombinasikan dengan poliadenilasi ujung 3' dari RNA.
5. Faktor spesifisitas pembelahan dan poliadenilasi (CPSF) dan faktor stimulasi pembelahan (CstF) membelah dan mengidentifikasi sekuens tertentu.
6. Polimerase poli (A) menambahkan ekor poli (A) ke ujung 3' dari RNA yang dibelah. (Neve et al., 2017)

10.7 Translasi

Translasi adalah proses lanjutan dari transkripsi, di mana kode genetik dalam mRNA diterjemahkan untuk membuat protein. Tahapan ini lebih kompleks dari transkripsi. mRNA bergerak keluar dari nukleus ke ribosom, yang terdiri dari rRNA dan protein. Ribosom membaca kodon mRNA, dan molekul tRNA membawa asam amino ke ribosom dalam urutan yang benar. Inisiasi, elongasi, dan terminasi adalah tiga tahap dari proses translasi (Ganguly, 2024b; Hoerter & Ellis, 2023; Miller, 2020a).

Translasi adalah informasi genetik yang disalin ke dalam RNA dengan transkripsi diubah menjadi protein atau rantai polipeptida. Dengan kata lain, ini adalah ekspresi informasi genetik dalam bentuk molekul protein. Tiga komponen penting dari sintesis protein adalah RNA pembawa (mRNA), RNA transfer (tRNA), dan ribosom. Messenger RNA terakhir membawa informasi yang diperlukan untuk mengkode protein. Setiap tiga pasangan basa pada mRNA berhubungan dengan tempat pengikatan untuk transfer RNA (tRNA) yang membawa asam amino. Asam amino kemudian dihubungkan bersama dalam sebuah rantai oleh ribosom untuk

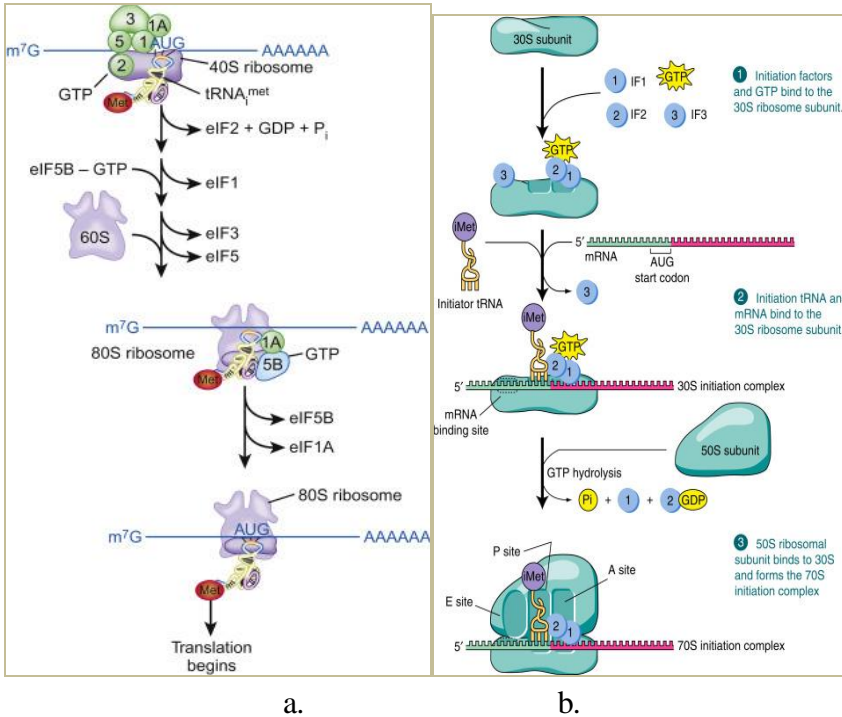
membuat rantai protein yang belum sempurna (Pelit et al., 2014 : Alen and Frank, 2007). Translasi juga dibagi tiga tahapan :

1. Inisiasi
2. Elongasi
3. Terminasi

Step 1 : Inisiasi

Pada tahap inisiasi, melalui pori nucleus mRNA meninggalkan nukleus dan masuk ke dalam sitoplasma. Di sitoplasma, mRNA yang memiliki tutup metilasi dan kodon awal akan mengikat subunit kecil dan besar ribosom. Selanjutnya, tRNA dengan antikodon yang sesuai dengan kodon awal pada mRNA akan bergabung dengan kompleks tersebut. Kelompok molekul yang terdiri dari mRNA, ribosom, dan tRNA ini dikenal sebagai kompleks inisiasi (Hoerter & Ellis, 2023; Miller, 2020a).

Tahap awal terdiri dari tiga langkah dasar. Pertama, mRNA terikat pada subunit kecil ribosom. Kedua, dengan menghubungkan tRNA inisiator ke mRNA, terjadi pencocokan kodon-antikodon. Pada tahap ketiga, ditambahkan ke kompleks inisiasi dengan subunit besar ribosom dan hasil sintesis protein. Pada prokariot, untuk inisiasi translasi membutuhkan faktor protein IF1, IF2, dan IF3 (faktor inisiasi). Pada eukariota, jumlah faktor protein lebih dari 12 (eIF1, eIF1A, eIF2, eIF2B, eIF3, eIF4A, eIF4E, eIF4G, eIF5, eIF5B) dan beberapa di antaranya memainkan peran regulasi yang penting (Hinnebusch dan Lorsch, 2012)



Gambar 10.12. Proses inisiasi pada translasi , A. pada eukaryor, B. Pada Prokaryot (Dowling dan Sonenberg, 2010 dalam <https://www.sciencedirect.com>)

Tahapan dalam inisiasi pada translasi secara umum adalah sebagai berikut :

1. Subunit kecil ribosom berikatan dengan ujung 5' dari mRNA
2. Subunit kecil membaca nukleotida mRNA dalam kelompok tiga, yang disebut kodon
3. Subunit kecil menemukan kodon awal, yang selalu berupa AUG
4. Subunit kecil merekrut subunit ribosom besar dan RNA transfer (tRNA)
5. Subunit besar bergabung, menyelesaikan struktur ribosom
6. Faktor-faktor inisiasi dilepaskan

Sub unit ribosomal yang terlibat berbeda antara prokaryot dan eukaryote. Pada prokaryot, sub unit ribosomal adalah 70S, 50S

dan 30S. Sedangkan pada eukaryote sub unit ribosomal 40S, 60S dan 80S. (Dowling dan Sonenberg, 2010)

Step 2 : Elongasi

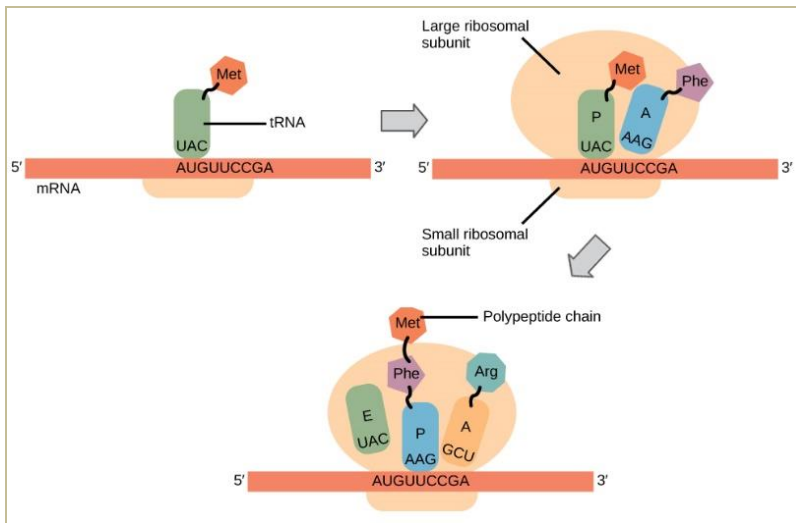
Pemanjangan translasi adalah tahap sintesis protein di mana asam amino ditambahkan ke rantai polipeptida yang sedang tumbuh. Ini adalah proses multistep yang melibatkan penguraian kode, pembentukan ikatan peptida, dan translasi. Selama pemanjangan translasi, templat mRNA memberikan kekhususan. Ketika ribosom bergerak di sepanjang mRNA, setiap kodon mRNA masuk ke dalam daftar, dan pengikatan spesifik dengan antikodon tRNA bermuatan yang sesuai dipastikan. Jika mRNA tidak ada dalam kompleks pemanjangan, ribosom akan mengikat tRNA secara tidak spesifik. Steps of translation elongation. Berikut tahapan umum pada elongasi translasi.

1. Penguraian kode: Ribosom membaca kodon mRNA satu per satu.
2. Pembentukan ikatan peptida: Asam amino yang cocok dengan setiap kodon ditambahkan ke rantai protein yang sedang tumbuh.
3. Translokasi: Ribosom bergerak di sepanjang mRNA, memperlihatkan kodon baru untuk dibaca

Elongasi berlangsung dengan tRNA bermuatan memasuki situs A dan kemudian bergeser ke situs P diikuti oleh situs E dengan setiap "langkah" kodon tunggal ribosom. Langkah-langkah ribosom diinduksi oleh perubahan konformasi yang memajukan ribosom sebanyak tiga basa ke arah 3'. Ikatan peptida terbentuk antara gugus amino dari asam amino yang melekat pada tRNA situs A dan gugus karboksil dari asam amino yang melekat pada tRNA situs P. Pembentukan setiap ikatan peptida dikatalisis oleh peptidil transferase, enzim berbasis RNA yang diintegrasikan ke dalam subunit ribosom 50S.

Pada prokaryot, pada subunit ribosom 50S dari *E. coli* terdiri dari tiga kompartemen: situs A (*aminoasil*) mengikat tRNA aminoasil bermuatan yang masuk. Situs P (*peptidil*) mengikat tRNA bermuatan yang membawa asam amino yang telah membentuk ikatan peptida dengan rantai polipeptida yang sedang tumbuh tetapi

belum terlepas dari tRNA yang sesuai. Situs E (*exit*) melepaskan tRNA yang terdisosiasi sehingga dapat diisi ulang dengan asam amino bebas. Hal ini menciptakan kompleks inisiasi dengan situs A bebas yang siap menerima tRNA yang sesuai dengan kodon pertama setelah AUG.



Gambar 10.13. Elongasi pada Translasi
(<https://bio.libretexts.org/>)

Saat bergerak melalui ribosom, tRNA terus memberikan asam amino ke rantai polipeptida yang sedang terbentuk pasangan basa komplementer antara kodon pada tRNA dan antikodon pada mRNA selama proses elongasi. Setelah transfer selesai, ribosom memindahkan satu kodon ke bawah mRNA, memungkinkan tRNA baru dengan asam amino yang sesuai masuk. Rantai polipeptida lengkap terbentuk setelah siklus ini berulang (Miller, 2020a).

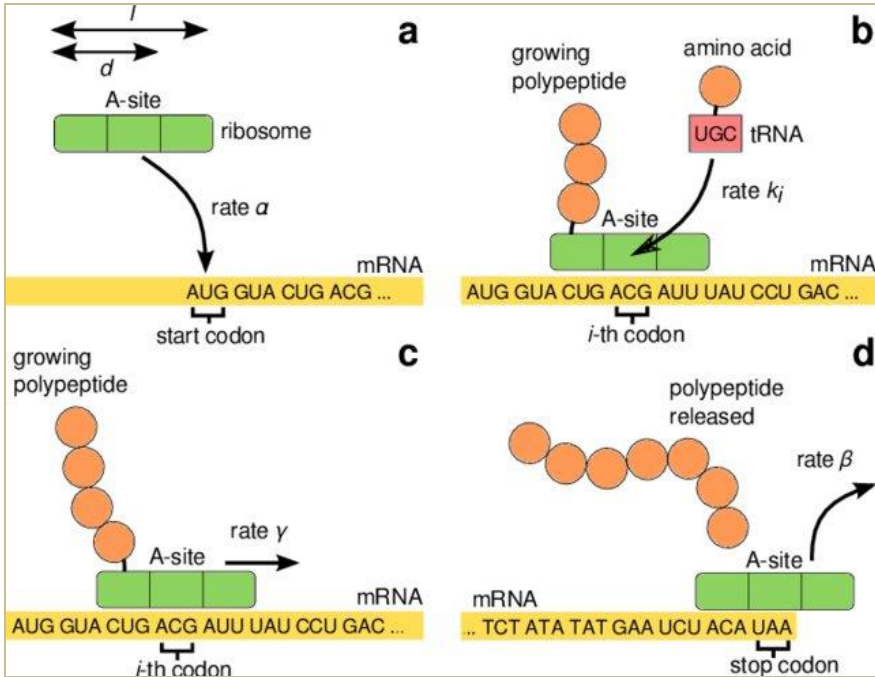
Step Terminasi

Terminasi penerjemahan terjadi ketika kodon penghenti, atau kodon tidak masuk akal (UAA, UAG, atau UGA) ditemukan. Setelah sejajar dengan situs A, kodon penghenti ini dikenali oleh faktor pelepas pada prokariota dan eukariota yang

menginstruksikan peptidil transferase untuk menambahkan molekul air ke ujung karboksil asam amino situs-P.

Langkah pelepasan polipeptida yang telah selesai ini mencakup reaksi yang diperlukan. Pengikatan aminoacyl-tRNA di ribosom, pembentukan ikatan peptida, dan siklus translasi berlanjut hingga kedatangan salah satu dari tiga kodon terminasi (UAA, UAG, atau UGA) ke situs A. Karena tidak ada tRNA komplementer dari kodon terminasi. Ketika dihadapkan dengan kodon terminasi, tidak ada tRNA yang berikatan dengan situs A ribosom. Sebaliknya, protein yang disebut *Release Factor* (RF) sesuai dengan kodon terminasi dan menghentikan terjemahan (Pelit et al., 2014).

Release Factor (RF) dibagi menjadi dua kelas yaitu RF Kelas 1 dan RF Kelas 2. Pada prokariota, terdapat dua jenis RF Kelas 1: RF1 dan RF2. Pada sel eukariotik, RF Kelas 1 adalah eRF1. Pada prokariota dan eukariota hanya terdapat satu faktor Kelas II: RF3 dan eRF3. Pada prokariota, terdapat tiga faktor pelepas secara total (RF1, RF2 dan RF3). Faktor pelepas 1 bertanggung jawab untuk pengenalan kodon terminasi UAA dan UAG.



Gambar 10.14 . Sketsa proses translasi mRNA yang melibatkan (a) inisiasi, (b) elongasi yang terdiri dari pengiriman tRNA, (c) translokasi , (d) diikuti oleh terminasi (Sketsa proses translasi mRNA yang melibatkan inisiasi (a), elongasi yang terdiri dari pengiriman tRNA (b) dan translokasi (c), diikuti oleh terminasi (d)).(Szavits-Josan et al., 2018)

Berikut adalah langkah-langkah proses terminasi dalam translasi:

1. Stop Kodon (UAA, UAG, atau UGA) memasuki ribosom
2. Protein Release Factor merecognisi stop cdon dalam urutan mRNA
3. Release factor memerintahkan *peptidyl transferase* agar molekul H_2O ditambahkan ke ujung karboksil asam amino P-site
4. Asam amino P-site melepaskan diri dari tRNA-nya
5. Protein baru yang terbentuk dilepaskan
6. Subunit ribosom kecil dan besar melepaskan diri dari mRNA dan dari satu sama lain
7. Terjadi pembentukan polypeptide yang berdifusi keluar dari ribosom dan mengapung bebas dalam sitoplasma

Untuk menjadi protein fungsional, polypeptide dapat mengalami perubahan pasca-translasi, seperti lipatan menjadi tiga dimensi. (Miller, 2020a).

10.8 Penutup

Bab ini telah menjelaskan berbagai hal terkait dengan asam nukleat, mulai dari segi truktur, fungsinya hingga metabolisme dari asam nukleat tersebut. Asam nukleat adalah biomolekul yang penting untuk semua sel dan virus dan berfungsi untuk menyimpan, mentransmisikan, dan mengekspresikan informasi genetik. Asam nukleat mengatur sintesis protein, mengkodekan gen, mengontrol genetik, dan membawa kode pewarisan sifat.

Pembahasan mengenai asam nukleat akan memberikan insigh ilmu bagi para pendidik peneliti dan masyarakat. Proses yang dialami oleh asam nuklaet tersebut juga menjadi pembahasan pada bab ini.

