

BIOKIMIA VETERINER

PENULIS:

Ali Makmur
Risky Nurul Fadlila
Alfiah Alif
Elva Stiawan
Ira Oktavia
Waode Rustiah
Amalyah Febryanti
Dara Juliana

ISBN 978-623-125-163-0



9

786231

259530

BIOKIMIA VETERINER

**Ali Makmur
Risky Nurul Fadlila
Alfiah Alif
Elva Stiawan
Ira Oktavia
Waode Rustiah
Amalyah Febryanti
Dara Juliana**



GETPRESS INDONESIA

BIOKIMIA VETERINER

Penulis :

Ali Makmur
Risky Nurul Fadlila
Alfiah Alif
Elva Stiawan
Ira Oktavia
Waode Rustiah
Amalyah Febryanti
Dara Juliana

ISBN : 978-623-125-953-0

Editor : Dr. Oktavianis, Mbiomed.

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd.

PENERBIT GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tengah Padang Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Agustus 2025

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

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karunia-Nya buku Biokimia Veteriner ini dapat tersusun dengan baik. Buku ini disusun sebagai upaya menyediakan referensi komprehensif mengenai biokimia yang berfokus pada hewan, mulai dari pengenalan dasar hingga aspek metabolisme makronutrien dan mikronutrien, termasuk karbohidrat, lipid, asam nukleat, asam amino, protein, vitamin, mineral, serta enzim. Dengan menguraikan hubungan biokimia dengan kesehatan dan produktivitas ternak, buku ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mendalam bagi mahasiswa, praktisi, dan akademisi di bidang kedokteran hewan serta nutrisi ternak. Semoga buku ini dapat menjadi sumber pengetahuan yang bermanfaat dalam mendukung pengembangan ilmu dan praktik veteriner di Indonesia.

Padang, Juli 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vi
BAB 1 PENGANTAR BIOKIMIA VETERINER.....	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Sejarah Perkembangan Biokimia.....	3
1.3 Komponen Biokimia Dan Kimiawi Sel	6
1.4 Hubungan Ilmu Biokimia Veteriner	9
DAFTAR PUSTAKA.....	19
BAB 2 KARBOHIDRAT	21
2.1 Pendahuluan Karbohidrat	21
2.2 Fungsi Karbohidrat dalam Tubuh Ternak.....	31
2.3 Sumber Karbohidrat untuk Pakan Ternak.....	33
2.4 Proses Pencernaan Ruminansia.....	33
2.5 Metabolisme Karbohidrat pada Ruminansia	35
DAFTAR PUSTAKA.....	38
BAB 3 LIPID	41
3.1 Pendahuluan	41
3.2 Struktur dan Klasifikasi Lipid	42
3.3 Jalur β -Oksidasi dan Sintesis Asam Lemak.....	45
3.4 Metabolisme Kolesterol dan Lipoprotein.....	47
3.5 Gangguan Metabolisme Lemak pada Hewan	49
3.6 Kebutuhan Lemak dalam Nutrisi Veteriner	50
3.7 Penutup.....	52
DAFTAR PUSTAKA.....	54
BAB 4 ASAM NUKLEAT	61
4.1 Struktur Monomer dan Makromolekul Pembawa Informasi Genetik.....	62
4.2 Fungsi Makromolekul Pembawa Informasi Genetik.....	69
4.3 Teknik Laboratorium Dasar terkait Struktur Asam Nukleat...	74
DAFTAR PUSTAKA.....	78

BAB 5 ASAM AMINO DAN PROTEIN.....	79
5.1 Asam Amino	79
5.2 Protein.....	88
DAFTAR PUSTAKA	94
BAB 6 VITAMIN	95
6.1 Pendahuluan	95
6.2 Klasifikasi dan Karakteristik Vitamin	96
6.3 Penutup.....	124
DAFTAR PUSTAKA	127
BAB 7 MINERAL.....	129
7.1 Pendahuluan	129
7.2 Klasifikasi Mineral	130
7.3 Peran Biokimia Mineral.....	132
7.4 Metabolisme Mineral dalam Tubuh Hewan	135
7.5 Defisiensi dan Toksisitas Mineral.....	138
7.6 Interaksi Mineral dengan Senyawa Lain.....	140
7.7 Implikasi Biokimia Mineral terhadap Kesehatan dan Produktivitas Ternak	142
DAFTAR PUSTAKA	146
BAB 8 ENZIM	153
8.1 Pengertian Enzim	153
8.2 Klasifikasi Enzim	158
8.3 Sifat Enzim	162
8.4 Struktur Enzim	163
8.5 Struktur Enzim dan Pengikatan Substrat.....	165
8.6 Biodegradasi Enzim	167
8.7 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Aktivitas Enzim.....	169
8.8 Imobilisasi Enzim.....	170
DAFTAR PUSTAKA	172
BIODATA PENULIS	175