Transkripsi dan translasi merupakan mekanisme bagaimana aliran genetic dari suatu makhluk hidup. Dimulai dar DNA-RNA dan Protein. Dalam setiap tahapan nya juga terdiri dari tahapan mekanisme tersendiri pula. Transkripsi merupakan proses penterjemahan kode dari DNA, kemudian translasi merupakan proses pemasangan kode yang sudah diterjemahkan tadi dengan kode asam amnio yang sesuai.

Proses diatas melibatkan molekul kompleks. Tidak saja enzim, juga protein seperti unit ribosomal. RNA polymerase dan juga releasing factor, disamping susunan RNA itu sendiri. Keterlibatan kompleks ini akan menyempurnkan proses pembedakan peptide dan berujung ke polipeptida.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, S. G., Frank, J., Structural insights on the translation initiation complex: ghosts of a universalinitiation complex, *Molecular Microbiology*, 63(4), 941–950, 2007 (PDF) *Transcription and translation*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/325827703_Transcription_and_translation#fullTextFileContent [accessed Mar 21 2025].
- Bates, S. A. (2024, July 26). *Deoxyribonucleic Acid (DNA)*. National Human Genome Research Institute. <https://www.genome.gov/genetics-glossary/Deoxyribonucleic-Acid>
- Britannica. (2024a, July 13). *Genotype | Phenotype, Heredity, Genetics*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/genotype>
- Ding, Y., Gao, B., dan Huang, J. 2022. Mitochondrial Cardiomyopathy: The Roles of mt-tRNA Mutations. *Journal of Clinical Medicine*. 11, 6431. MDPI. <https://doi.org/10.3390/jcm11216431>
- Dowling, R.J dan Sonenberg, N. 2010. Handbook of Signalling: Chapter 281 Signaling Pathways that Mediate Translational Control of Ribosome Recruitment to mRNA. Edisi ke dua. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374145-5.00281-3>.
- Ganguly, P. (2024a, July 27). *Transcription*. National Human Genome Institute. <https://www.genome.gov/genetics-glossary/Transcription>
- Ghannam, J. Y., Wang, J., & Jan, A. (2023). Biochemistry, DNA Structure. *StatPearls*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538241/>
- Hoerter, J. E., & Ellis, S. R. (2023). Biochemistry, Protein Synthesis. *StatPearls*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK545161/>
- Ichida, K., Amaya, Y., Okamoto, K., dan Nishino, T. 2012. Mutations Associated with Functional Disorder of Xanthine Oxidoreductase and Hereditary Xanthinuria in Humans. *Int Journal Molecular Science*. 13, 15475-15495. SSN 1422-

0067. www.mdpi.com/journal/ijms. DOI
10.3390/ijms131115475
- Liu X, Bushnell DA, Kornberg RD. RNA polymerase II transcription: structure and mechanism. *Biochim Biophys Acta*. 2013 Jan;1829(1):2-8. [PMC free article] [PubMed]
- Luftig, M. A. and Richey S. 2000. DNA and Forensic Science. *New England Law Review*. Vol. 35:3
- Mercadante, A.A., Dimri, M., Mohiudin, S.S. 2023 Update : Biochemistry, Replication and Transcription. Bookshelf. National Library of Medicine. StatPearls Publishing
- Neve J, Patel R, Wang Z, Louey A, Furger AM (July 2017). "Cleavage and polyadenylation: Ending the message expands gene regulation". *RNA Biology*. 14 (7): 865–890. doi:10.1080/15476286.2017.1306171. PMC 5546720
- Miller, C. (2020a). *Protein Synthesis*. Thompson Rivers University.
- Miller, C. (2020b). *Mutations*. Thompson Rivers University.
- Pareek, V., Pedley, A.M., dan Benkovic, S.J. 2022. Human de novo Purine Biosynthesis. *Crit Rev Biochem Mol Biol*. Nov 12;56(1):1–16. doi: 10.1080/10409238.2020.1832438 in PMC.
- Pelit, P., Acar, T., Karahan, M. 2014. Transcription and translation. Dalam buku : \square : Applications of Molecular Genetics in Personalized Medicine. Publisher: OMICS International eBooks. Wiley Publishing.
- Szavits-Josan, J., Clandrini, L., dan Romano, M.C. 2018. Deciphering mRNA Sequence Determinants of Protein Production Rate. *Physical Review Letters*. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.128101. Research Gate.
- Wan, Y., & Chatterjee, K. (2024, July 24). *RNA / Definition, Structure, Types, & Functions*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/RNA>
- Wang, D., & Farhana, A. (2023). Biochemistry, RNA Structure. *StatPearls*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK558999/>
- Voet, Donald; Voet, Judith; Pratt, Charlotte (2008). *Fundamentals of the biochemistry : life at the molecular level (3rd ed.)*. Hoboken, NJ: Wiley. ISBN 9780470129302.

- Winchester, A. (2024, July 17). *Genetics - DNA, Heredity, Variation*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/genetics/Methods-in-genetics>
- Wilson, K dan Walker, J. 2010. *Principle and Technique of Biochemistry and Molecular Biology*. Edisi 7. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-51635-8.
- Zang, Q., Jiang, B., DU, Z., Chasin, L. 2020. A doubly auxotrophic CHO-K1 cell line for the production of recombinant monoclonal antibodies. *Biotechnology and Bioengineering*, 117, (8) DOI: 10.1002/bit.27367

BAB 11

SIKLUS ATP DAN BIOENERGETIKA SEL

Oleh Nurul Febriani Putri

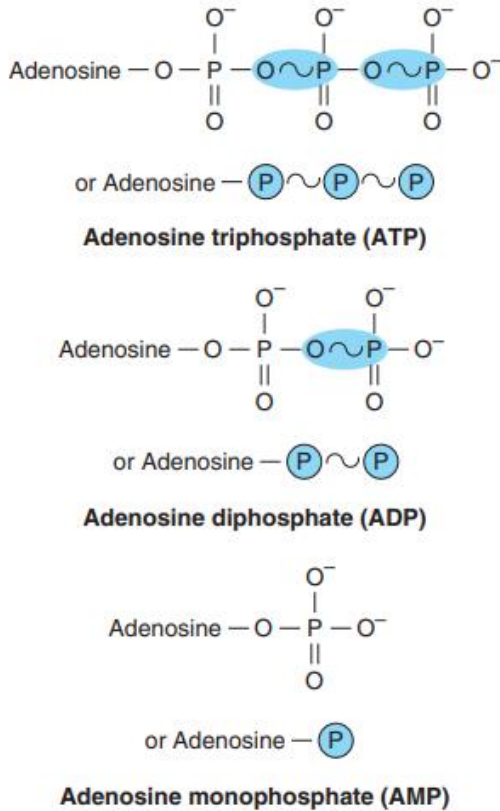
11.1 Siklus ATP

Semua biomolekul membawa energi dalam bentuk ikatan kimianya. Namun, daripada menggunakan energi ini secara langsung, sel memecah glukosa dan biomolekul lainnya dengan cara yang terkendali, untuk menghasilkan adenosin trifosfat (ATP). Proses ini dikenal sebagai respirasi seluler, dimana energi yang disimpan dalam glukosa dilepaskan melalui serangkaian reaksi kimia yang terkoordinasi dengan baik. ATP kemudian berperan sebagai pembawa energi utama dalam sel, karena strukturnya yang memungkinkan energi yang tersimpan di dalamnya mudah diakses dan digunakan untuk berbagai proses seluler yang membutuhkan energi, seperti sintesis protein, kontraksi otot, dan transportasi zat-zat melalui membran sel. Selain itu, ATP juga dapat dengan cepat dihasilkan kembali melalui proses fosforilasi oksidatif, sehingga menjadi sumber energi yang efisien bagi sel dalam menjalankan fungsinya (Wang et al., 2017).

11.1.1 Konsep Dasar ATP

Adenosin Trifosfat (ATP) merupakan molekul penyimpan energi yang sangat efisien yang digunakan sebagai "mata uang" dalam proses biokimia sel. Struktur ATP terdiri dari gugus fosfat yang terhubung melalui ikatan fosfodiester, yang mengandung energi tinggi karena muatan elektronegatif yang mendorong gaya tolak-menolak di antara gugus fosfat. Dalam ikatan fosfat-fosfat ini, energi yang signifikan disimpan. Melalui proses metabolisme, ATP mengalami hidrolisis menjadi adenosin difosfat (ADP) atau bahkan lebih lanjut menjadi adenosin monofosfat (AMP), melepaskan gugus fosfat anorganik yang bebas dan energi yang tersimpan dalam

ikatan fosfat dilepaskan untuk digunakan dalam proses biologis selanjutnya (Meurer et al. 2017).



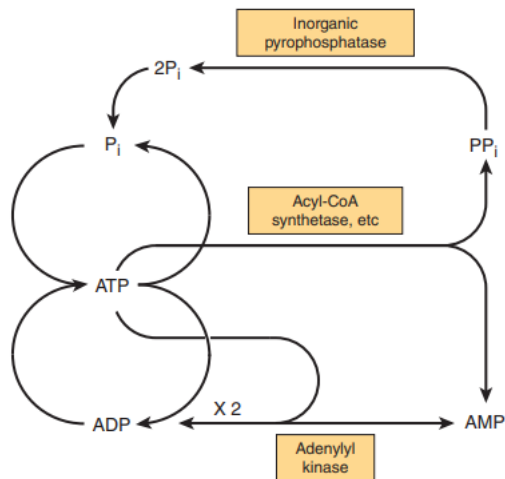
Gambar 11.1. Struktur Adenosin Trifosfat, Adenosin Difosfat, dan Adenosin monofosfat (Sumber : Rodwell et al., 2015)

ATP adalah molekul kecil dan relatif sederhana, tetapi mengandung potensi energi yang dapat segera dimanfaatkan untuk melakukan kerja sel. ATP pada dasarnya adalah nukleotida RNA dengan dua gugus fosfat tambahan. Adenosin terdiri dari basa nitrogen adenin dan gula lima karbon, ribosa. Adenosin terikat pada tiga gugus fosfat. Ikatan yang menghubungkan fosfat adalah ikatan berenergi tinggi yang, ketika putus, melepaskan energi yang cukup untuk menggerakkan berbagai reaksi dan proses seluler. Ikatan ini

disebut "berenergi tinggi" karena produk pemutusan ikatan tersebut yakni adenosin difosfat (ADP) dan satu gugus fosfat anorganik (Pi) yang memiliki energi bebas yang jauh lebih rendah daripada reaktan : ATP dan molekul air. Karena reaksi ini berlangsung dengan menggunakan molekul air, maka reaksi ini merupakan reaksi hidrolisis. Dengan kata lain, ATP terhidrolisis menjadi ADP dalam reaksi berikut :



Seperti kebanyakan reaksi kimia lainnya, hidrolisis ATP menjadi ADP bersifat reversibel (dapat balik). Reaksi sebaliknya membentuk ATP dari ADP dan Pi. Karena hidrolisis ATP melepaskan energi, pembentukan ATP tentunya membutuhkan energi (Dunn and Grider, 2023) :



Gambar 11.2. Siklus fosfat dan pertukaran adenin nukleotida (Sumber : Rodwell et al., 2015)

Adenosin trifosfat (ATP) merupakan molekul yang sangat tidak stabil. Jika tidak digunakan dengan cepat untuk melakukan suatu reaksi, ATP akan terdisosiasi secara spontan menjadi

adenosin difosfat (ADP) dan fosfat (Pi), serta energi bebas yang dilepaskan selama reaksi tersebut akan hilang dalam bentuk panas. Kemudian bagaimana energi yang dilepaskan dari hidrolisis ATP tersebut digunakan untuk melakukan pekerjaan di dalam sel. Proses ini dipengaruhi penggabungan energi, dimana sel memanfaatkan reaksi eksergonik dari hidrolisis ATP untuk melakukan berbagai jenis reaksi atau proses yang diperlukan, seperti pensinyalan seluler, sintesis DNA dan RNA, pensinyalan purinergik, pensinyalan sinaptik, transpor aktif, dan kontraksi otot (Zimmermann, 2016; Dunn and Grider, 2023).

11.1.2 Sintesis ATP

Sebagian besar sintesis ATP terjadi dalam respirasi seluler dalam matriks mitokondria. Reaksi ini menghasilkan sekitar tiga puluh dua molekul ATP per molekul glukosa yang dioksidasi. ATP merupakan sumber utama energi dalam sel dan dikonsumsi untuk berbagai proses vital. Salah satu fungsi ATP adalah untuk transportasi ion di dalam sel, yang penting untuk menjaga keseimbangan ion yang diperlukan dalam berbagai proses seluler. Selain itu, ATP juga digunakan untuk kontraksi otot, dimana energi yang dihasilkan dari pemecahan ATP digunakan dalam pergerakan otot. ATP juga diperlukan untuk penyebaran impuls saraf, yang merupakan proses vital dalam transmisi sinyal di dalam sistem saraf. ATP juga terlibat dalam fosforilasi substrat, dimana fosfat ditransfer dari ATP ke substrat lain untuk mengaktifkannya. Reaksi ini penting dalam pengaturan berbagai jalur metabolisme di dalam sel makhluk hidup, seperti jalur metabolisme pembentukan filum bakteri. Selain itu, ATP juga digunakan dalam proses sintesis kimia di dalam sel, dimana energi yang dihasilkan dari pemecahan ATP digunakan untuk menggerakkan reaksi kimia yang diperlukan untuk sintesis molekul-molekul penting (Putri et al., 2018; Dunn and Grider, 2023).

Pembawa ADP/ATP mitokondria, yang dikenal sebagai translokase ADP/ATP, merupakan protein integral yang berperan penting dalam proses pengangkutan ADP dan ATP di dalam mitokondria. Fungsi utama translokase ADP/ATP adalah untuk mengimpor ADP ke dalam matriks mitokondria, dimana ADP akan

mengalami konversi menjadi ATP melalui aktivitas enzim ATP sintase. Proses ini penting karena ATP merupakan sumber utama energi kimia dalam sel yang diperlukan untuk berbagai proses metabolisme. Selain mengimpor ADP, translokase Adp/Atp juga bertanggung jawab untuk mengeksport ATP yang baru disintesis ke sitosol, bagian dari sel di luar mitokondria. ATP yang dihasilkan di dalam mitokondria akan digunakan sebagai bahan bakar untuk proses metabolisme yang membutuhkan energi sel (Ruprecht and Kunji, 2019).

Terdapat berbagai proses yang terlibat dalam produksi ATP dalam tubuh manusia. Salah satunya adalah melalui respirasi sel, dimana oksigen digunakan untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP. Proses ini terjadi di mitokondria dan merupakan salah satu cara utama bagi tubuh untuk mendapatkan energi yang diperlukan untuk berbagai aktivitas metabolik. Selain itu, beta-oksidasi juga merupakan salah satu proses penting yang terlibat dalam produksi ATP. Proses ini melibatkan pemecahan asam lemak menjadi molekul-molekul yang kemudian digunakan untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP. Ketosis juga dapat memainkan peran dalam produksi ATP, dimana tubuh menggunakan lemak sebagai sumber energi daripada karbohidrat. Proses ini dapat terjadi saat tubuh mengalami kekurangan karbohidrat, misalnya saat seseorang menjalani diet rendah karbohidrat. Selain itu, katabolisme protein juga dapat menghasilkan ATP, dimana protein dipecah menjadi asam amino yang kemudian digunakan untuk menghasilkan energi. Proses-proses ini dapat terjadi baik dalam kondisi aerobik maupun anaerobik, tergantung pada ketersediaan oksigen dan kebutuhan energi tubuh pada saat tersebut (Dunn and Grider, 2023).