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Proses penggilingan dan pemeriksaan komposisi kimia daging	8
Gambar 2. 1. Struktur Molekul Karbohidrat	23
Gambar 2. 2. Klasifikasi Karbohidrat	27
Gambar 2. 3. Metabolisme Karbohidrat pada Ruminansia	36
Gambar 3. 1. Klasifikasi Lipid	43
Gambar 3. 2. Struktur Lipid	44
Gambar 3. 3. Proses β -oksidasi asam lemak	45
Gambar 3. 4. Sintesis Asam Lemak	46
Gambar 3. 5. Peran kolestrol dalam kesehatan jantung	48
Gambar 3. 6. Peran lemak dalam nutrisi hewan	50
Gambar 4. 1. Struktur umum nukleotida yang terdiri atas basa dan gula (di dalam tanda kotak) serta gugus fosfat	63
Gambar 4. 2. Beberapa contoh nukleotida kelompok purin (atas) dan pirimidin (bawah) dengan sejumlah gugus fungsi yang diberi tanda lingkaran sebagai pembeda	64
Gambar 4. 3. Ikatan β -N-Glikosidik di dalam nukelotida (diberi tanda lingkaran)	65
Gambar 4. 4. Ikatan hidrogen antara Adenin-Timin (atas) dan Guanin-Sitosin (bawah)	67
Gambar 4. 5. Salah satu contoh bentuk RNA yang dapat saling berinteraksi secara intramolekuler	68
Gambar 4. 6. Skema percobaan Fred Griffith pada tahun 1928	70
Gambar 5. 1. Proses pembentukan ikatan peptida antar asam amino	80
Gambar 5. 2. Struktur primer dan sekunder protein	91
Gambar 5. 3. Struktur tersier protein lisozim	92
Gambar 5. 4. Struktur kuartener protein hemoglobin	93

Gambar 8. 1. Mekanisme Inhibitor Kompetitif.....	156
Gambar 8. 2. Mekanisme Inhibitor Non-Kompetitif.....	157
Gambar 8. 3. Mekanisme Inhibitor Alosterik.....	158
Gambar 8. 4. Berbagai Jenis Amilase.....	159
Gambar 8. 5. Struktural Enzim.....	164
Gambar 8. 6. Representasi Pengikatan Substrat Ke Situs Aktif Molekul Enzim	166
Gambar 8. 7. Komponen Haloenzim	167
Gambar 8. 8. Hidrolisis Selulosa Oleh Glukanase dan Glukosidase	168
Gambar 8. 9. Reaksi Enzim Bebas dan Enzim Terimmobilisasi	170
Gambar 8. 10. Metode Immobilisasi Enzim	171

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1. Komponen Utama Penyusun Biomolekul.....	7
Tabel 2. 1. Perbandingan Karbohidrat Sederhana dan Kompleks	25
Tabel 5. 1. Daftar jenis asam-amino dan strukturnya	81
Tabel 5. 2. Tipe asam amino berdasarkan polaritas -R	86
Tabel 5. 3. Jenis asam amino berdasarkan jenis -R	87
Tabel 5. 4. Jenis asam amino berdasarkan sumber perolehan.....	88

BAB 1

PENGANTAR BIOKIMIA

VETERINER

Oleh Ali Makmur

1.1 Pendahuluan

Biokimia adalah cabang ilmu yang menggabungkan biologi dan kimia untuk memahami proses molekuler yang terjadi di dalam organisme hidup. Fokus utama biokimia adalah mempelajari struktur dan fungsi biomolekul seperti karbohidrat, protein, lipid, asam nukleat dan unsur melekul kecil lainnya. Perkembangan biokimia veteriner mencerminkan evolusi pemahaman manusia tentang biologi, kimia dan kesehatan hewan. Dalam konteks veteriner, biokimia memberikan kerangka untuk memahami bagaimana molekul-molekul ini bekerja sama untuk mendukung fungsi tubuh hewan, seperti pertumbuhan, reproduksi, produksi energi dan adaptasi terhadap lingkungan. Selain itu, biokimia juga menjadi dasar untuk memahami bagaimana gangguan pada tingkat molekuler dapat menyebabkan penyakit. Ilmu biokimia juga mempelajari proses kehidupan yang dimulai dari sel, karena sel adalah satuan terkecil dari kehidupan (Astuti, 2009). Biokimia veteriner yang fokus pada studi mengenai reaksi-reaksi kimia dalam tubuh hewan, baik itu hewan ternak, hewan peliharaan, maupun satwa liar. Ilmu ini menjadi

fondasi penting untuk memahami bagaimana tubuh hewan berfungsi secara normal pada tingkat molekuler, serta bagaimana perubahan dalam proses biokimia dapat menandakan atau menyebabkan gangguan kesehatan. Pemahaman tentang biokimia sangat krusial dalam dunia kedokteran hewan karena berkaitan erat dengan berbagai aspek seperti diagnosis, terapi, nutrisi, fisiologi, dan toksikologi hewan. Dalam praktik veteriner, wawasan biokimia memberikan kemampuan kepada dokter hewan untuk membaca dan memahami hasil pemeriksaan laboratorium, termasuk analisis darah, kadar enzim, hormon, dan elektrolit. Biokimia juga memungkinkan pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme penyakit metabolik, gangguan hormonal, serta kelainan enzimatik. Selain itu, biokimia memiliki kontribusi besar dalam pengembangan berbagai produk kesehatan hewan, seperti vaksin, obat-obatan, dan suplemen nutrisi.

Sel merupakan unit dasar kehidupan yang memiliki struktur dan organisasi yang khas. Keistimewaan ini dipelajari dalam biokimia melalui prinsip-prinsip biologi dan kimia. Biokimia secara bersamaan mengkaji aspek biologis dan kimia dari molekul-molekul yang menyusun sel. Berbeda dengan benda mati, makhluk hidup memiliki tiga karakteristik utama: tersusun secara kompleks namun sangat teratur, mampu menjaga keteraturan internal di tengah lingkungan yang cenderung kacau (sesuai Hukum Termodinamika II), serta memiliki kemampuan untuk mereplikasi atau berkembang biak. (Wahyudiati, 2017)

Perbedaan perspektif antara ilmu kimia dan biologi telah dipersatukan melalui suatu cabang ilmu sains yang secara khusus mengkaji organisme hidup dan proses-proses kimiawi yang berlangsung di dalamnya, yakni biokimia. Biokimia merupakan disiplin interdisipliner yang menjembatani ilmu kimia dengan berbagai cabang biologi, terutama biologi sel dan molekuler, genetika, bioteknologi, serta sejumlah bidang biologi lainnya. Secara spesifik, biokimia mempelajari struktur sel penyusun makhluk hidup beserta komponen kimiawinya, sifat-sifat senyawa penyusun sel yang berkaitan dengan faktor genetik, pertumbuhan, dan aktivitas enzimatik sebagai biokatalis dalam proses metabolisme. Selain itu, biokimia juga menelaah reaksi-reaksi kimia yang terjadi di dalam sel, senyawa kimia yang mendukung berbagai fungsi biologis, serta mekanisme pemanfaatan dan produksi energi dalam setiap aktivitas seluler makhluk hidup. (David *et al.*, 2005).

1.2 Sejarah Perkembangan Biokimia

Biokimia memiliki akar sejarah panjang, yang dimulai dari pengamatan dasar tentang komposisi kimia makhluk hidup hingga menjadi disiplin ilmu modern yang sangat terintegrasi dengan berbagai bidang, termasuk kedokteran hewan. Biokimia berasal dari bahasa Yunani *bios* yang berarti "kehidupan" dan *chemis* yang berarti "kimia", yang secara umum didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari dasar-dasar kimia dari kehidupan. Istilah *biokimia* pertama kali diperkenalkan oleh Karl Neuberg, seorang ahli kimia asal Jerman, pada tahun 1903. Namun, jauh sebelum itu, pada pertengahan abad ke-18, Karl Wilhelm Scheele,

seorang kimiawan asal Swedia, telah melakukan penelitian mengenai komposisi kimia jaringan pada tumbuhan dan hewan, serta berhasil mengisolasi beberapa senyawa kimia seperti asam oksalat, asam laktat, asam sitrat, ester, dan kasein dari bahan alami. Pada awal abad ke-19, tepatnya tahun 1828, Friedrich Wohler menunjukkan bahwa urea, senyawa yang secara alami ditemukan dalam urin, dapat disintesis di laboratorium melalui pemanasan alkali sianat dengan garam amonium. Penemuan ini menjadi tonggak penting dalam sejarah biokimia karena menantang pandangan saat itu bahwa senyawa organik hanya dapat dihasilkan oleh organisme hidup (McKee & McKee, 2019).

Perkembangan biokimia selanjutnya dipercepat oleh penelitian Eduard dan Hans Buchner, yang berhasil membuktikan bahwa ekstrak sel ragi yang telah mati masih mampu mengkatalisis fermentasi gula menjadi alkohol. Temuan ini membuka kemungkinan analisis reaksi biokimia secara *in vitro* (di luar organisme hidup), yang merupakan langkah awal dalam studi laboratorium terhadap proses-proses biokimia. Penemuan penting lainnya datang dari J.B. Sumner pada tahun 1926, yang menunjukkan bahwa enzim urease dari biji *jack bean* dapat dikristalisasi, membuktikan bahwa enzim-dengan strukturnya-dapat dipelajari secara fisik dan kimiawi di laboratorium. Seiring waktu, perkembangan teknologi pengamatan seperti mikroskop cahaya dan mikroskop elektron memberikan kontribusi signifikan dalam pemahaman struktur sel dan molekul-molekul biokimia. Dimulai oleh observasi sel oleh Robert Hooke pada abad ke-17, hingga pemanfaatan mikroskop elektron pada abad ke-20, kemajuan ini memungkinkan

identifikasi lebih mendalam terhadap struktur senyawa biokimia dan jalur reaksi metabolik di dalam sel.

Pada dekade 1970-an, Paul Berg melakukan eksperimen rekombinasi DNA dengan menyambungkan DNA virus, yang menjadi landasan awal bioteknologi modern dan membuka jalan bagi penerapan biokimia di berbagai bidang. Secara umum, abad ke-20 ditandai oleh kemajuan pesat dalam biokimia, antara lain melalui pengembangan metode analisis kromatografi, penemuan jalur antara dalam metabolisme karbohidrat, lemak, dan protein, serta penentuan struktur protein (primer, sekunder, tersier, dan kuartener), DNA, dan RNA, yang sangat penting bagi pemahaman mekanisme dasar kehidupan. Tujuan utama mempelajari biokimia adalah untuk mendeskripsikan struktur, organisasi, dan fungsi molekul biologis pada tingkat molekuler, serta memahami bagaimana organisme membentuk struktur supramolekul mulai dari sel, jaringan, organ, hingga sistem organ. Selain itu, biokimia mempelajari mekanisme reaksi kimia dalam sel, terutama yang berkaitan dengan reproduksi, pertumbuhan, kematian, serta penyimpanan dan transmisi informasi genetik. Proses metabolisme sel dan peran enzim sebagai biokatalis juga menjadi fokus utama dalam kajian ini. Manfaat studi biokimia sangat luas, mencakup berbagai bidang seperti kedokteran hewan, kedokteran umum, pertanian, farmasi, dan nutrisi, baik dalam konteks penelitian laboratorium maupun penerapan praktis dalam kehidupan sehari-hari (Poedjiadi dan Supriyanti, 2009).