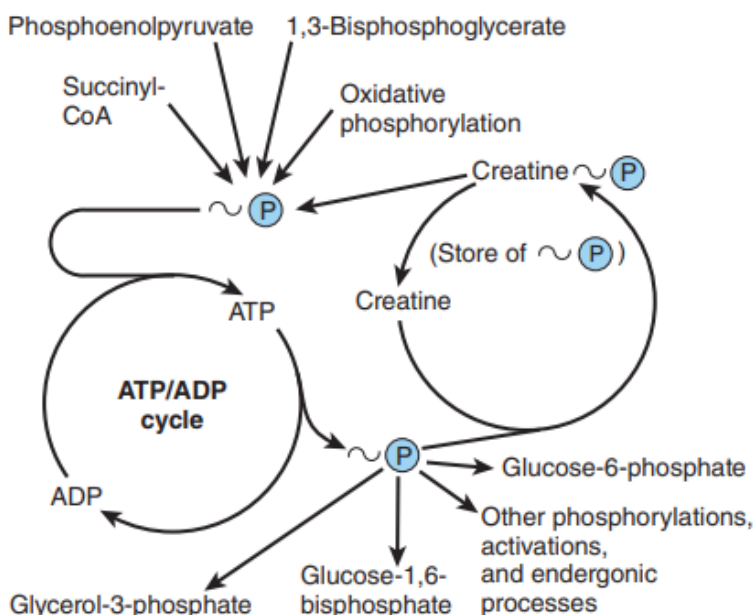
Respirasi seluler merupakan salah satu proses penting dalam metabolisme sel yang terjadi di mitokondria. Proses ini dimulai dengan katabolisme glukosa menjadi asetil-KoA, yang kemudian menghasilkan pembawa elektron berenergi tinggi yang akan dioksidasi selama fosforilasi oksidatif. Selama proses glikolisis, yang merupakan langkah pertama dalam respirasi seluler, satu molekul glukosa dipecah menjadi dua molekul piruvat. Selanjutnya, piruvat akan diubah menjadi asetil-KoA melalui lintasan asam piruvat.

Setelah terbentuknya asetil-KoA, proses respirasi seluler akan berlanjut dengan siklus asam sitrat dan rantai transpor elektron. Pada siklus asam sitrat, asetil-KoA dioksidasi menjadi CO₂ dan menghasilkan energi dalam bentuk NADH dan FADH₂. Selanjutnya, NADH dan FADH₂ akan digunakan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan ATP melalui fosforilasi oksidatif (Dunn and Grider, 2023).

Terdapat tiga sumber utama fosfat yang berperan dalam konservasi energi atau penangkapan energi. Pertama, Proses fosforilasi oksidatif merupakan tahap akhir dari metabolisme energi dalam tubuh yang melibatkan penggunaan oksigen. Dalam proses ini, energi dari elektron yang melewati rantai pernapasan digunakan untuk memompa proton melintasi membran mitokondria, menciptakan gradien elektrokimia yang kemudian digunakan untuk menghasilkan ATP. Selain itu, proses ini juga sangat dipengaruhi oleh kerja enzim-enzim yang terlibat dalam rantai pernapasan, yang bertanggung jawab untuk mentransfer elektron dan menghasilkan energi yang dibutuhkan untuk sintesis ATP. Kedua, Proses glikolisis, yakni pembentukan dua molekul asam laktat dari satu molekul glukosa dan terjadi melalui dua reaksi yang masing-masing dikatalisis oleh dua enzim yang berbeda, yaitu fosfoglisarat kinase dan piruvat kinase. Pada tahap pertama, glukosa diubah menjadi dua molekul asam piruvat melalui serangkaian reaksi kemudian asam piruvat diubah menjadi asam laktat dalam reaksi yang dikatalisis oleh enzim piruvat kinase (Rodwell et al., 2015; Ruprecht and Kunji, 2019).

Ketiga, siklus asam sitrat yang juga dikenal sebagai siklus Krebs, merupakan salah satu tahap utama dalam proses metabolisme aerobik yang terjadi di mitokondria sel. Pada tahap ini, asam sitrat dihasilkan melalui reaksi antara asetil-KoA dan oksaloasetat yang kemudian akan mengalami serangkaian reaksi kimia untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP. Salah satu langkah penting dalam siklus asam sitrat adalah pada saat tiokinase suksinat menghasilkan satu molekul ATP secara langsung. Proses ini merupakan bagian dari mekanisme penghasilan energi seluler yang kompleks dan penting untuk kelangsungan hidup sel. Selain menghasilkan energi dalam bentuk ATP, siklus asam sitrat juga

berperan dalam menyediakan molekul-molekul penting untuk proses biosintesis dalam sel. Misalnya, beberapa intermediat dalam siklus ini dapat digunakan sebagai prekursor untuk sintesis asam amino dan lipid. Selain itu, siklus asam sitrat juga berperan dalam menghasilkan molekul penting lainnya seperti NADH dan FADH₂ yang akan digunakan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan energi tambahan (Rodwell et al, 2015).



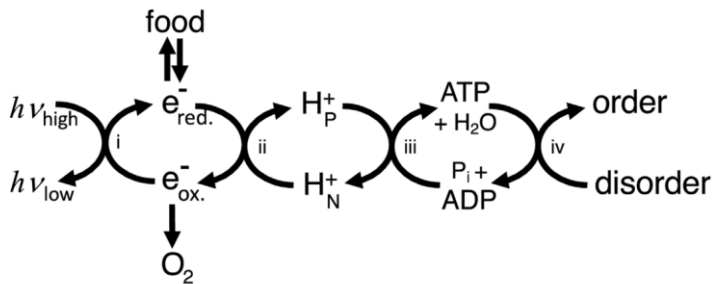
Gambar 11.3. Siklus ADP/ATP dalam transfer fosfat berenergi tinggi
(Sumber : Rodwell et al., 2015)

Fosfagen, seperti kreatin fosfat dan arginin fosfat, berperan penting dalam menyimpan fosfat berenergi tinggi di dalam tubuh vertebrata dan invertebrata. Kreatin fosfat terutama hadir dalam otot rangka vertebrata, jantung, spermatozoa, dan otak, sedangkan arginin fosfat ditemukan dalam otot invertebrata. Fosfagen memungkinkan konsentrasi fosfat berenergi tinggi dipertahankan ketika ATP digunakan dengan cepat untuk memberikan energi pada kontraksi otot. Hal ini memungkinkan tubuh untuk tetap memiliki

sumber energi yang memadai selama proses kontraksi otot berlangsung. Namun, ketika rasio ATP/ADP meningkat, konsentrasi fosfagen juga dapat meningkat untuk bertindak sebagai penyimpan energi fosfat yang tinggi. Selain itu, fosfagen juga berperan dalam proses penyimpanan energi di dalam tubuh. Ketika fosfagen mengalami peningkatan konsentrasi, hal ini menunjukkan bahwa tubuh sedang menyimpan energi tinggi berupa fosfat untuk digunakan pada saat dibutuhkan. Dengan adanya mekanisme ini, tubuh dapat mengatur penggunaan energi dan efisien, terutama saat dalam situasi dimana ATP digunakan dengan cepat (Rodwell, et al., 2015; Meurer et al., 2017).

11.2.3 Daur Ulang (Regenerasi) ATP

ATP atau adenosin trifosfat merupakan molekul penting dalam sel untuk menyimpan dan mengalirkan energi. Namun, ATP perlu diregenerasi menggunakan rantai siklus penggantian, melalui beberapa mekanisme yang kompleks. Pertama, reduksi substrat yang diinduksi cahaya pada organisme fotosintetik merupakan salah satu cara regenerasi ATP yang penting. Proses ini terjadi saat energi cahaya diserap oleh pigmen fotosintetik, seperti klorofil, dan digunakan untuk mereduksi substrat tertentu sehingga menghasilkan energi yang kemudian digunakan untuk sintesis ATP. Kedua, oksidasi substrat tereduksi yang digabungkan dengan transpor proton juga merupakan mekanisme penting dalam regenerasi ATP. Proses ini melibatkan penguraian molekul organik yang tereduksi, seperti glukosa melalui jalur metabolisme yang menghasilkan elektron yang kemudian digunakan untuk menghasilkan gradien proton di sepanjang membran mitokondria. Selanjutnya, proton-proton tersebut digabungkan kembali dengan sintesis ATP melalui enzim ATP sintase, sehingga energi yang tersimpan dalam gradien proton dapat diubah menjadi energi kimia yang disimpan dalam bentuk ATP (Brown, 2024).



Gambar 11.4. Transduksi Energi Seluler
(Sumber : Brown, 2024)

11.2 Bioenergetika Sel

11.2.1 Definisi dan Prinsip Dasar Bioenergetika

Bioenergetika adalah cabang ilmu yang mempelajari transduksi energi oleh makhluk hidup dan makromolekul biologis. Setiap proses konversi energi yang dilakukan oleh sel dan organisme hidup menjadi subjek utama penelitian dalam ilmu ini. Fokus utama dari bioenergetika adalah pada langkah-langkah detail dalam transformasi energi yang terjadi, termasuk proses sintesis ATP yang vital bagi keberlangsungan kehidupan. Penelitian dalam bioenergetika sering kali berkaitan dengan peran membran bioenergi dalam proses konversi energi. Salah satu topik utama yang menjadi perhatian adalah sintesis ATP oleh membran tersebut, yang memiliki peran penting dalam aktivitas motor molekuler. Motor molekuler ini terletak di membran dan bertanggung jawab untuk transpor aktif proton, yang merupakan salah satu mekanisme penting dalam pembentukan energi oleh sel dan organisme hidup (Juretic, 2022).

Bioenergetika merupakan cabang ilmu yang mempelajari aspek energi dari proses biologis, serta pergerakan energi melalui sel dan organisme. Prinsip bioenergetika yakni berfokus pada metabolisme energi yang terjadi di mitokondria, kloroplas, dan bakteri. Terdapat kecenderungan untuk mengaitkan produksi ATP dengan produksi energi, serta penggunaan ATP dengan penggunaan energi, hal ini disebabkan persepsi bahwa ATP merupakan mata uang energi yang terdapat di dalam sel. Mitokondria adalah organel yang sangat penting dalam sel eukarotik karena merupakan satu-

satunya organel yang bertanggung jawab untuk transduksi energi. Dalam pandangan “mitosentris” tentang sel, mitokondria dianggap sebagai pusat dari proses seluler, khususnya transduksi energi. Konsep ini menekankan bahwa mitokondria adalah sumber energi sel, sedangkan bagian sel lainnya hanya mengkonsumsi energi yang dihasilkan oleh mitokondria. Namun, konsep ini memiliki kecacatan, dimana dalam sel eukariotik, proses transduksi energi melibatkan interaksi kompleks antara mitokondria dan organel lainnya seperti sitoplasma dan retikulum endoplasma. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa mitokondria dapat berinteraksi dengan organel lain untuk memodulasi proses seluler yang tidak hanya terbatas pada transduksi energi (Brown, 2024).

Awalnya, mitokondria berasal alfa-proteobakterium yang difagosit oleh nenek moyang eukariotik. Sejak saat itu, aktivitas mitokondria menjadi krusial dalam menjaga kelangsungan hidup sel eukariotik. Studi-studi telah menunjukkan bahwa gangguan mitokondria dapat berkontribusi pada berbagai penyakit kompleks. Dalam kondisi normal, mitokondria berperan dalam menghasilkan energi dalam bentuk ATP melalui rantai transpor elektron dan fosforilasi oksidatif. Namun, jika terjadi disfungsi mitokondria, proses ini dapat terganggu dan mengakibatkan berbagai masalah kesehatan. Selain itu, disfungsi mitokondria juga dapat menyebabkan akumulasi radikal bebas dan stres oksidatif yang dapat merusak sel (Garcia et al., 2020).

Membran sitoplasma bakteri, membran dalam mitokondria, dan membran tilakoid kloroplas merupakan contoh membran bioenergi yang memiliki peran penting dalam melakukan konversi energi yang tersedia secara bebas, atau energi bebas, menjadi ATP. Ketiga jenis membran ini memiliki struktur dan fungsi yang sangat vital dalam proses bioenergetika. Membran sitoplasma bakteri, misalnya, berperan dalam transportasi molekul ke dalam dan ke luar sel bakteri, serta dalam menjaga keseimbangan antara sel dan lingkungannya. Sementara itu, membran dalam mitokondria berfungsi sebagai tempat terjadinya respirasi seluler, yang menghasilkan ATP sebagai sumber energi bagi sel. Sedangkan membran tilakoid kloroplas terlibat dalam proses fotosintesis, dimana energi cahaya matahari diubah menjadi energi kimia yang

disimpan dalam bentuk ATP. Dibandingkan dengan volume setara bintang mirip matahari, transduksi energi bebas bioenergi jutaan kali lebih intensif. Hal ini menunjukkan bahwa proses konversi energi dalam membran bioenergi sangat efisien dan efektif dalam menghasilkan energi yang diperlukan oleh sel untuk menjalankan berbagai aktivitas metabolisme. Energi bebas yang dihasilkan dari transduksi energi dalam membran bioenergi, kemudian dapat digunakan untuk melakukan berbagai fungsi seluler, seperti sintesis protein, replikasi DNA, dan transportasi molekul (Martinez et al., 2020; Juretic, 2022).

Dalam menjaga kelangsungan hidup sel, transformasi energi memainkan peranan yang sangat penting. Namun proses ini terbukti tidak efisien dalam mengubah energi bebas menjadi energi yang dapat digunakan oleh sel. Menariknya, ketika energi diserap oleh sel, lebih dari 80 atau bahkan 90% dari energi bebas awal akan hilang. Hal ini terjadi seiring dengan peningkatan entropi alam semesta, yang menyebabkan energi yang seharusnya dapat dimanfaatkan oleh sel menjadi terbuang percuma. Fenomena yang terjadi ini kompleksitas sistem seluler dalam mengelola energi. Meskipun sel telah berevolusi untuk dapat mengubah energi bebas menjadi bentuk energi yang dapat dimanfaatkan, namun sebagian besar energi tetap terbuang sia-sia. Dalam proses transformasi energi sel, entropi alam semesta menjadi faktor yang tidak dapat dihindari. Meskipun sumber energi bebasnya tersedia dalam jumlah yang cukup, namun entropi yang terus meningkat menyebabkan sebagian besar energi terbuang (Swerdlow, 2016; Juretic, 2022).

11.2.2 Hukum Termodinamika dalam Sistem Biologis

Hukum pertama termodinamika merupakan salah satu prinsip fundamental dalam ilmu fisika yang menyatakan bahwa energi total suatu sistem, termasuk lingkungannya, akan tetap konstan. Artinya, energi tidak dapat diciptakan maupun dihancurkan, namun hanya dapat berubah bentuk atau dialihkan dari satu bagian sistem ke bagian lainnya. Dalam konteks ini, energi dapat berubah dari energi kinetik menjadi energi potensial, atau sebaliknya, tanpa ada penambahan atau pengurangan total energi dalam sistem tersebut (Rodwell et al., 2015).

Dalam sistem kehidupan, energi kimia dapat diubah menjadi panas atau menjadi energi listrik atau mekanik. Dalam konteks termodinamika, pertumbuhan mikroorganisme dipahami sebagai suatu proses yang melibatkan pertukaran materi dan energi dengan lingkungan sekitarnya. Mikroorganisme merupakan contoh sistem termodinamika terbuka yang berinteraksi dengan lingkungan. Dalam hal ini, lingkungan dapat berupa benda mati yang menjadi tempat dimana mikroorganisme tersebut melakukan pertumbuhan. Melalui pertukaran materi dan energi dengan lingkungan, mikroorganisme dapat melakukan pertumbuhan secara alami (Popovic, 2022).

Hukum termodinamika kedua menyatakan bahwa entropi total suatu sistem harus meningkat jika suatu proses ingin terjadi secara spontan. Entropi, yang merupakan ukuran tingkat ketidakteraturan atau keacakan suatu sistem, mencapai nilai maksimumnya saat sistem mendekati keseimbangan. Dalam kondisi suhu dan tekanan konstan, hubungan antara perubahan energi bebas (ΔG) dari sistem yang bereaksi dan perubahan entropi (ΔS) dapat dijabarkan oleh persamaan berikut yang menggabungkan kedua hukum termodinamika tersebut, yaitu (dimana ΔH menunjukkan perubahan entalpi atau panas dan T merupakan suhu absolut) :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Persamaan di atas memberikan gambaran hubungan yang kompleks antara energi bebas, entalpi, suhu, dan entropi dalam suatu sistem termodinamika (Rodwell et al., 2015; Meurer et al., 2017).

Dalam konteks reaksi biokimia, perubahan energi yang terjadi dalam suatu reaksi dapat diukur melalui perubahan total energi internal suatu reaksi atau ΔE . Hal ini disebabkan karena perubahan entalpi (ΔH) dalam reaksi biokimia memiliki nilai yang hampir sama dengan ΔE . Dengan demikian, hubungan antara perubahan energi bebas Gibbs (ΔG), energi total internal (ΔE), dan entropi (ΔS) dalam suatu reaksi biokimia dapat dijelaskan dengan persamaan matematis berikut :

$$\Delta G = \Delta E - T\Delta S$$

Perubahan energi bebas Gibbs (ΔG) dalam suatu reaksi biokimia merupakan indikator penting untuk mengetahui apakah reaksi tersebut bersifat spontan atau tidak. Jika nilai ΔG positif, maka reaksi bersifat tidak spontan dan memerlukan energi tambahan untuk terjadi, yang selanjutnya disebut dengan reaksi endorgenik. Sebaliknya, jika nilai ΔG negatif, maka reaksi bersifat spontan dan dapat terjadi tanpa memerlukan energi tambahan, yang disebut reaksi eksorgenik. Selain itu, hubungan antara ΔG , ΔE , dan ΔS juga memberikan informasi mengenai perubahan energi yang terjadi dalam suatu reaksi biokimia serta kontribusi entropi terhadap kestabilan reaksi tersebut (Rodwell et al., 2015; Meurer et al., 2017).

Dalam termodinamika kimia, perubahan energi Gibbs memiliki peran yang penting dalam menentukan kestabilan suatu sistem. Besarnya nilai ΔG dapat memberikan informasi mengenai arah reaksi kimia yang terjadi. Jika nilai ΔG besar, sistem cenderung stabil dengan sedikit atau bahkan tidak ada kecenderungan untuk terjadi reaksi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem telah mencapai keadaan yang relatif stabil dan tidak memerlukan energi tambahan untuk berubah. Selain itu ketika nilai ΔG sama dengan nol, sistem dikatakan berada dalam keadaan kesetimbangan. Pada kondisi ini, tidak ada perubahan yang terjadi karena reaksi maju dan reaksi mundur berlangsung dengan laju yang sama. Dengan demikian, kesetimbangan terjadi ketika energi Gibbs sistem mencapai kondisi minimum yang menunjukkan bahwa sistem berada dalam keadaan stabil (Rodwell et al., 2015; Rohr, 2020; Colombo and Palacios, 2021).

11.2.3 Transformasi Energi dalam Sel

Produksi ATP, terutama ATP mitokondria, merupakan proses yang penting dalam metabolisme seluler. Namun, perlu dicatat bahwa produksi ATP tidak sama dengan produksi energi secara keseluruhan. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, hukum termodinamika menunjukkan bahwa energi total dalam suatu sistem selalu dikonversi, namun tidak selalu sepenuhnya digunakan dalam bentuk ATP. Kedua, hukum termodinamika menunjukkan bahwa energi bebas seringkali dihamburkan dalam berbagai proses seluler, sehingga tidak semua

energi yang masuk ke dalam produksi ATP benar-benar diubah menjadi bentuk yang bermanfaat. Jalur transduksi energi dalam sel hewan dan tumbuhan merupakan proses kompleks yang melibatkan sejumlah reaksi biokimia yang terkoordinasi. Dalam jalur ini, energi dari nutrisi yang dikonsumsi akan diubah menjadi bentuk energi yang dapat digunakan oleh sel untuk menjalankan berbagai fungsi biologisnya. Salah satu karakteristik utama dari jalur transduksi energi ini adalah adanya rantai kopling antara berbagai reaksi yang terlibat. Rantai kopling ini memungkinkan transfer energi yang efisien dari satu reaksi ke reaksi berikutnya, sehingga sel dapat memanfaatkan energi secara optimal (Brown, 2024).

Dibandingkan dengan jalur metabolisme dan jalur transduksi sinyal, arsitektur jalur transduksi energi memiliki perbedaan mendasar yang signifikan. Jalur metabolisme umumnya terdiri dari serangkaian reaksi yang berlangsung secara linier, dimulai dari substrat tertentu dan menghasilkan produk akhir yang spesifik. Sementara itu, jalur transduksi sinyal biasanya melibatkan serangkaian protein atau molekul sinyal yang berinteraksi secara kompleks untuk menghasilkan respons tertentu dalam sel. Jalur transduksi energi melibatkan rantai kopling yang memungkinkan transfer energi dari satu molekul ke molekul lainnya. Dengan demikian, mitokondria menyediakan energi bagi sel dengan menggabungkan oksidasi makanan ke sintesis ATP, yang mentransfer sebagian besar energi bebas di sel yang pertama ke sel yang kedua. Proses ini dikenal sebagai respirasi seluler, dimana mitokondria menjadi pusat utama dalam pembentukan ATP melalui rantai transport elektron (Protasoni and Zeviani, 2021; Brown, 2024).

Enzim penghubung atau transporter memiliki peran penting dalam menggabungkan proses-proses biokimia dalam sel dengan perubahan energi bebas yang terjadi selama reaksi. Contohnya, dalam hidrolisis ATP, terjadi perubahan energi bebas positif menjadi negatif. Ketika proses tersebut dikombinasikan dengan reaksi yang memiliki perubahan energi bebas negatif, maka proses yang digabungkan akan terus berjalan. Hal ini dikenal sebagai transduksi energi, dimana energi bebas ditransfer dari satu molekul ke molekul lain. Dengan demikian, produksi ATP memberikan energi

bagi sel dengan menyediakan sumber energi bebas yang siap digunakan. Melalui hidrolisis ATP, protein dapat membebaskan energi yang diperlukan untuk menjalankan proses biokimia yang membutuhkan energi. Selain itu, penggabungan proses dengan perubahan energi bebas yang berlawanan juga memungkinkan sel untuk menjaga keseimbangan energi di dalamnya. Dengan adanya enzim penghubung atau transporter, sel dapat mengatur aliran energi dan memastikan bahwa proses-proses biokimia di dalamnya dapat berjalan dengan efisien (Meurer et al., 2017; Brown, 2024).

Meskipun terdapat berbagai reaksi transduksi energi di dalam sel, ATP dianggap sebagai perantara energi utama. Dalam penelitian seluler strategi umum yang digunakan untuk memperkirakan keadaan energi sel adalah dengan menghubungkan perubahan fluks metabolik, seperti *oxygen consumption rate* (OCR) dan/atau *extracellular acidification rate* (ECAR), dengan pengurangan konsentrasi total ATP. Pengurangan ini seringkali diukur secara kualitatif sebagai “level” ATP, yang biasanya dianalisis menggunakan skema reaksi penggabungan enzim berbasis luciferase. Hubungan antara fluks metabolik dan konsentrasi ATP sering kali ditafsirkan sebagai ketidakmampuan fluks metabolik dalam mendukung konsentrasi ATP fisiologis yang ada (Schmidt et al., 2021).

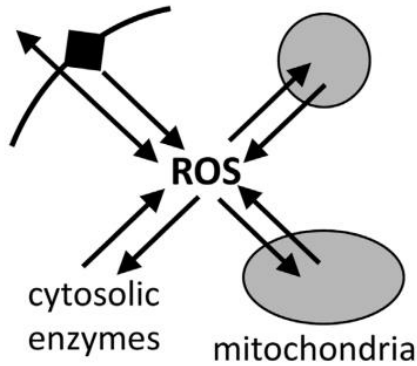
Dalam konteks termodinamika, energi dalam bentuk ATP ditransmisikan melalui reaksi hidrolisis yang menghasilkan ADP dan Pi. Proses ini tidak hanya melibatkan molekul ATP sebagai sumber energi, tetapi juga melibatkan konsentrasi produk (ATP) dan reaktan (ADP + Pi) untuk mengukur tingkat perpindahan energi. Dalam hal ini, energi bebas hidrolisis ATP dapat dijelaskan sebagai potensi perpindahan gugus fosfat dan dapat dihitung menggunakan energi bebas Gibbs dari reaksi hidrolisis (ΔG_{ATP} , kJ/mol). Selain itu, pengukuran hubungan antara arah dan tingkat perpindahan reaksi hidrolisis ATP juga dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang transfer energi dalam proses biokimia. Dengan mengukur konsentrasi produk dan reaktan, kita dapat melihat bagaimana energi disimpan dan dilepaskan selama reaksi hidrolisis ATP (Schmidt et al., 2021).

$$\Delta G_{\text{ATP}} = \Delta G^0_{\text{ATP}} + RT \ln \Gamma = RT \ln \left(\frac{\Gamma}{K_{\text{eq}}} \right)$$

ΔG_{ATP} merupakan parameter yang penting dalam memahami proses hidrolisis ATP dalam sistem biologis. Nilai ΔG_{ATP} dapat dihitung secara empiris dengan menggunakan rasio aksi massa yang teramati (Γ) dari reaksi. ΔG^0_{ATP} sendiri merupakan energi Gibbs pada pH dan suhu fisiologis, dimana R dan T masing-masing merupakan konstanta gas dan suhu absolut. Dengan demikian, persamaan ini memberikan gambaran bahwa energi yang dihasilkan dari hidrolisis ATP dapat dikuantifikasi berdasarkan perpindahan relatif dari kesetimbangan termodinamika. Hal ini penting dalam konteks sistem biologis karena nilai kondisi mapan dari kesetimbangan tersebut bergantung pada kondisi energetik dan kinetik dari reaksi katabolik dan anabolik (Schmidt et al., 2021).

Mitochondria sering dianggap sebagai sumber utama spesies oksigen reaktif (*Reactive Oxygen Species/ROS*) dalam sel, seperti superoksida dan hidrogen peroksida. Namun, berdasarkan bukti yang ada, mitochondria sebenarnya bukanlah sumber utama ROS dalam sel dan jaringan yang telah diteliti. Meskipun mitochondria merupakan sumber ROS yang signifikan, peroksisom, retikulum endoplasma, dan membran plasma memiliki kapasitas yang lebih tinggi dalam menghasilkan ROS daripada mitochondria. Tingkat fisiologis ROS dalam sel sulit untuk diprediksi mengingat kompleksitas antara berbagai organel dan jalur metabolik yang terlibat. Mitochondria adalah organel yang memiliki peran penting dalam proses metabolisme seluler. Selain berperan dalam produksi energi melalui respirasi aerobik, mitochondria juga terlibat dalam proses regulasi redoks dalam sel. Salah satu peran penting mitochondria adalah dalam mengatur kadar ROS dalam sel. ROS adalah molekul reaktif yang dapat menyebabkan stress oksidatif jika tidak terkendali (Zhang and Wong, 2021; Brown, 2024).

plasma membrane peroxisomes



Gambar 11.5. Produksi ROS

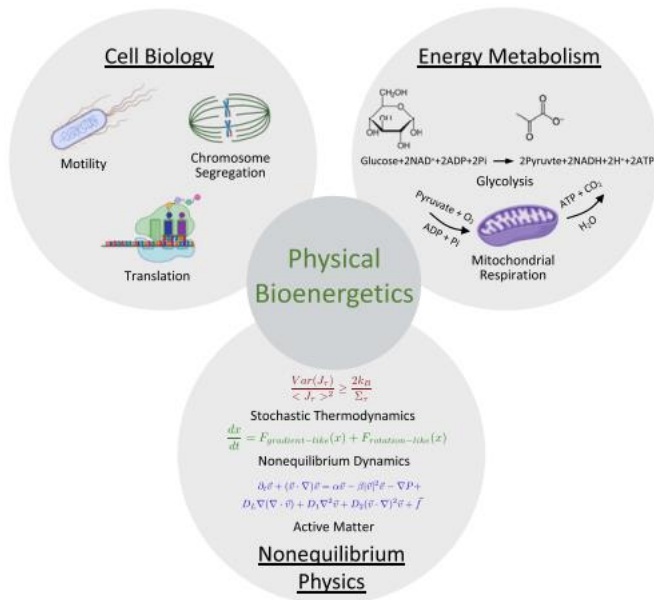
(Sumber : Brown, 2024)

Penelitian yang dilakukan oleh Dey et al (2016) menyimpulkan bahwa mitokondria merupakan penyerap ROS dalam sel. Namun, penelitian terbaru menunjukkan bahwa mitokondria bukanlah sumber utama ROS dalam sel. Melalui pengujian total pelepasan ROS dari sel dan penghambatan ROS dari sumber yang berbeda, diketahui bahwa mitokondria hanya berkontribusi antara 4-44% dari total produksi ROS dalam berbagai jenis sel yang diteliti. Hal ini menunjukkan bahwa mitokondria memang merupakan sumber ROS seluler yang signifikan, namun bukanlah sumber utama, sehingga peran mitokondria dalam regulasi ROS dalam sel masih memerlukan penelitian lebih lanjut. NADPH oksidase merupakan enzim yang bertanggung jawab sebagai sumber utama ROS pada sebagian besar jenis sel. Dalam konteks ini, ROS dihasilkan melalui aktivitas enzim NADPH oksidase, yang berperan dalam berbagai proses biologis seperti sinyal seluler, regulasi metabolik, dan respon imun. Hal yang menjadi penting, meskipun NADPH oksidase dianggap sebagai sumber utama ROS, hal ini tidak mengurangi peran penting ROS mitokondria dalam fisiologi dan patofisiologi sel. ROS mitokondria tetap memiliki kontribusi yang signifikan dalam proses-proses seluler seperti metabolisme energi, apoptosis, dan regulasi redoks (Zhang and Wong, 2021).

11.2.4 Bioenergetik Fisik

Sel adalah unit struktural dan fungsional dasar dari semua organisme hidup. Sel berperan penting dalam menjaga keseimbangan termodinamika di dalam tubuh dengan menggunakan jalur metabolisme untuk mengubah bahan dan energi menjadi komponen seluler yang dibutuhkan. Sel juga memanfaatkan energi Gibbs untuk menggerakkan proses seluler yang kompleks. Aliran energi melalui sel berasal dari konversi energi Gibbs yang diperoleh dari lingkungan sekitar. Laju aliran energi ini dapat diukur melalui fluks energi, yang memungkinkan pengukuran biaya energi yang diperlukan oleh sel dalam menjalankan berbagai proses biologis. Fluks energi yang terjadi pada sel juga dapat memberikan batasan pada berbagai proses seluler, mulai dari pertumbuhan hingga aktivitas motor molekuler hingga pemrosesan informasi seluler. Dengan adanya pengaturan energi melalui sel, organisme dapat mempertahankan kelangsungan hidupnya secara efisien (Yang et al., 2021).

Bioenergetika fisik adalah bidang studi yang berada diantara fisika non-kesetimbangan, metabolisme energi, dan biologi sel. Ilmu ini bertujuan untuk memahami seberapa banyak energi yang digunakan oleh sel, bagaimana energi tersebut didistribusikan ke dalam berbagai proses seluler, serta kendala energi yang mungkin terjadi. Berbeda dengan penelitian bioenergetika konvensional, bioenergetika fisik menggunakan pendekatan fisika non-kesetimbangan untuk mempelajari biaya energi dan kendala yang dihadapi oleh sel. Penerapan konsep fisika non-kesetimbangan dalam biologi sel menimbulkan berbagai tantangan, terutama dalam mengkaji fluks energi seperti fluks adenosin 5'-trifosfat (ATP) yang merupakan inti dari banyak proses seluler (Yang et al., 2021).



Gambar 11.6. Bioenergetika Fisik
(Sumber : Yang et al, 2021)

DAFTAR PUSTAKA

- Brown, G.C. 2024. Bioenergetic Myths of Energy Transduction in Eukaryotic Cells. *Frontiers in Molecular Biosciences*: 11, 1-8. DOI 10.3389/fmolb.2024.1402910.
- Colombo, M., Palacios, P. 2021. Non-equilibrium Thermodynamics and The Free Energy Principle in Biology. *Biology and Philosophy*: 36, 41, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s10539-021-09818-x>.
- Dey, S., Sidor, A., O'Rourke, B. 2016. Compartment-Specific Control of Reactive Oxygen Species Scavenging by Antioxidant Pathway Enzymes. *J. Biol. Chem*: 291(21), 11185-11197. doi:10.1074/jbc.M116.726968.
- Dunn J., Grider, M.H. 2023. *Physiology, Adenosine Triphosphate*. San Diego: StatPearls Publishing.
- Garcia, F.J., Mula, A.M., Cardellach, F., Garrabou, G. 2020. Nutrition, Bioenergetics, and Metabolic Syndrome. *Nutrients*: 12, 1-38. ; doi:10.3390/nu12092785.
- Juretic, D. 2022. *Bioenergetics : A Bridge Across Life and Universe*. New York: CRC Press.
- Martinez, J., Marmisolle, I., Tarallo, D., Quijano, C. 2020. Mitochondrial Bioenergetics and Dynamics in Secretion Process. *Frontiers in Endocrinology*: 11, 1-18. doi: 10.3389/fendo.2020.00319.
- Meurer, F., Do, H.T., Sadowski, G., Held, C. 2017. Standard Gibbs Energy of Metabolic Reaction : II. Glucose-6-phosphatase Reaction and ATP Hydrolysis. *Biophysical Chemistry*, 223, 30-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bpc.2017.02.005>.
- Popovic, M. 2022. Biothermodynamic Key Opens the Door of Life Sciences: Bridging the Gap between Biology and Thermodynamics. *Biology and Life Sciences-Biophysics*: 1-9. <https://doi.org/10.20944/preprints202210.0326.v1>.
- Protasoni, M., Zeviani, M. 2021. Mitochondrial Structure and Bioenergetics in Normal and Disease Conditions. *International Journal of Molecular Sciences*: 22, 1-54. <https://doi.org/10.3390/ijms22020586>.