1.3 Komponen Biokima dan Kimiawi Sel

Komponen biokimia dalam sel terdiri dari molekul-molekul esensial yang berperan dalam membentuk dan mempertahankan kehidupan sel, serta memungkinkan berlangsungnya berbagai aktivitas biologis. Secara umum, komponen ini terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu komponen anorganik dan organik. Komponen anorganik mencakup air dan berbagai ion mineral seperti natrium, kalium, kalsium, dan magnesium. Air berperan sebagai pelarut utama di dalam sel yang menjadi medium bagi reaksi kimia, sedangkan ion-ion mineral memiliki fungsi penting dalam menjaga keseimbangan ion, mendukung kerja enzim, serta mengatur tekanan osmotik sel.

Sementara itu, komponen organik dalam sel meliputi karbohidrat, lipid, protein, dan asam nukleat. Karbohidrat berperan sebagai sumber energi utama sekaligus cadangan energi. Pada tumbuhan dan sebagian mikroorganisme, karbohidrat seperti selulosa juga berfungsi sebagai bahan penyusun dinding sel. Lipid atau lemak memiliki fungsi vital dalam membentuk struktur membran sel serta menyimpan energi dalam jangka panjang. Fosfolipid merupakan jenis lipid yang dominan dalam membentuk membran sel, sedangkan kolesterol berperan dalam menjaga kestabilan serta kelenturan membran tersebut.

Komponen kimia dalam sel disusun oleh senyawa-senyawa organik dan disusun oleh beberapa molekul terbesar penyusun makhluk hidup yang dikenal dengan makromolekul. Makromolekul tersebut juga disebut biomolekul karena molekul-molekul tersebut yang menjadi penyusun suatu makhluk hidup baik dari organisme paling

sederhana maupun yang paling kompleks (Sukaryawan dan Sari, 2022). Makromolekul tersebut adalah karbohidrat, protein, lipid, asam nukleat, vitamin dan mineral yaitu sebagai materi dasar pembangun sel atau organisme hidup. Setiap biomolekul tersebut memiliki keunikan dan ciri khas masing-masing yang bervariasi dalam ukuran struktur dan fungsi dan disusun oleh senyawa-senyawa sederhana disebut mikromolekul. Makromolekul karbohidrat disusun oleh tiga monosakarida utama, Makromolekul protein disusun oleh 20 asam amino, makromolekul lipid disusun oleh tujuh komponen utama dan asam nukleat disusun oleh delapan komponen utama. Tabel dibawah ini menunjukkan komponen penyusun biomolekul.

Tabel 1. 1. Komponen Utama Penyusun Biomolekul

No	Biomelekul	Fungsi Utama	Contoh
1	Karbohidrat	Sumber energi Cadangan Energi Pembentuk struktur	Glukosa Glikogen, Selulosa, Maltosa, Amilum dan Sukrosa
2	Lipid	Penyusun membran sel Penahan Panas & benturan Cadangan Energi	Fosfolipid Lemak tubuh
3	Asam Nukleat	Penyimpan dan pembawa informasi genetik Penyusun ribosom	DNA, mRNA, tRNA rRNA

No	Biomelekul	Fungsi Utama	Contoh
4	Asam Amino dan Protein	Pembentuk struktur, Biokatalis/ Enzim	Daging, bulu, kulit Semua enzim
5	Vitamin	Penunjang kinerja berbagai organ tubuh	vitamin A,D,E dan K vitamin B dan C
6	Mineral	Membantu proses metabolisme tubuh, yaitu menjadi bahan baku kinerja enzim	Fosfor, Kalsium, Magnesium, Natrium, Yodium, Selenium dan Kromium



Gambar 1. 1. Proses penggilingan dan pemeriksaan komposisi kimia daging

1.4 Hubungan Ilmu Biokimia Veteriner

Biokimia tidak berdiri sendiri, tetapi saling berhubungan dengan disiplin ilmu lain khususnya biokimia veteriner seperti dalam ilmu fisiologi veteriner biokimia memberikan penjelasan molekuler untuk fungsi organ dan jaringan hewan, farmakologi memberikan pemahaman tentang bagaimana obat dapat bekerja di tingkat molekuler pada hewan, patologi dapat menganalisis perubahan biokimia yang terjadi pada kondisi penyakit hewan dan nutrisi hubungan antara kebutuhan nutrisi dan metabolisme pada hewan.