- Putri, N.F., Suryadarma, P., Zakiyyah, S., Mangunwidjaja, D. 2018. Phosphate Addition Play Important Role on Escherichia coli Cell Attachment under Aerobic Condition. *AIP Publishing*: 2049, 020014-1-020014-5. <https://doi.org/10.1063/1.5082419>.
- Rodwell, V.W., Bender, D.A., Botham, K.M., Kennely, P.J., Weil, P.A. 2015. *Harper's Illustrated Biochemistry Thirtieth Edition*. United States: The McGraw-Hill Education.
- Ruprecht, J.J., Kunji, E.R.S. 2019. Structural Changes in the Transport Cycle of the Mitochondrial ADP/ATP Carrier. *Current Opinion in Structural Biology*: 57, 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.sbi.2019.03.029>.
- Schmidt, C.A., Wellman, K.H.F., Neuffer, P.D. 2021. From OCR and ECAR to Energy : Perspectives on the Design and Interpretation of Bioenergetics Studies. *Biochemistry and Molecular Biology*: 297(4), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jbc.2021.101140>.
- Swerdlow, R.H. 2016. Bioenergetics and Metabolism : A Bench to Bedside Perspective. *Journal of Neurochemistry*: 139, 126-135. doi: 10.1111/jnc.13509.
- Wang, X., Zhang, X., Wu, D., Huang, Z., Hou, T., Jian, C., Yu, P., Lu, F., Zhang, R., Sun, T., Li, J., Qi, W., Wang, Y., Gao, F., Cheng, H. 2017. Mitochondrial Flashes Regulate ATP Homeostasis in The Heart. *Elife*, 1-20. DOI: 10.7554/eLife.23908.
- Yang, X., Heinemann, M., Howard, J., Huber, G., et al. 2021. Physical Bioenergetics : Energy Fluxes, Budgets, and Constraints in Cells. *PNAS*: 118(26), 1-10. <https://doi.org/10.1073/pnas.2026786118>.
- Zhang, Y., Wong, H. 2021. Are Mitochondria the Main Contributor of Reactive Oxygen Species in Cells?. *J. Exp. Biol*: 224. doi:10.1242/jeb.221606.
- Zimmermann, H. 2016. Extracellular ATP and other Nucleotides-Ubiquitous Triggers of Intracellular Messenger Release. *Purinergic Signalling*: 12, 25-57. DOI 10.1007/s11302-015-9483-2.

BAB 12

VITAMIN DAN UNSUR MIKRO

Oleh Neng Mira Atjo

12.1 Pendahuluan

Nutrisi merupakan bagian penting buat kehidupan manusia yang mempengaruhi kondisi, perkembangan, serta fungsi tubuh secara holistik. Di antara beberapa zat gizi yang diperlukan oleh tubuh, vitamin dan unsur mikro mempunyai peranan fundamental dalam mendukung berbagai proses fisiologis dan biokimia. Vitamin dan unsur mikro adalah bagian dari mikronutrien yang dibutuhkan dalam jumlah kecil tapi memiliki dampak yang besar terhadap kesehatan manusia. (Ernawati, F.,2013)

Vitamin adalah senyawa organik yang dibutuhkan oleh tubuh dalam skala kecil untuk membantu pertumbuhan, perkembangan, serta pemeliharaan berbagai proses biologis. Vitamin tidak bisa diproduksi untuk jumlah yang cukup oleh tubuh, sehingga harus diperoleh dari makanan atau suplemen. Vitamin dibagi menjadi 2 kelompok utama, yakni vitamin yang larut lemak (A, D, E, serta K) serta vitamin yang larut dalam air (vitamin B kompleks dan C). Masing-masing vitamin mempunyai fungsi unik yang mendukung berbagai sistem tubuh, seperti sistem saraf, metabolisme energi, dan sistem kekebalan tubuh. (Supriadi,*et al* 2022)

Selain vitamin, unsur mikro atau mineral mikro juga memainkan peran penting dalam berbagai fungsi fisiologis. Unsur mikro merupakan mineral yang diperlukan oleh tubuh dalam skala yang lumayan kecil, biasanya kurang dari 100 mg per hari, namun begitu penting buat kesehatan. Contohnya meliputi zat besi (Fe), seng (Zn), tembaga (Cu), mangan (Mn), selenium (Se), yodium (I), dan kromium (Cr). Mineral ini berfungsi dalam berbagai mekanisme tubuh, seperti sintesis enzim, produksi hormon, dan pemeliharaan kesetimbangan elektrolit dan metabolisme energi. (Smolin, L. A,*et al*,2019)

Defisiensi atau kelebihan vitamin dan unsur mikro bisa mengakibatkan berbagai gangguan kesehatan. Defisiensi vitamin dan mineral bisa menyebabkan penyakit serius, seperti kurang darah karena berkurangnya zat Fe, gondok karena defisiensi yodium, serta gangguan skorbut akibat defisiensi vitamin C. Di satu sisi, konsumsi yang berlebihan juga bisa menyebabkan efek toksik, seperti hipervitaminosis A yang bisa merusak hati dan sistem saraf. (Ross, A. C, *et.al*,2020)

12.2 Vitamin

12.2.1 Pengertian Dan Pembagian Vitamin

Vitamin ialah suatu senyawa organik essensial yang diperlukan tubuh dalam jumlah sedikit buat berbagai fungsi metabolisme, pertumbuhan, serta pemeliharaan kesehatan. (Supriadi,*et al* 2022) Vitamin berfungsi dalam beberapa tahap reaksi metabolisme energi, pertumbuhan dan pemeliharaan tubuh, pada umumnya sebagai koenzim atau sebagai bagian dari enzim.

Menurut Supriadi,*et al* (2022), secara umum fungsi vitamin adalah berikut:

1. Merupakan bagian enzim atau co-enzim (pembantu enzim) yang berfungsi mengatur berbagai proses metabolisme.
2. Mempertahankan fungsi berbagai jaringan.
3. Mempengaruhi pertumbuhan dan pembentukan sel baru
4. Mendukung pembuatan zat tertentu dalam tubuh.

Vitamin masuk ke dalam tubuh melalui makanan atau suplemen dan diserap di saluran pencernaan. Menurut Supriadi,*et al* (2022) Vitamin terbagi menjadi dua kelompok utama:

1. Vitamin larut air (B kompleks, C) → Diserap langsung ke dalam darah dari usus halus dan diedarkan ke seluruh tubuh. Karena tidak disimpan dalam jumlah besar, kelebihannya diekskresikan melalui urin.

Karakteristik:

- a. Larut dalam air dan tidak disimpan dalam jumlah besar.
- b. Harus dikonsumsi secara berkala ksebab gampang terbuang melalui urine.

- c. Jarang membuat keracunan kecuali dikonsumsi dalam dosis sangat tinggi.
2. Vitamin larut lemak (A, D, E, K) → Diserap bersama lemak di usus halus dengan bantuan empedu dan dialirkan melalui sistem limfatik sebelum masuk ke aliran darah. Disimpan di jaringan lemak serta hati untuk dipakai saat dibutuhkan.
Karakteristik:
 - a. Larut dalam lemak dan minyak.
 - b. Disimpan dalam jaringan lemak serta hati.
 - c. Bisa bertahan lama dalam tubuh, hingga risiko keracunan lebih tinggi.

12.2.2 Vitamin Larut Lemak

1. Vitamin A (Retinol, Beta-Karoten)

Fungsi:

- a. Memelihara kesehatan mata dan penglihatan.
- b. Meningkatkan sistem imun.
- c. Berperan untuk pertumbuhan dan diferensiasi sel.

Sumber:

- a. Retinol: Hati, telur, susu.
- b. Beta-karoten: Wortel, bayam, ubi jalar, pepaya.

Dampak Defisiensi:

- a. Rabun senja.
- b. Mata kering (xerophthalmia).
- c. Penurunan daya tahan tubuh.

Efek Kelebihan:

- a. Keracunan hati.
- b. Risiko cacat lahir bila dikonsumsi berlebihan saat kehamilan.

Cara Konsumsi:

Dikonsumsi bersama makanan berlemak agar meningkatkan penyerapannya.

Menurut Whitney, (2019) ada tiga tahap gejala defisiensi vitamin A yaitu sebagai berikut:

- a. Gejala buta senja, tidak tahan terhadap cahaya

- b. Gejala xerophthalmia, terdapatnya lendir pada sebelah atau kedua mata
- c. Jika gejala kedua dibiarkan, maka dapat meningkat ke tahap ketiga yang disebut juga keratomalacia, cornea atau selaput mata yang terlihat bening menjadi keruh serta berlendir.

Penyakit mata jenis ini susah diobati lagi, hingga menyebabkan kebutaan untuk jangka lama. Efek kekurangan vitamin A memiliki efek besar terhadap metabolisme protein secara menyeluruh dan menunjukkan dalam berbagai jenis gejala klinis.

2. Vitamin D (Kalsiferol)

Kelebihan vitamin D juga tidak baik untuk kesehatan dan menimbulkan toksik, terutama bagi anak-anak. Konsumsi 45 μg (1800 SI) cholecalciferol per hari menunjukkan gejala hipervitaminosis D pada anak-anak. Tanda awal kelebihan vitamin D tidak spesifik yaitu sakit kepala, kurang nafsu makan dan muntah dan mual. Kelebihan vitamin D mengakibatkan konsentrasi kalsium pada darah dan urin tinggi. Pengerasan otot, pembuluh dan ginjal yang dapat menyebabkan gangguan ginjal serta hipertensi, sebagai ringkasan dapat dilihat mulai fungsi dan bila kelebihan vitamin D.

Fungsi:

- a. Berperan dalam penyerapan Ca serta F buat kesehatan tulang dan gigi.
- b. Meningkatkan sistem imun.

Sumber:

- a. Paparan sinar matahari.
- b. Ikan berlemak, telur, susu.

Efek Defisiensi:

- a. Osteoporosis pada orang dewasa.
- b. Rakhitis pada anak-anak (tulang lemah).

Dampak Kelebihan:

- a. Hiperkalsemia (kelebihan kalsium dalam darah).
- b. Kerusakan ginjal.

Cara Konsumsi:

Dikonsumsi bersama makanan berlemak untuk meningkatkan penyerapannya.

3. Vitamin E (Tokoferol)

Kelebihan konsumsi vitamin E bisa mengganggu kerja vitamin D dan K, mengurangi kinerja kelenjar tiroid. Untuk jangka panjang, konsumsi kelebihan dosis suplemen vitamin E dan A sintetis diduga dapat mengurangi imunitas tubuh dan memicu pertumbuhan sel-sel tumor.

- a. Fungsi: Antioksidan, melindungi sel dari kerusakan akibat radikal bebas, meningkatkan kekebalan tubuh.
- b. Sumber: Kacang-kacangan, minyak sayur, biji-bijian, bayam.

4. Vitamin K

Sampai sekarang belum ada bukti yang jelas mengenai efek negatif kelebihan vitamin K. Para ahli tidak menyarankan konsumsi suplemen vitamin K sintetis lebih dari 500 µg per hari. Ibu hamil yang mengkonsumsi suplemen vitamin K sintetis berlebihan dapat melahirkan bayi yang mengalami gangguan hati.

- a. Fungsi: Membantu pembekuan darah dan memelihara kesehatan tulang.
- b. Sumber: Sayuran hijau (bayam, brokoli), telur dan hati
- c. Defisiensi: Pendarahan yang sulit dihentikan.
- d. Kelebihan: Risiko pembekuan darah berlebihan.

12.2.3 Vitamin Larut Air

1. Vitamin B1 (Tiamin)

- a. Fungsi: Berperan dalam metabolisme energi serta fungsi saraf.
- b. Sumber: Gandum, kacang-kacangan, daging merah.
- c. Kekurangan: Beri-beri, lemah otot, gangguan fungsi saraf.
- d. Kelebihan: larut dalam air.

2. Vitamin B2 (Riboflavin)
 - a. Fungsi: Menghasilkan energi, kulit serta mata.
 - b. Sumber: Susu segar, telur, daging, sayuran hijau.
 - c. Kekurangan: Sariawan, kulit kering, penglihatan berkurang.
3. Vitamin B3 (Niasin)
 - a. Fungsi: Membantu metabolisme energi, mengurangi kolesterol.
 - b. Sumber: Daging segar, ikan, kacang, biji-bijian.
 - c. Kekurangan: dermatitis, diare, demensia.
 - d. Kelebihan: Kemerahan kulit, gangguan hati.
4. Vitamin B6 (Piridoksin)
 - a. Fungsi: Sintesis neurotransmitter, metabolisme protein.
 - b. Sumber: Pisang, kentang, daging segar.
 - c. Kekurangan: Depresi, anemia, fungsi saraf.
 - d. Kelebihan: Neuropati perifer (kerusakan saraf).
5. Vitamin B9 (Asam Folat)
 - a. Fungsi: Pembentukan DNA, penting untuk ibu hamil.
 - b. Sumber: Sayuran, jeruk, kacang.
 - c. Kekurangan: Anemia dan cacat lahir.
 - d. Kelebihan: Menyembunyikan defisiensi B12.
6. Vitamin B12 (Kobalamin)
 - a. Fungsi: Menghasilkan sel darah merah, fungsi saraf.
 - b. Sumber: Daging, ikan, susu segar, telur.
 - c. Kekurangan: Anemia pernisiiosa, gangguan saraf.

7. Vitamin C (Asam Askorbat)

Walaupun ada penelitian yang membuktikan bahwa konsumsi vitamin C sampai 20 kali kebutuhan bisa mempercepat penyembuhan infeksi tenggorokan, flu dan penurunan kolesterol, tetapi belum diketahui pasti berapa batas ambang yang dianggap tidak aman. Beberapa studi juga mengungkapkan dampak negatif kelebihan vitamin C dengan dosis satu gram atau lebih yaitu gangguan gastrointestinal

seperti diare, mual, dan kram perut. Tingginya motilitas, menyebabkan efek osmotik secara langsung pada usus diyakini jadi penyebab berbagai gangguan tersebut.

Terkadang keadaan ini dicirikan oleh sensitisasi yang dikaitkan dengan urticaria, edema, dan skin rashes. Kelebihan vitamin C untuk jangka panjang diyakini memicu terbentuknya batu ginjal. Hal ini didasarkan pada penelitian tingginya kandungan asam urat pada urin seseorang yang mengkonsumsi vitamin C lebih dari 400 mg per hari. Kelebihan vitamin C juga akan menyebabkan peningkatan penyerapan berbagai mineral, termasuk mineral yang menjadi toksik untuk tubuh seperti merkuri.