1. Fisiologi Veteriner

Fisiologi veteriner adalah cabang ilmu yang mempelajari fungsi-fungsi tubuh hewan secara normal, dari tingkat seluler hingga sistem organ, serta bagaimana proses-proses biologis tersebut berinteraksi untuk mempertahankan homeostasis atau keseimbangan internal tubuh. Ilmu ini merupakan bagian inti dari kedokteran hewan karena memberikan pemahaman mendalam mengenai bagaimana organ-organ seperti jantung, paru-paru, ginjal, hati, sistem saraf, dan sistem reproduksi bekerja pada berbagai jenis hewan, baik hewan domestik, ternak, maupun satwa liar. Dalam konteks hewan, biokimia menjadi dasar pemahaman tentang bagaimana tubuh hewan memproses zat makanan, memproduksi energi, dan menjalankan fungsi biologis lainnya. Ilmu ini memberikan pemahaman menyeluruh tentang bagaimana molekul-molekul seperti enzim, hormon, asam amino, lipid, dan karbohidrat berperan dalam

mendukung kehidupan. Fisiologi hewan, di sisi lain, mempelajari fungsi tubuh hewan dari tingkat seluler hingga sistem organ. Maka dari itu, fisiologi dan biokimia adalah dua ilmu yang saling bergantung dan tidak dapat dipisahkan dalam studi tentang tubuh hewan.

Salah satu aspek penting dari biokimia dalam fisiologi adalah proses metabolisme. Hewan memerlukan energi untuk menjalankan berbagai aktivitas biologis seperti gerakan, pertumbuhan, dan reproduksi. Energi ini diperoleh melalui reaksi metabolik yang diatur oleh enzim, yang semuanya dijelaskan dalam ilmu biokimia. Proses seperti glikolisis, siklus Krebs, dan fosforilasi oksidatif merupakan jalur utama dalam produksi energi di tingkat seluler. Pemahaman terhadap jalur-jalur ini penting dalam fisiologi karena setiap organ atau jaringan memiliki kebutuhan dan cara kerja metabolisme yang berbeda. Sebagai contoh, otot rangka dan otot jantung memiliki preferensi substrat energi yang berbeda, dan gangguan pada jalur metabolik bisa menimbulkan kelainan fisiologis. Biokimia juga penting dalam memahami fungsi hormon dan enzim yang berperan sebagai pengatur utama proses fisiologis. Hormon-hormon seperti insulin, glukagon, kortisol, dan hormon tiroid mengatur metabolisme, pertumbuhan, suhu tubuh, dan respon terhadap stres. Semua hormon ini bekerja melalui mekanisme biokimiawi, yang memengaruhi ekspresi gen, aktivitas enzim, dan perubahan struktur protein. Dalam fisiologi hewan, pengaruh hormon ini sangat penting untuk mengatur homeostasis atau

keseimbangan internal tubuh. Misalnya, ketidakseimbangan hormon tiroid dapat menyebabkan gangguan metabolik dan perubahan suhu tubuh pada hewan, yang pada akhirnya mempengaruhi kesehatan dan produktivitasnya.

Selain itu dalam fisiologi, ilmu biokimia berperan dalam pengendalian keseimbangan asam-basa, elektrolit, dan cairan tubuh, yang merupakan aspek penting dalam fisiologi ginjal dan sistem pernapasan. Biokimia menjelaskan bagaimana buffer darah seperti sistem bikarbonat bekerja untuk menjaga pH tubuh dalam kisaran normal. Gangguan dalam mekanisme ini dapat menyebabkan kondisi seperti asidosis atau alkalosis, yang mengganggu fungsi fisiologis lainnya. Begitu pula, konsentrasi elektrolit seperti natrium, kalium, dan kalsium sangat memengaruhi kontraksi otot dan transmisi impuls saraf, proses yang juga dijelaskan dalam fisiologi saraf dan otot hewan. Penerapan ilmu biokimia dalam bidang kedokteran hewan sangat luas, terutama dalam diagnosis laboratorium dan pemahaman penyakit metabolik. Pemeriksaan darah untuk mengukur kadar glukosa, enzim hati, urea, dan kreatinin memberikan informasi penting tentang fungsi fisiologis organ tubuh hewan. Gangguan seperti diabetes, ketosis, gangguan hati, dan insufisiensi ginjal dapat dideteksi dan dipahami melalui analisis biokimia. Oleh karena itu, pemahaman biokimia sangat penting bagi para dokter hewan dan mahasiswa kedokteran hewan untuk dapat memahami secara menyeluruh bagaimana tubuh hewan bekerja, bagaimana penyakit berkembang, dan bagaimana penanganan serta

pengobatan seharusnya dilakukan berdasarkan perubahan biokimia dalam tubuh.

2. Farmakologi Veteriner

Farmakologi veteriner adalah cabang ilmu yang mempelajari sifat, aksi, penggunaan, metabolisme, dan efek obat-obatan pada hewan. Ilmu ini sangat penting dalam kedokteran hewan karena membantu dokter hewan memilih dan menggunakan obat secara tepat dan aman untuk mendiagnosis, mencegah, mengobati, atau mengendalikan penyakit pada berbagai spesies hewan. Ilmu biokimia memiliki peran yang sangat penting dalam pengembangan dan penerapan farmakologi hewan karena memberikan pemahaman mendasar tentang bagaimana obat berinteraksi dengan sistem biologis di tingkat molekuler. Farmakologi tidak hanya mempelajari obat sebagai zat kimia, tetapi juga bagaimana tubuh hewan memproses obat melalui mekanisme biologis kompleks seperti metabolisme, penyerapan, dan ekskresi. Semua proses ini bergantung pada reaksi biokimia yang melibatkan enzim, reseptor, protein, dan molekul lainnya. Oleh karena itu, pemahaman biokimia sangat penting bagi dokter hewan agar dapat menggunakan obat secara tepat sesuai dengan spesies, kondisi fisiologis, dan status kesehatan hewan.

Salah satu aspek utama biokimia dalam farmakologi hewan adalah metabolisme obat. Ketika obat masuk ke dalam tubuh hewan, ia harus dimetabolisme agar menjadi bentuk yang aktif atau

dapat dikeluarkan. Proses ini umumnya terjadi di hati dan melibatkan berbagai enzim, terutama enzim sitokrom P450. Tanpa pemahaman terhadap jalur biokimia ini, dokter hewan dapat salah memperkirakan dosis, waktu pemberian, atau kombinasi obat yang aman. Misalnya, beberapa spesies seperti kucing memiliki keterbatasan dalam melakukan glukuronidasi — suatu reaksi konjugasi yang penting dalam metabolisme obat. Kekurangan enzim ini membuat kucing lebih rentan terhadap efek toksik obat tertentu yang sebenarnya aman untuk anjing atau manusia. Selain itu, interaksi obat dengan target biologis, seperti reseptor, enzim, atau saluran ion, juga dijelaskan melalui biokimia. Obat bekerja karena mereka memiliki struktur kimia yang sesuai untuk berikatan dengan target tertentu di dalam tubuh, yang memicu reaksi fisiologis tertentu. Misalnya, obat antiinflamasi non-steroid (NSAID) bekerja dengan menghambat enzim siklooksigenase (COX), yang terlibat dalam sintesis prostaglandin — senyawa yang menyebabkan nyeri dan peradangan. Pengetahuan tentang struktur dan mekanisme kerja enzim ini adalah bagian dari biokimia yang sangat penting dalam farmakologi hewan, terutama saat merancang pengobatan yang selektif dan minim efek samping. biokimia juga penting dalam memahami toksikologi veteriner, yaitu cabang farmakologi yang mempelajari efek toksik dari obat atau bahan kimia. Banyak kasus keracunan pada hewan terjadi karena ketidaksesuaian metabolisme antar spesies atau karena gangguan pada jalur biokimia detoksifikasi. Misalnya, overdosis asetaminofen pada

kucing dapat menyebabkan kerusakan hati yang fatal karena terbentuknya metabolit toksik yang tidak dapat dinetralisir secara efektif. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang biokimia memungkinkan dokter hewan menganalisis, mendiagnosis, dan menangani kasus toksikologi dengan lebih tepat. Singkatnya, biokimia memberikan fondasi penting bagi farmakologi hewan untuk memastikan penggunaan obat yang aman, efektif, dan sesuai dengan fisiologi tiap spesies hewan.

3. Patologi Veteriner

Patologi veteriner adalah cabang ilmu kedokteran hewan yang mempelajari perubahan struktural dan fungsional pada jaringan, organ, dan sistem tubuh hewan akibat penyakit atau cedera. Ilmu ini berperan penting dalam memahami mekanisme penyakit, membantu diagnosis, serta menjadi dasar dalam penentuan terapi dan pencegahan penyakit pada hewan. Ilmu biokimia memiliki peranan yang sangat penting dalam memahami patologi hewan, karena biokimia memberikan dasar molekuler untuk menjelaskan bagaimana penyakit terjadi dan berkembang di dalam tubuh hewan. Patologi hewan mempelajari perubahan struktur dan fungsi tubuh akibat penyakit, sedangkan biokimia menjelaskan reaksi kimia dan proses biologis yang mendasari perubahan tersebut. Dengan kata lain, biokimia membantu menjelaskan *"apa yang sebenarnya terjadi di tingkat sel dan molekul saat tubuh mengalami gangguan akibat penyakit."* Misalnya, pada kondisi hepatitis (radang hati) pada hewan, ilmu patologi akan

menunjukkan adanya perubahan anatomi dan seluler pada jaringan hati (seperti pembesaran organ atau nekrosis sel hati). Namun untuk memahami mengapa sel hati mati, kita memerlukan ilmu biokimia: misalnya, karena terjadi akumulasi radikal bebas yang merusak membran sel, terganggunya sistem enzim detoksifikasi, atau karena disfungsi metabolisme asam lemak dan protein di dalam sel hati. Proses-proses ini semuanya merupakan fenomena biokimia.

Biokimia juga sangat berperan dalam diagnosis penyakit, yang merupakan bagian penting dari patologi klinik. Pemeriksaan seperti profil biokimia darah (misalnya kadar glukosa, enzim hati seperti ALT/AST, urea, kreatinin, elektrolit dan lainnya.) digunakan untuk mendeteksi gangguan metabolisme dan organ. Peningkatan enzim tertentu dalam darah hewan bisa menandakan kerusakan organ spesifik, seperti peningkatan AST atau GGT yang menunjukkan gangguan hati. Semua nilai ini diinterpretasikan dengan dasar pemahaman proses biokimia yang normal maupun yang terganggu. Selain itu, biokimia menjelaskan mekanisme penyakit metabolik, seperti ketosis pada sapi perah, diabetes melitus pada anjing, atau defisiensi enzim tertentu pada kucing. Dalam semua kasus tersebut, gejala klinis dan perubahan patologi hanya bisa dimengerti secara mendalam jika kita memahami jalur-jalur metabolisme (glukosa, lemak, protein) dan bagaimana gangguannya menyebabkan kerusakan jaringan dan organ. Oleh karena itu, tanpa pemahaman biokimia, penilaian terhadap patologi hewan akan menjadi kurang akurat dan tidak lengkap.