Proses pembentukan vitamin dapat terjadi melalui berbagai cara, tergantung pada jenis vitaminnya. Secara umum, vitamin bisa diperoleh dari makanan, disintesis oleh tubuh, atau dihasilkan oleh mikroorganisme tertentu. Berikut adalah beberapa proses pembentukan vitamin:

1. Sintesis dalam Tubuh (Endogen)

Beberapa vitamin dapat diproduksi oleh tubuh manusia melalui proses metabolisme tertentu, misalnya:

- a. **Vitamin D:** Dibentuk dari **provitamin D (7-dehidrokolesterol)** yang ada di kulit ketika terpapar sinar ultraviolet (UV-B) dari matahari. Proses ini terjadi dalam beberapa tahap:
 - 1) **Konversi di Kulit:** 7-dehidrokolesterol diubah menjadi **pre-vitamin D3** oleh sinar matahari.
 - 2) **Konversi di Hati:** Pre-vitamin D3 dikonversi menjadi **25-hidroksivitamin D (calcidiol)** di hati.
 - 3) **Konversi di Ginjal:** Calcidiol diubah menjadi bentuk aktif **1,25-dihidroksivitamin D (kalsitriol)** yang digunakan oleh tubuh.
- b. **Vitamin K:** Sebagian diproduksi oleh **bakteri di usus besar**, terutama oleh bakteri **Escherichia coli**. Vitamin K ini berperan penting dalam pembekuan darah.
- c. **Vitamin B7 (Biotin) dan Vitamin B12:** Dapat diproduksi oleh bakteri dalam usus, meskipun jumlahnya sering kali

tidak mencukupi untuk kebutuhan harian sehingga tetap harus diperoleh dari makanan.

2. Sintesis oleh Mikroorganisme dan Tumbuhan

Beberapa vitamin diproduksi secara alami oleh mikroorganisme, tumbuhan, dan alga:

- a. **Vitamin B12 (Kobalamin)**: Tidak bisa diproduksi oleh tubuh manusia tetapi dihasilkan oleh **bakteri dan arkea** di lingkungan seperti tanah dan air. Manusia memperoleh vitamin B12 dari makanan hewani seperti daging, ikan, dan produk susu, yang berasal dari rantai makanan di mana mikroorganisme ini terlibat.
- b. **Vitamin C (Asam Askorbat)**: Diproduksi oleh sebagian besar hewan dan tumbuhan melalui jalur metabolisme **asam glukuronat**. Namun, manusia tidak bisa mensintesisnya karena kekurangan enzim **L-gulonolakton oksidase**, sehingga harus diperoleh dari makanan.

3. Produksi Sintetis dalam Industri Farmasi

Beberapa vitamin diproduksi secara sintetis dalam skala industri untuk suplemen dan fortifikasi makanan:

- a. **Vitamin C** : Diproduksi melalui fermentasi mikroba menggunakan **bakteri seperti Acetobacter** atau **Gluconobacter**, yang mengubah glukosa menjadi asam askorbat.
- b. **Vitamin B kompleks**: Banyak diproduksi melalui fermentasi mikroba seperti **Bacillus subtilis dan Pseudomonas denitrificans**.
- c. **Vitamin D** : Diproduksi dengan mengolah lanolin dari wol domba atau melalui sintesis kimia dari kolesterol.

Tabel 12.1. Kebutuhan Vitamin

Vitamin	Fungsi	Kebutuhan Harian	Sumber Alami
Vitamin A (Retinol)	Menjaga kesehatan mata, kulit, dan sistem imun	Pria: 900 mcg Wanita: 700 mcg	Wortel, ubi jalar, hati, bayam
Vitamin B1 (Tiamin)	Metabolisme energi dan fungsi saraf	Pria: 1,2 mg Wanita: 1,1 mg	Daging, biji-bijian, kacang-kacangan
Vitamin B2 (Riboflavin)	Mendukung pertumbuhan sel dan produksi energi	Pria: 1,3 mg Wanita: 1,1 mg	Susu, telur, sayuran hijau
Vitamin B3 (Niasin)	Mendukung metabolisme dan fungsi saraf	Pria: 16 mg Wanita: 14 mg	Daging ayam, ikan, biji-bijian
Vitamin B5 (Asam Pantotenat)	Metabolisme lemak, karbohidrat, dan protein	Dewasa: 5 mg	Daging, brokoli, biji-bijian
Vitamin B6 (Piridoksin)	Metabolisme asam amino, produksi neurotransmitter	Pria: 1,3–1,7 mg Wanita: 1,3–1,5 mg	Ayam, ikan, pisang
Vitamin B7 (Biotin)	Metabolisme lemak dan karbohidrat, kesehatan kulit dan rambut	Dewasa: 30 mcg	Telur, kacang-kacangan, biji-bijian
Vitamin B9 (Asam Folat)	Sintesis DNA dan pertumbuhan sel, penting saat kehamilan	Dewasa: 400 mcg	Sayuran hijau, buah citrus, kacang-

Vitamin	Fungsi	Kebutuhan Harian	Sumber Alami
			kacangan
Vitamin B12 (Kobalamin)	Produksi sel darah merah dan fungsi sistem saraf	Dewasa: 2,4 mcg	Daging, ikan, produk susu
Vitamin C (Asam Askorbat)	Antioksidan, mendukung sistem imun, sintesis kolagen	Pria: 90 mg Wanita: 75 mg	Buah citrus, stroberi, brokoli
Vitamin D	Membantu penyerapan kalsium dan kesehatan tulang	Dewasa: 15 mcg (600 IU)	Sinar matahari, ikan berlemak, susu fortifikasi
Vitamin E	Antioksidan yang melindungi sel	Dewasa: 15 mg	Kacang-kacangan, biji-bijian, minyak sayur
Vitamin K	Penting buat pembekuan darah dan kesehatan tulang	Pria: 120 mcg Wanita: 90 mcg	Sayuran hijau, brokoli, kubis

Sumber: Smolin, L. A., & Grosvenor, M. B. (2019)

12.3 Unsur Mikro

12.3.1 Pengertian Unsur Mikro

Unsur mikro (mikronutrien mineral) ialah mineral penting yang diperlukan badan dalam skala kecil (kurang dari 100 mg per hari) tetapi memiliki peran penting untuk berbagai proses biologis, termasuk metabolisme enzim, kesetimbangan cairan, dan fungsi sistem saraf.

Meskipun dibutuhkan dalam jumlah kecil, defisiensi atau kelebihan unsur mikro bisa menyebabkan gangguan kesehatan yang signifikan. (Smolin, L. A,*et al*,2019)

12.3.2 Jenis Unsur Mikro

Menurut Whitney, E., & Rolfes, S. R (2019), Unsur mikro terdiri dari beberapa mineral utama yang berperan dalam proses metabolisme tubuh. Berikut ialah zat mikro yang paling penting:

1. Besi (Fe)
2. Zink (Zn)
3. Tembaga (Cu)
4. Mangan (Mn)
5. Selenium (Se)
6. Yodium (I)
7. Fluor (F)
8. Kromium (Cr)
9. Molibdenum (Mo)
10. Kobalt (Co)

12.3.3 Peran Fisiologis, Sumber, Efek Kekurangan & Kelebihan.

1. Besi (Fe)

Peran Fisiologis:

- a. Berperan pembentukan hemoglobin pada sel darah merah.
- b. Berperan dalam transportasi oksigen ke seluruh tubuh.
- c. Membantu fungsi otot serta enzim metabolik.

Sumber Makanan:

Hati, daging merah, ikan, bayam, kacang-kacangan, telur.

Efek Kekurangan:

- a. Anemia defisiensi besi (kelelahan, pucat, pusing).
- b. Gangguan pertumbuhan dan perkembangan kognitif pada anak-anak.

Efek Kelebihan:

Keracunan besi, gangguan hati, resiko sakit jantung.

2. Zink (Zn)

Peran Fisiologis:

- a. Menjaga sistem imun.

- b. Berperan dalam sintesis protein dan penyembuhan luka.
- c. Berfungsi pada pertumbuhan serta perkembangan.

Sumber:

Daging merah, tiram, susu, biji, kacang-kacangan.

Efek Kekurangan:

- a. Gangguan pertumbuhan pada anak-anak.
- b. Menurunkan sistem imun.
- c. Luka sulit sembuh.

Efek Kelebihan:

- a. Menurunkan kemampuan penyerapan tembaga.
- b. Menekan sistem imun yang berlebih.

3. Tembaga (Cu)

Peran Fisiologis:

- a. Berperan dalam produksi hemoglobin.
- b. Membantu pembentukan jaringan ikat dan sistem saraf.
- c. Berfungsi sebagai antioksidan.

Sumber Makanan:

Hati, kacang-kacangan, coklat hitam, biji bunga matahari.

Efek Kekurangan:

Anemia, osteoporosis, gangguan saraf.

Efek Kelebihan:

Keracunan hati, gangguan mental, emesis.

4. Mangan (Mn)

Peran Fisiologis:

- a. Membantu metabolisme karbohidrat, protein, dan lemak.
- b. Berperan pada bentuk tulang serta enzim antioksidan.

Sumber Makanan:

Gandum utuh, kacang-kacangan, teh, bayam.

Efek Kekurangan:

- a. Gangguan pertumbuhan tulang.
- b. Kelelahan dan lemah otot.

Efek Kelebihan:

Gangguan saraf dan gejala seperti Parkinson.

5. Selenium (Se)

Peran Fisiologis:

- a. Antioksidan yang melindungi sel dari kerusakan.
- b. Membantu pada fungsi kelenjar tiroid.

Sumber:

Ikan segar, daging segar, telur, kacang-kacangan Brazil.

Efek Kekurangan:

Gangguan kardiovaskular, penurunan kekebalan tubuh.

Efek Kelebihan:

Keracunan selenium, rambut rontok, gangguan saraf.

6. Yodium (I)

Peran Fisiologis:

- a. Penting untuk sintesis hormon tiroid.
- b. Mengatur metabolisme tubuh dan pertumbuhan.

Sumber:

Garam beryodium, makanan laut, rumput laut.

Efek Kekurangan:

- a. Penyakit Gondok (pembengkakan kelenjar tiroid).
- b. Penyakit Hipotiroidisme (kelelahan, kenaikan berat badan, depresi).

Efek Kelebihan:

Hipertiroidisme, gangguan proses metabolisme.

7. Fluor (F)

Peran Fisiologis:

- a. Berperan pada pembentukan serta memelihara kesehatan gigi.
- b. Mencegah kerusakan gigi.

Sumber Makanan:

Air berfluoride, teh, jenis ikan laut.

Efek Kekurangan:

Meningkatkan risiko gigi berlubang.

Efek Kelebihan:

Fluorosis (bintik putih pada gigi), gangguan tulang.

8. Kromium (Cr)

Peran Fisiologis:

- a. Berperan metabolisme karbohidrat dan lemak.
- b. Menambah sensitivitas insulin.

Sumber Makanan:

Daging merah, keju, kacang-kacangan, biji-bijian.

Efek Kekurangan:

Gangguan metabolisme glukosa, resistensi insulin.

Efek Kelebihan:

Penyakit hati dan ginjal.

9. Molibdenum (Mo)

Peran Fisiologis:

Membantu enzim pada proses metabolisme sulfur serta purin.

Sumber:

Kacang-kacangan, susu, biji-bijian.

Efek Kekurangan:

Gangguan proses metabolisme, kelelahan.

Efek Kelebihan:

Tingginya asam urat, sakit sendi.

10. Kobalt (Co)

Peran Fisiologis:

Komposisi utama vitamin B12 yang berkontribusi pada pembentukan sel darah merah.

Sumber Makanan:

Makanan dan minuman yang berasal dari hewan yakni daging merah serta susu segar.

Efek Kekurangan:

Anemia perniosa (gangguan produksi sel darah merah).

Efek Kelebihan:

Penyakit jantung dan tiroid.

Tabel 12.2. Kebutuhan Unsur Mikro (Mineral)

Mineral	Fungsi	Kebutuhan Harian	Kebutuhan Harian
Zat Besi (Fe)	Produksi hemoglobin, transportasi oksigen	Pria: 8 mg Wanita: 18 mg	Daging merah, hati, bayam, kacang-kacangan
Seng (Zn)	Mendukung sistem imun, penyembuhan luka	Pria: 11 mg Wanita: 8 mg	Daging sapi, kerang, kacang-kacangan
Yodium (I)	Produksi hormon tiroid, metabolisme energi	Dewasa: 150 mcg	Garam beryodium, rumput laut, ikan laut
Selenium (Se)	Antioksidan, mendukung fungsi tiroid	Dewasa: 55 mcg	Kacang Brazil, ikan tuna, ayam
Tembaga (Cu)	Produksi sel darah merah, metabolisme zat besi	Dewasa: 900 mcg	Hati sapi, kacang-kacangan, cokelat hitam
Mangan (Mn)	Metabolisme karbohidrat, pembentukan tulang	Pria: 2,3 mg Wanita: 1,8 mg	Kacang-kacangan, teh, sayuran hijau
Fluorida (F)	Kesehatan gigi dan tulang	Pria: 4 mg Wanita: 3 mg	Air fluoridasi, teh, ikan laut
Kromium (Cr)	Mengatur kadar gula darah	Pria: 35 mcg Wanita: 25 mcg	Brokoli, anggur, daging, gandum utuh
Molibdenum (Mo)	Metabolisme asam amino, detoksifikasi	Dewasa: 45 mcg	Kacang-kacangan, sereal, susu

Sumber: Ernawati, F. (2013)

Efek pengobatan vitamin berfungsi untuk memelihara kesehatan, menjaga sistem imun, mendukung metabolisme, serta mencegah penyakit. Efek negatif vitamin dapat berlangsung jika dikonsumsi berlebih atau dosis tinggi, mengakibatkan gangguan metabolisme, kerusakan organ, dan gangguan pencernaan. Pemakaian vitamin yang seimbang dengan makanan yang sehat merupakan cara yang baik untuk memperoleh manfaatnya tanpa risiko efek samping.

Unsur mikro mempunyai fungsi esensial dalam segala fungsi biologis tubuh. Kekurangan bisa menyebabkan berbagai penyakit, kemudian kelebihan bisa menyebabkan efek toksik. Sehingga, disarankan untuk mengonsumsi unsur mikro pada jumlah yang setara juga dengan makanan yang sehat serta bergizi.

Dengan pemahaman yang benar mengenai vitamin serta unsur mikro, diharapkan masyarakat dapat sadar betapa penting asupan nutrisi yang seimbang untuk menjaga kesehatan serta kesejahteraan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ernawati, F. (2013). Peran beberapa zat gizi mikro dalam sistem imunitas. *Gizi Indonesia*, 36(1).
- Whitney, E., & Rolfes, S. R. (2019). *Understanding Nutrition* (15th ed.). Cengage Learning.
- Smolin, L. A., & Grosvenor, M. B. (2019). *Nutrition: Science and Applications* (5th ed.). Wiley.
- Ross, A. C., Caballero, B., Cousins, R. J., Tucker, K. L., & Ziegler, T. R. (2020). *Modern Nutrition in Health and Disease* (12th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Supriadi, D., Budiana, T. A., & Jantika, G. (2022). Kejadian anemia berdasarkan asupan energi, vitamin B6, vitamin B12, vitamin C dan keragaman makanan pada anak sekolah dasar di MI PUI Kota Cimahi. *Jurnal Ilmu Kesehatan Bhakti Husada: Health Sciences Journal*, 13(01), 103-115.

BAB 13

AIR DAN FUNGSI NYA

Oleh Hendri Satria Kamal Uyun

13.1 Pendahuluan

Air adalah zat yang paling melimpah dalam sistem kehidupan, menyusun 70% atau lebih dari berat sebagian besar organisme. Organisme hidup pertama di Bumi hampir pasti muncul dalam lingkungan berair, dan jalannya evolusi telah dibentuk oleh sifat-sifat medium berair tempat kehidupan bermula (David L. Nelson, 2008)

Satu molekul air (H_2O) terdiri dari satu atom oksigen (O) yang bermuatan negatif parsial karena sifat elektronegatifnya yang tinggi, serta dua atom hidrogen (H) yang bermuatan positif parsial. Kedua atom hidrogen terhubung dengan oksigen melalui ikatan kovalen polar. Ketidakseimbangan distribusi muatan ini membuat air bersifat polar. Sifat khas air muncul dari interaksi antarmolekulnya, di mana atom hidrogen dari satu molekul tertarik ke atom oksigen molekul air lainnya, membentuk ikatan hidrogen yang memungkinkan molekul-molekul air saling terhubung (Retno Tri Astuti *et al.*, 2025).

Gaya tarik antar molekul air serta kecenderungan air untuk terionisasi, meskipun kecil, memiliki peran krusial dalam menentukan struktur dan fungsi biomolekul (David L. Nelson, 2008).