4. Nutrisi Veteriner

Nutrisi veteriner adalah cabang ilmu kedokteran hewan yang mempelajari kebutuhan dan peran zat gizi dalam memelihara kesehatan, mendukung pertumbuhan, reproduksi, produksi, serta mencegah dan mengobati penyakit pada hewan. Ilmu ini sangat penting dalam manajemen kesehatan hewan, baik hewan peliharaan, ternak, maupun satwa liar. Nutrisi veteriner tidak hanya fokus pada jumlah pakan yang diberikan, tetapi juga pada kualitas, komposisi, keseimbangan, dan pencernaan dari nutrisi dalam makanan. Ilmu biokimia memainkan peranan yang sangat penting dalam memahami dan mengembangkan ilmu nutrisi hewan, karena biokimia memberikan penjelasan menyeluruh tentang bagaimana tubuh hewan mencerna, menyerap, memetabolisme, dan menggunakan zat-zat gizi. Nutrien seperti karbohidrat, protein, lemak, vitamin, dan mineral tidak hanya menjadi sumber energi dan bahan pembangun tubuh, tetapi juga terlibat dalam berbagai reaksi kimia dalam tubuh yang memastikan fungsi fisiologis berlangsung secara optimal. Kekurangan nutrisi seperti protein, karbohidrat, lemak dan vitamin yang dibutuhkan oleh tubuh (Lailani *et al.*, 2022). Biokimia membantu menjelaskan bagaimana nutrisi-nutrien tersebut diproses di tingkat sel, mulai dari jalur glikolisis, siklus asam sitrat, hingga oksidasi β pada asam lemak, serta peran enzim dan koenzim dalam metabolisme nutrisi tersebut. Sebagai contoh, ketika hewan mengonsumsi makanan yang mengandung karbohidrat, proses biokimia akan mengubah karbohidrat menjadi glukosa

melalui pencernaan, yang kemudian digunakan sebagai sumber energi utama melalui proses glikolisis dan respirasi seluler. Dalam hewan yang sedang mengalami kekurangan energi (seperti pada masa laktasi tinggi pada sapi perah), tubuh akan mulai memecah lemak menjadi asam lemak dan keton melalui jalur β -oksidasi.

Pengetahuan biokimia memungkinkan kita memahami bagaimana kekurangan atau kelebihan zat gizi tertentu bisa mengakibatkan gangguan metabolik seperti ketosis, asam laktat berlebih, atau obesitas, tergantung pada bagaimana tubuh hewan mengatur keseimbangan energinya. Peran vitamin dan mineral dalam berbagai reaksi metabolik, karena banyak dari mikronutrien ini berfungsi sebagai kofaktor bagi enzim-enzim penting. Misalnya, vitamin B kompleks sangat penting dalam metabolisme energi; defisiensi vitamin B1 (tiamin) mengganggu konversi piruvat ke *asetil-KoA*, yang mengakibatkan gangguan pada produksi energi dan bisa menyebabkan gejala neurologis. Begitu pula dengan kalsium, fosfor, dan vitamin D yang berperan dalam mineralisasi tulang. Tanpa pemahaman biokimia, kita tidak bisa merancang diet yang mempertimbangkan interaksi nutrien secara fungsional di dalam tubuh, terutama dalam kondisi fisiologis khusus seperti kehamilan, pertumbuhan cepat, atau penyembuhan luka. Ilmu biokimia juga mendasari pengembangan pakan fungsional dan diet terapeutik dalam praktik nutrisi veteriner. Misalnya, pemilihan sumber protein berkualitas tinggi bagi hewan yang menderita penyakit ginjal didasarkan pada pemahaman bahwa produk samping metabolisme nitrogen seperti urea dan

kreatinin dapat memperparah kondisi tersebut. Biokimia membantu menentukan bagaimana nutrisi dimodifikasi agar tidak memperberat kerja organ tertentu. Dengan demikian, ilmu biokimia tidak hanya mendasari pemahaman teoretis, tetapi juga berperan langsung dalam aplikasi praktis nutrisi klinis dan manajemen kesehatan hewan secara menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

- Astuti. N.R. 2009. Konsep Dasar Kimia. Malang: UIN Malang Press.
- David L., Nelson and Michael M. C. 2005. Lehninger Principles of Biochemistry. New York : Worth Publisher.
- Dharmawan, S.N., Mahardika, G.I., Suryani, N.N., Andini, M.P.N dan Dewi,S.K.A. 2016. Parameter Biokimia dan Hematologi Sapi Bali Lepas Sapih yang diberi Ransum Energi Protein Bertingkat. Jurnal Veteriner 20 (4) : 558-565.
<https://ojs.unud.ac.id/index.php/jvet/article/view/50985/32923>
- Lailani, K.F., Yuliana dan Yulastri, A. 2022. Problems Related to Malnutrition: Causes, Effects and Countermeasures. Jurnal Gizi dan Kesehatan 2 (2) : 129-138.
<https://jurnal.poltekkespalembang.ac.id/index.php/jgk/article/view/1503/887>.
- McKEE,T and McKEE, J., 2019. Biochemistry The Molecular Basis of life seventh edition. New York: Oxford University Press.
- Nelson, D.L., Cox, M.M. 2013. Lehninger Principles of Biochemistry sixth edition. New York: W.H. Freeman and Company.
- Poedjiadi, A dan Supriyanti F.M.T. 2009. Dasar-Dasar Biokimia Edisi Revisi. Jakarta: UI Press.