Molekul air dan produk ionisasinya, yaitu H^+ dan OH^- , secara mendalam memengaruhi struktur, perakitan mandiri (*self-assembly*), serta sifat semua komponen seluler, termasuk protein, asam nukleat, dan lipid. Interaksi nonkovalen yang menentukan kekuatan dan spesifisitas "pengenalan" antar biomolekul sangat dipengaruhi oleh sifat air sebagai pelarut, terutama kemampuannya membentuk ikatan hidrogen dengan dirinya sendiri maupun dengan zat terlarut (David L. Nelson, 2008).

13.2 Interaksi Lemah dalam Sistem Berair

Ikatan hidrogen antar molekul air menghasilkan gaya kohesif yang membuat air tetap dalam bentuk cair pada suhu ruang serta membentuk padatan kristalin (es) dengan susunan molekul yang sangat teratur pada suhu rendah. Biomolekul polar mudah larut dalam air karena dapat menggantikan interaksi antar molekul air dengan interaksi air-zat terlarut yang secara energi lebih menguntungkan (David L. Nelson, 2008).

Sebaliknya, biomolekul nonpolar memiliki kelarutan yang rendah dalam air karena mengganggu interaksi antar molekul air tetapi tidak mampu membentuk interaksi air-zat terlarut. Dalam larutan berair, molekul nonpolar cenderung berkumpul bersama (David L. Nelson, 2008)

Ikatan hidrogen, interaksi ionik, interaksi hidrofobik (dari bahasa Yunani, berarti "takut air"), serta interaksi van der Waals, meskipun secara individual lemah, secara kolektif memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap struktur tiga dimensi protein, asam nukleat, polisakarida, dan lipid membran (David L. Nelson, 2008)

Tabel 13.1. Titik beku, Titik Didih, dan Beberapa Pelarut sumber (David L. Nelson, 2008).

Pelarut	Titik beku (°C)	Titik leleh (°C)
Air	0	100
Metanol	-98	65
etanol	-117	78
Propanol	-127	97
Butanol	-90	117
Aseton	-95	56

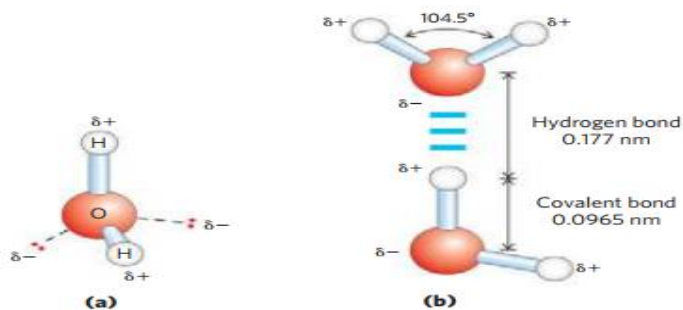
13.3 Ikatan Hidrogen Memberikan Air Sifat-Sifatnya yang Tidak Biasa

Air memiliki titik leleh, titik didih, dan panas penguapan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sebagian besar pelarut umum lainnya. Sifat-sifat yang tidak biasa ini disebabkan oleh gaya tarik-menarik antara molekul-molekul air yang berdekatan, yang

memberikan kohesi internal yang kuat pada air dalam bentuk cair. Jika kita meneliti struktur elektron molekul H_2O , kita dapat memahami penyebab dari gaya tarik-menarik antar molekul ini (David L. Nelson, 2008).

Setiap atom hidrogen dalam molekul air berbagi sepasang elektron dengan atom oksigen di pusatnya. Geometri molekul ini ditentukan oleh bentuk orbital elektron terluar dari atom oksigen, yang serupa dengan orbital ikatan sp^3 pada karbon. Orbital-orbital ini membentuk struktur menyerupai tetrahedron, dengan satu atom hidrogen di masing-masing dari dua sudutnya dan pasangan elektron tak terikat di dua sudut lainnya. Sudut ikatan H—O—H adalah $104,5^\circ$, sedikit lebih kecil dari $109,5^\circ$ pada tetrahedron sempurna karena adanya desakan dari orbital non-ikatan pada atom oksigen (David L. Nelson, 2008)

Inti atom oksigen menarik elektron lebih kuat dibandingkan dengan inti atom hidrogen (sebuah proton); dengan kata lain, oksigen lebih elektronegatif. Ini berarti bahwa elektron yang dibagi bersama lebih sering berada di sekitar atom oksigen daripada atom hidrogen. Akibat dari pembagian elektron yang tidak merata ini, terbentuk dua dipol listrik dalam molekul air, masing-masing sepanjang ikatan H—O . Setiap atom hidrogen memiliki muatan parsial positif ($+\delta$), sedangkan atom oksigen memiliki muatan parsial negatif dengan besaran yang setara dengan jumlah kedua muatan positif tersebut (-2δ). Akibatnya, terjadi gaya tarik elektrostatis antara atom oksigen dari satu molekul air dengan atom hidrogen dari molekul air lainnya, yang disebut sebagai ikatan hidrogen (David L. Nelson, 2008).



Gambar 13.1. Atom air sumber (David L. Nelson, 2008).

Ikatan hidrogen bersifat sekitar 10% kovalen, akibat tumpang tindih orbital ikatan, dan sekitar 90% elektrostatik. Pada suhu ruang, energi termal dalam larutan air (energi kinetik dari pergerakan atom dan molekul individu) memiliki besaran yang sebanding dengan energi yang diperlukan untuk memutuskan ikatan hidrogen. Ketika air dipanaskan, kenaikan suhu mencerminkan peningkatan kecepatan gerak molekul-molekul air (David L. Nelson, 2008).

Pada setiap saat, sebagian besar molekul dalam air cair terikat oleh ikatan hidrogen, tetapi umur setiap ikatan hidrogen hanya berkisar antara 1 hingga 20 pikodetik ($1 \text{ ps} = 10^{-12}$ detik). Ketika satu ikatan hidrogen terputus, ikatan baru segera terbentuk, baik dengan pasangan yang sama maupun dengan molekul lain, dalam waktu sekitar 0,1 ps. Ungkapan "flickering clusters" digunakan untuk menggambarkan kelompok molekul air yang terbentuk sesaat melalui ikatan hidrogen dalam air cair (David L. Nelson, 2008)

Gabungan dari semua ikatan hidrogen antar molekul H_2O memberikan kohesi internal yang sangat kuat pada air dalam bentuk cair. Selain itu, jaringan luas molekul air yang saling terhubung melalui ikatan hidrogen juga dapat membentuk jembatan antara zat terlarut, seperti protein dan asam nukleat. Jembatan ini memungkinkan molekul-molekul besar berinteraksi satu sama lain dalam jarak beberapa nanometer tanpa harus bersentuhan secara fisik (David L. Nelson, 2008).

13.4 Air Membentuk Ikatan Hidrogen dengan Zat Terlarut Polar

Ikatan hidrogen tidak hanya terjadi pada air. Ikatan ini mudah terbentuk antara atom elektronegatif (penerima hidrogen, biasanya oksigen atau nitrogen) dan atom hidrogen yang terikat secara kovalen pada atom elektronegatif lainnya (pendonor hidrogen) dalam molekul yang sama atau berbeda (Gambar 13.2–13.3) (Gomes *et al.*, 2015)

Atom hidrogen yang terikat kovalen pada atom karbon tidak berpartisipasi dalam pembentukan ikatan hidrogen, karena karbon hanya sedikit lebih elektronegatif dibandingkan hidrogen.

Akibatnya, ikatan C—H hanya bersifat sangat lemah polar. Hal ini menjelaskan mengapa butanol ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}_2\text{OH}$) memiliki titik didih yang relatif tinggi, yaitu 117°C , sedangkan butana ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}_3$) hanya memiliki titik didih $-0,5^\circ\text{C}$. Butanol memiliki gugus hidroksil ($-\text{OH}$) yang bersifat polar, sehingga dapat membentuk ikatan hidrogen antarmolekul (David L. Nelson, 2008). Biomolekul yang tidak bermuatan tetapi bersifat polar, seperti gula, mudah larut dalam air karena ikatan hidrogen antara gugus hidroksil atau oksigen karbonil dalam gula dengan molekul air yang bersifat polar memberikan efek stabilisasi. Alkohol, aldehida, keton, dan senyawa yang mengandung ikatan N—H semuanya dapat membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air (Gambar 2–4), sehingga cenderung larut dalam air (David L. Nelson, 2008).

13.5 Ionisasi Air, Asam Lemah, dan Basa Lemah

Meskipun banyak sifat pelarut air dapat dijelaskan berdasarkan molekul H_2O yang tidak bermuatan, derajat ionisasi air yang kecil menjadi ion hidrogen (H^+) dan ion hidroksida (OH^-) juga harus diperhitungkan. Seperti semua reaksi reversibel, ionisasi air dapat dijelaskan menggunakan konstanta kesetimbangan (David L. Nelson, 2008)

Ketika asam lemah dilarutkan dalam air, mereka menyumbangkan ion H^+ melalui proses ionisasi; sedangkan basa lemah mengonsumsi ion H^+ dengan cara berprotonasi. Proses-proses ini juga dikendalikan oleh konstanta kesetimbangan (David L. Nelson, 2008)

Konsentrasi total ion hidrogen dari semua sumber dapat diukur secara eksperimental dan dinyatakan sebagai pH larutan. Untuk memprediksi tingkat ionisasi zat terlarut dalam air, kita harus mempertimbangkan konstanta kesetimbangan yang relevan untuk setiap reaksi ionisasi. Oleh karena itu, kita akan membahas secara singkat tentang ionisasi air serta ionisasi asam dan basa lemah yang terlarut dalam air (David L. Nelson, 2008)

13.6 Air Berinteraksi Secara Elektrostatis dengan Zat Terlarut Bermuatan

Air adalah pelarut polar. Air dengan mudah melarutkan sebagian besar biomolekul, yang umumnya merupakan senyawa bermuatan atau polar. Senyawa yang mudah larut dalam air disebut hidrofilik (berasal dari bahasa Yunani, yang berarti "menyukai air"). Sebaliknya, pelarut nonpolar seperti kloroform dan benzena merupakan pelarut yang buruk bagi biomolekul polar tetapi dengan mudah melarutkan senyawa yang bersifat hidrofobik, yaitu molekul nonpolar seperti lipid dan lilin. (David L. Nelson, 2008).

Air melarutkan garam seperti NaCl dengan cara menghidrasi dan menstabilkan ion Na^+ dan Cl^- , sehingga melemahkan interaksi elektrostatis di antara keduanya dan menghambat kecenderungan mereka untuk bergabung dalam kisi kristal. Selain itu, air juga dengan mudah melarutkan biomolekul bermuatan, termasuk senyawa dengan gugus fungsi seperti asam karboksilat terionisasi ($-\text{COO}^-$), amina terprotonasi ($-\text{NH}_3^+$), serta ester atau anhidrida fosfat (David L. Nelson, 2008).

Air menggantikan ikatan hidrogen antar biomolekul yang sebelumnya menghubungkan zat terlarut satu sama lain dengan ikatan hidrogen antara zat terlarut dan air, sehingga dapat menutupi atau menghambat interaksi elektrostatis antar molekul zat terlarut (David L. Nelson, 2008).

13.7 Gas Nonpolar Sulit Larut dalam Air

Molekul gas yang memiliki peran biologis penting, seperti CO_2 , O_2 , dan N_2 , bersifat nonpolar. Dalam molekul O_2 dan N_2 , elektron dibagi secara merata antara kedua atomnya. Sementara itu, dalam CO_2 , setiap ikatan $\text{C}=\text{O}$ bersifat polar, tetapi kedua dipol tersebut saling berlawanan arah sehingga saling meniadakan (David L. Nelson, 2008)

Ketika molekul-molekul gas berpindah dari fase gas yang tidak teratur ke dalam larutan air, gerakan mereka menjadi lebih terbatas, begitu pula dengan gerakan molekul air. Hal ini menyebabkan penurunan entropi (tingkat keacakan sistem). Kombinasi sifat nonpolar gas-gas ini dan penurunan entropi saat

larut dalam air menyebabkan kelarutan mereka menjadi sangat rendah (David L. Nelson, 2008)

Beberapa organisme memiliki protein pengangkut yang larut dalam air (seperti hemoglobin dan mioglobin) yang membantu dalam transportasi O_2 . Sementara itu, karbon dioksida (CO_2) dalam larutan air dapat membentuk asam karbonat (H_2CO_3) dan diangkut dalam bentuk ion bikarbonat (HCO_3^-). Bikarbonat sangat larut dalam air (~ 100 g/L pada $25^\circ C$) dan dapat berada dalam bentuk bebas atau terikat pada hemoglobin (David L. Nelson, 2008)

Selain itu, tiga gas lain, yaitu NH_3 (amonia), NO (nitrogen monoksida), dan H_2S (hidrogen sulfida), juga memiliki peran biologis dalam beberapa organisme. Berbeda dengan gas nonpolar, ketiga gas ini bersifat polar, mudah larut dalam air, dan dapat mengalami ionisasi dalam larutan berair.

13.8 Fungsi air

1. Penyanggaan terhadap Perubahan pH dalam Sistem Biologis

Hampir setiap proses biologis bergantung pada pH; perubahan kecil dalam pH dapat menyebabkan perubahan besar dalam laju proses tersebut. Hal ini berlaku tidak hanya untuk reaksi yang secara langsung melibatkan ion H^+ , tetapi juga untuk reaksi di mana peran ion H^+ tampaknya tidak terlihat (David L. Nelson, 2008)

Enzim yang mengkatalisis reaksi seluler, serta banyak molekul yang menjadi substratnya, mengandung gugus yang dapat terionisasi dengan nilai pKa tertentu. Misalnya, gugus amino dan karboksil pada asam amino serta gugus fosfat pada nukleotida berfungsi sebagai asam lemah, di mana keadaan ioniknya ditentukan oleh pH lingkungan sekitarnya. (Jika suatu gugus ionisasi tersembunyi di dalam inti protein, jauh dari pelarut air, nilai pKa-nya atau pKa tampaknya dapat berbeda secara signifikan dari pKa-nya dalam air)(David L. Nelson, 2008).

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, interaksi ionik merupakan salah satu gaya yang menstabilkan struktur

molekul protein dan memungkinkan enzim mengenali serta berikatan dengan substratnya (David L. Nelson, 2008).

Sel dan organisme mempertahankan pH sitosol yang spesifik dan konstan, biasanya mendekati pH 7, untuk menjaga biomolekul dalam keadaan ionik optimalnya. Pada organisme multiseluler, pH cairan ekstraseluler juga diatur dengan ketat. Kekonstanan pH ini terutama dicapai melalui sistem buffer biologis, yaitu campuran asam lemah dan basa konjugatnya (David L. Nelson, 2008).

2. Air Dan Osmolaritas

Cairan dalam tubuh manusia terbagi menjadi dua kompartemen utama. Yang pertama adalah cairan intraseluler, yang mencakup sekitar dua pertiga dari total cairan tubuh dan berada di dalam sel. Sisanya, sekitar sepertiga, merupakan cairan ekstraseluler, yang kemudian terbagi lagi menjadi dua jenis, yaitu plasma darah yang terdapat di dalam pembuluh darah dan cairan interstisial yang mengisi ruang di antara sel-sel. Komponen utama cairan tubuh adalah air, yang berfungsi sebagai pelarut bagi berbagai zat kimia. Karena perannya ini, air mendominasi komposisi cairan tubuh, misalnya, dalam cairan plasma, air menyusun sekitar 91-92% dari total volumenya (Długaszek, 2019).

Setiap kompartemen cairan tubuh dipisahkan oleh membran seluler yang bersifat semipermeabel. Membran ini tersusun dari dua lapisan fosfolipid, di mana bagian nonpolar hanya memungkinkan molekul nonpolar untuk melewatinya. Sementara itu, molekul polar seperti air membutuhkan bantuan protein transporter yang terdapat pada membran untuk dapat melintasinya.

Protein yang berperan dalam mengangkut air terdapat dalam jumlah besar pada membran sel dan bekerja melalui mekanisme transportasi pasif. Oleh karena itu, air dapat bergerak bebas di antara berbagai kompartemen cairan dalam tubuh. Namun, hal ini tidak berlaku bagi molekul polar lainnya, seperti ion Na^+ , K^+ , dan HCO_3^- . Akibatnya, terjadi perbedaan konsentrasi zat terlarut di antara kompartemen tersebut. Sebagai respons alami, air akan berpindah dari area dengan

konsentrasi zat terlarut lebih rendah ke area dengan konsentrasi lebih tinggi. Proses ini dikenal sebagai osmosis (Hosseiniyan Khatibi *et al.*, 2019).

3. Asam dan Basa pada Tubuh

pH merupakan salah satu faktor utama dalam kehidupan, karena perubahan nilainya dapat memengaruhi berbagai proses fisiologis di dalam tubuh, baik pada tingkat seluler, jaringan, maupun sistemik. Pada tingkat sel, pH berperan dalam menjaga kelangsungan reaksi kimia, mendukung fungsi enzim dan protein, serta mengoptimalkan kerja organel. Di tingkat jaringan dan sistem organ, pH berkontribusi dalam mengatur aliran udara di paru-paru, menjaga keseimbangan hidrasi dan kejernihan kornea, serta memengaruhi eksitabilitas saraf dan otot—meningkat saat pH naik dan menurun saat pH turun. Secara sistemik, pH berperan dalam mengatur keseimbangan elektrolit plasma serta memperlancar sirkulasi darah ke seluruh tubuh (Occhipinti and Boron, 2015).

Tubuh mengandalkan berbagai mekanisme biokimia dan fisiologis untuk mempertahankan keseimbangan pH dalam kisaran normal, yaitu antara 7,35 hingga 7,45. Jika mekanisme ini tidak berfungsi, asam dapat terakumulasi hingga 22.000 mEq per hari, yang dapat menyebabkan pH menurun. Penurunan ini terjadi karena proses metabolisme tubuh menghasilkan limbah bersifat asam. Zat asam tersebut berasal dari pemecahan nutrisi dalam makanan, seperti karbohidrat, protein, dan lemak (Reynardi Sutanto and Ghina Rania, 2020). Metabolisme tubuh menghasilkan berbagai jenis asam, termasuk asam karbonat, asam sulfat, dan asam fosfat dari pemecahan protein, benda keton dari metabolisme lemak, serta asam laktat dan karbon dioksida (CO₂) dari pemecahan glukosa. Asam-asam ini dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori utama: asam volatil, seperti asam karbonat, yang dapat dengan mudah menguap; asam tetap (*fixed acid*), seperti asam sulfat dan asam fosfat, yang tidak dapat dipisahkan dari larutan; serta asam organik, seperti asam laktat, yang dihasilkan dari metabolisme anaerob (Reynardi Sutanto and Ghina Rania, 2020).

DAFTAR PUSTAKA

- David L. Nelson, M.M.C. (2008) *Lehninger Principles of Biochemistry 5th Edition*.
- Długaszek, M. (2019) 'Studies on relationships between essential and toxic elements in selected body fluids, cells and tissues', *Chemico-Biological Interactions*, 297, pp. 57–66.
- Gomes, N.G.M. *et al.* (2015) 'Can some marine-derived fungal metabolites become actual anticancer agents?', *Marine Drugs*, 13(6),
- Hosseiniyan Khatibi, S.M. *et al.* (2019) 'Osmolytes resist against harsh osmolarity: Something old something new', *Biochimie*, 158, pp. 156–164.
- Occhipinti, R. and Boron, W.F. (2015) 'Mathematical modeling of acid-base physiology', *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 117(1), pp. 43–58.
- Retno Tri Astuti *et al.* (2025) *BIOLOGI SEL DAN MOLEKULER*. 1st edn. Padang: Azzia Karya Bersama.
- Reynardi Sutanto and Ghina Rania (2020) 'Interaksi Biokimia pada Regulasi Cairan Tubuh: Sebuah Tinjauan Pustaka', *Khazanah: Jurnal Mahasiswa*, 12(1), pp. 18–24.

BIODATA PENULIS



apt. Nasri, S.Farm., M.Farm., A.BM., MBA.

Dosen Program Studi Sarjana Farmasi
Fakultas Farmasi Universitas Sumatera Utara

Penulis lahir di Medan tanggal 1 Mei 1997. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Sarjana Farmasi Fakultas Farmasi Universitas Sumatera Utara. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Fakultas Farmasi Universitas Sumatera Utara pada tahun 2019. Melanjutkan Pendidikan S2 pada Fakultas Farmasi Universitas Sumatera Utara pada tahun 2021, serta menyelesaikan Pendidikan profesi di Fakultas Farmasi Universitas Sumatera Utara pada tahun 2022. Disisi lain penulis juga telah menyelesaikan studi Associate Business Management di Open College Asia Ltd-UK pada tahun 2025 berbarengan dengan Master of Business Administration di Portman College Malaysia di tahun yang sama. Penulis juga telah menyelesaikan berbagai pelatihan dan sertifikasi dalam rangka peningkatan soft skill dan hard skill berupa *Certified Hypnotist (CH)*, *Certified Hypnotherapist (CHt)*, *Certified Public Speaking (CPS)*, *Certified Public Speaking Professional (CPSP)*, *Certified Riset Reviewer (CRR)*, *Certified Leadership Management Associate (CLMA)*, *Certified Excellent Trainer Professional (CETP)*, *Certified Hypnosis for Teaching (CHTc)*, *Certified Neuro Linguistic Programming for Teaching (CNLPTc)*, *Certified Riset Reviewer (CRR)*, *Certified Medical Law and Ethic (CMLE)*, *Certified Legal Communication Technique (CLCT)*,

Certified Tax Management (CTM), Certified of Basic CRISPR (CBC.Tech). Saat ini penulis juga aktif menulis pada jurnal baik nasional maupun internasional terakreditasi dan non terakreditasi. Memiliki H-index Scopus 5 dan H-index Google Scholar 13. ID Scopus: 57223298392. ID Sinta: 6938703. ID Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=9jpE12sAAAAJ&hl=id>.

BIODATA PENULIS



Dr. Linda Hevira, S.Si, M.Si.

Dosen Kimia

Fakultas Kesehatan

Universitas Mohammad Natsir Bukittinggi

Penulis lahir di Dumai, 2 Oktober 1974. Penulis menyelesaikan pendidikan S1, S2 dan S3 pada Jurusan Kimia Universitas Andalas, kemudian melanjutkan Post Doctoral di Pusat Riset Biomassa dan Bioproduk, Kelompok Riset Rekayasa Polisakarida, pada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Cibinong, Jawa Barat. Penulis telah menulis beberapa buku dan sudah menerbitkan artikel di jurnal nasional dan internasional Scopus terkait Kimia dan Farmasi. Saat ini penulis aktif sebagai dosen Kimia pada Program Studi Farmasi dan Gizi, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Mohammad Natsir Bukittinggi.

BIODATA PENULIS



Syahraini Ritonga, S.Pd., M.Pd.

Dosen Program Studi Pendidikan Biologi

Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Al Washliyah

Penulis lahir di Aek Kota Batu tanggal 14 Oktober 1987. Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Pendidikan Biologi Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Al Washliyah. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) dan Magister (S2) di Program Studi Pendidikan Biologi Universitas Negeri Medan (UNIMED).

BIODATA PENULIS



Iksen, S. Farm., M.Si., Ph.D.

Dosen Program Studi Sarjana Farmasi
Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Senior Medan

Iksen adalah seorang peneliti dan dosen berpengalaman yang mengkhususkan diri dalam farmakologi dan toksikologi, terutama dalam penemuan dan pengembangan obat. Ia meraih gelar Ph.D. dari Chulalongkorn University dan telah aktif dalam penelitian akademik maupun industri. Keahliannya mencakup farmakologi kanker, bioinformatika, serta pemodelan bioluminesensi untuk penelitian kanker. Saat ini, ia mengajar di Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Senior Medan serta membimbing penelitian mahasiswa sarjana. Ia telah menerbitkan berbagai artikel di jurnal bereputasi tinggi, menjadi reviewer pada jurnal internasional bereputasi dan berfaktor dampak serta anggota dewan editorial, dan meraih berbagai penghargaan internasional maupun nasional. Penelitiannya berfokus pada pemodelan komputasi untuk interaksi obat-target dan pengembangan inhibitor PD-L1 dan target lain pada kanker.

BIODATA PENULIS



Erlinda Ningsih, ST.MT

Dosen Jurusan Teknik Kimia ITATS

Penulis lahir di Bangkalan tanggal 09 Juni 1984. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Menyelesaikan Pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Kimia dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Kimia. Penulis menekuni bidang Energi terbarukan dan material maju.

BIODATA PENULIS



Musrifah Tahar, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Pendidikan Biologi
Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan
Universitas Sulawesi Barat

Penulis lahir di Watubangga tanggal 30 Oktober 1995. Merupakan anak terakhir dari tiga bersaudara Dan sekarang sebagai seorang istri dengan satu orang anak. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia Universitas Hasanuddin dan melanjutkan Pendidikan S2 pada Jurusan Kimia Universitas Hasanuddin, yang berfokus pada bidang Kimia Organik.

Pada tahun 2022 penulis lulus seleksi Aparatur Sipil Negara (ASN) sebagai seorang dosen di Program Studi Pendidikan Biologi Universitas Sulawesi Barat dan telah melaksanakan kewajibannya dalam Pengajaran, Penelitian dan Pengabdian Kepada masyarakat sebagai wujud Tridharma Perguruan Tinggi.

Setelah satu tahun bertugas menjadi seorang dosen, penulis berkomitmen agar terus melakukan publikasi, tidak hanya publikasi artikel ilmiah yang dimuat dalam jurnal penelitian tetapi juga ikut berkontribusi dalam penyusunan buku. Buku ini merupakan buku keempat yang penulis tulis dan penulis berharap kedepannya akan banyak buku yang ia terbitkan.

BIODATA PENULIS



Dr. Aliyah Fahmi S.Si, M.Si

Ketertarikan penulis terhadap ilmu kimia sejalan dengan studi Penulis yang berkaitan dengan Ilmu Kimia. Penulis memulai perkuliahan pada program studi D3 Analis Kimia di Universitas Sumatera Utara, yang dilanjutkan S1 Kimia pada tahun 2005 s/d 2007. Penulis kemudian melanjutkan perkuliahan pada jenjang magister di tahun 2014 s/d 2016, jenjang doktoral di tahun 2020 s/d 2024, dan menjadi Dosen Kimia di Universitas Efarina, Pematang Siantar. Penulis ditempatkan di Fakultas Kesehatan, tepatnya di Program Studi D3 Analis Kesehatan. Saat ini, Penulis sedang dalam studi S3 terkait Ilmu Kimia. Beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh Penulis didanai oleh LPDP dan Kemenristek DIKTI. Selain menjadi Peneliti, Penulis juga aktif menulis buku dengan harapan dapat memberikan kontribusi positif bagi bangsa dan negara Indonesia. Email Penulis: aliyahfahmi0984@gmail.com

BIODATA PENULIS



Alfiah Alif, S.Si., M.Si

Dosen Program Studi Kimia
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Sembilanbelas November Kolaka

Penulis lahir di Makassar, tanggal 16 Agustus 1992. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Sembilanbelas November Kolaka. Penulis menjalani pendidikan S1 pada 2010- 2015 di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Hasanuddin dan S2 pada 2016-2018 di Departemen Kimia FMIPA IPB University. Penulis aktif mengajar di Universitas Sembilanbelas November Kolaka sejak 2021-Sekarang di bidang biokimia. Penulis merupakan anggota Himpunan Kimiawan Indonesia (HKI).

BIODATA PENULIS



Ayusti Dirga, S.Si., M.Sc.

Dosen Program Studi Diploma IV Teknologi Laboratorium Medis
Fakultas Teknologi Kesehatan Universitas Megarezky

Penulis lahir di Watampone tanggal 17 Agustus 1991. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Diploma IV Teknologi Laboratorium Medis Fakultas Teknologi Kesehatan Universitas Megarezky. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia di Universitas Hasanuddin dan melanjutkan S2 pada Jurusan Kimia di Universitas Gadjah Mada. Penulis menekuni bidang Toksikologi dan saat ini aktif dalam mengajar dan membimbing mahasiswa dalam pengajaran dan penelitian.

BIODATA PENULIS

Dr. Dessy Arisanty, M.Sc

Dr. Dessy Arisanty, M.Sc lahir di Padang, pada 12 Januari 1979. Ia tercatat sebagai lulusan Sarjana FMIPA Universitas Andalas, jenjang Master (S2) di Biomedical Department of Medical Faculty and Health Sciences Universiti Putra Malaysia dibidang *Medical Biochemistry*. Selanjutnya studi Doktor pada Program Doktor Ilmu Biomedis dengan kajian *Molecular Cancer of Epigenetic*. Wanita yang kerap disapa Dessy ini adalah anak dari pasangan Anwar Manan (ayah) dan Dasmiaty (ibu). Penulis sebagai staf pengajar di Departmen Biokimia Fakultas Kedokteran Univeristas Andalas (UNAND). Dan saat menulis ini, penulis menjabat sebagai Ketua Program Studi Ilmu Biomedis Program Sarjana, Fakultas Kedokteran UNAND. Penulis bukanlah orang baru di dunia Pendidikan. Berbagai kegiatan ilmiah dan banyak artikel yang sudah dipublikasikan. Penghargaan yang pernah diraih adalah sebagai lulusan terbaik Fakultas MIPA, Medali Perak pada ITEX exhibition Malaysia. Medali emas pada Inovation Technology 2023.

BIODATA PENULIS



Nurul Febriani Putri, M.Si.

Dosen Program Studi Bioteknologi
Jurusan Sains Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie

Penulis lahir di Palu tanggal 1 Februari 1993. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Bioteknologi Jurusan Sains, Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia dan melanjutkan S2 pada Jurusan Bioteknologi. Penulis bekerja sebagai Dosen PNS di Program Studi Bioteknologi, Jurusan SAINS Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie 2023-sekarang. Penulis aktif mengikuti seminar, mempublikasi artikel pada jurnal internasional bereputasi dengan judul “Phosphate Addition Play Important Role on *Escherichia coli* Cell Attachment under Aerobic Condition” dan aktif sebagai penulis buku, seperti buku : Dogma Sentral Biologi Molekuler (ISBN 978-634-7115-31-7).

BIODATA PENULIS



Apt.Neng Mira Atjo,S.Farm,M.Biomed

Dosen Program Studi DIII Farmasi

Fakultas Ilmu-ilmu Kesehatan Universitas Sulawesi Barat

Neng Mira Atjo lahir di Majene, pada 14 April 1985. Ia tercatat sebagai lulusan Profesi Apoteker di Universitas Hasanuddin dan menempuh S2 Ilmu Biomedik Konsentrasi Ilmu Biokimia dan Biologi Molekuler di Pascasarjana Universitas Hasanuddin Makassar. Wanita yang kadang disapa mira adalah anak kelima dari pasangan Almarhum Atjo Bulu dan Almarhum Hj.Raden Imas Ida dan sangat aktif dalam organisasi profesi IAI Cab.Kab.Majene Sulawesi Barat, serta sangat menyukai traveling, Ia juga sedang bertugas di Universitas Sulawesi Barat sebagai dosen tetap pada program studi DIII Farmasi Fakultas Ilmu-ilmu Kesehatan Universitas Sulawesi Barat.

BIODATA PENULIS



apt Hendri Satria kamal Uyun M.Farm

Dosen Program Studi S1 Farmasi
Sekolah Tinggi Ilmu Farmasi Padang (STIFARM Padang)

Penulis lahir di Tanjung Pinang tanggal 9 Agustus 1993. Penulis adalah dosen tetap pada bidang Biologi Farmasi STIFARM Padang. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 Farmasi Pada Sekolah Tinggi Farmasi Indonesia Perintis Padang kemudian melanjutkan pendidikan Profesi Apoteker Di Fakultas Farmasi Universitas Andalas dan melanjutkan Pendidikan S2 Di Fakultas Farmasi Universitas Andalas. Mata kuliah yang diampu antara lain Botani Farmakognosi 1, Farmakognosi 2 dan Fitokimia. Penulis juga telah menerbitkan buku diantaranya adalah Farmakognosi, Ilmu bahan Makanan dan Ilmu pangan. Selama menjalankan tridarma perguruan tinggi dibidang penelitian, penulis berhasil mendapatkan hibah untuk Penelitian Dosen Pemula oleh Kemdikbudristek Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi, Direktorat Riset, Teknologi dan Pengabdian Kepada Masyarakat sebagai pemberi dana penelitian tahun 2023 dan 2024. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada STIFARM Padang atas dukungannya dalam penulisan dan penerbitan buku ini.