Sukaryawan, M. dan Sari, D.K. 2022. Video Pembelajaran Biokimia 2. Indralaya: Prodi Pendidikan Kimia FKIP Unsri.

Wahyudiati, D.2017. Biokimia. Penerbit LEPPIM Mataram. Nusa Tenggara Barat (NTB). Indonesia.

BAB 2

KARBOHIDRAT

Oleh Risky Nurul Fadlila

2.1 Pendahuluan Karbohidrat

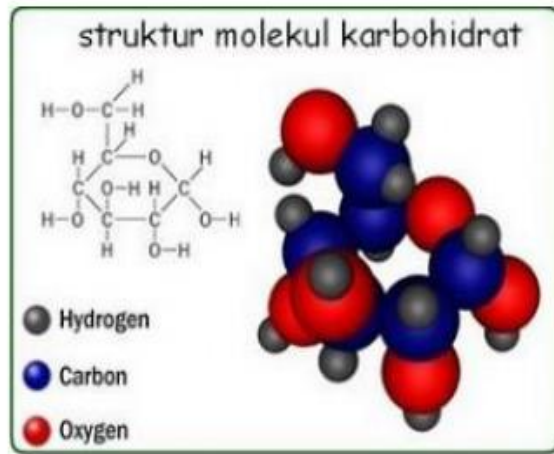
2.1.1 Definisi Karbohidrat

Karbohidrat termasuk salah satu makronutrien utama yang dibutuhkan oleh tubuh, selain lemak dan protein. Molekul ini termasuk senyawa organik yang tersusun atas atom karbon (C), Hidrogen (H) dan Oksigen (O). Karbohidrat memiliki rumus molekul $C_n(H_2O)_n$, namun rumus tersebut hanya berlaku untuk gula sederhana yakni monosakarida, sedangkan untuk oligosakarida dan polisakarida memiliki rumus yang berbeda. Perbedaan ini diakibatkan oleh reaksi kondensasi (pelepasan molekul air) pada saat penggabungan monosakarida menjadi oligosakarida atau polisakarida (Sumbono, 2021).

Karbohidrat yang banyak dijumpai di alam berbentuk polisakarida, termasuk di dalamnya glikogen (Sumbono, 2021). Saat dikonsumsi, karbohidrat dipecah menjadi glukosa (gula darah) yang digunakan oleh sel-sel tubuh untuk menghasilkan energi (Hanum, 2017). Karbohidrat teroksidasi menjadi karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O) di dalam tubuh dan menghasilkan 4 kkal/g. Dengan kata lain, setiap gram karbohidrat yang dikonsumsi menghasilkan

sekitar 4 kkal energi. Molekul karbohidrat mengandung sejumlah besar oksigen dan sudah teroksidasi sebagian sebelum masuk ke dalam tubuh (Lieberman & Peet, 2018)

Karbohidrat merupakan senyawa yang paling banyak ditemukan di alam dan memegang peran penting dalam seluruh bentuk kehidupan. Dalam tubuh makhluk hidup, karbohidrat memiliki peran utama seperti menjadi sumber energi utama (contohnya glukosa), tempat penyimpanan energi (seperti pati pada tumbuhan dan glikogen pada hewan), serta komponen structural penting (seperti selulosa pada tumbuhan, dan kitin pada hewan serta jamur) (Wahyudiati, 2017). Meskipun semua organisme dapat mensintesis karbohidrat, namun kebanyakan karbohidrat dihasilkan oleh organisme fotosintetik termasuk bakteri tertentu, alga serta tumbuhan. Organisme ini dapat mengubah energi dari cahaya matahari menjadi energi kimia, yang kemudian dimanfaatkan untuk mensintesis karbohidrat dari karbondioksida (CO_2). Karbohidrat memainkan peranan sangat penting pada kehidupan organisme. Polimer karbohidrat pada binatang dan tumbuhan, bertindak sebagai molekul penyimpan energi. Binatang dan manusia dapat mencerna karbohidrat yang kemudian dioksidasi menghasilkan energi selama proses katabolisme (Azhar, 2016).



Gambar 2. 1. Struktur Molekul Karbohidrat
 Sumber : (Wahyudiati, 2017)

Secara biokimia, karbohidrat adalah polihidroksialdehida dan polihidroksiketon atau zat yang menghasilkan turunan dari senyawa tersebut ketika dihidrolisis. Karbohidrat mengandung gugus fungsi karbonil (sebagai aldehida atau keton) dan banyak gugus hidroksil (Wahyudiati, 2017). Di dalam tubuh, karbohidrat dapat dibentuk dari beberapa asam amino dan sebagian dari gliserol lemak. Akan tetapi sebagian besar diperoleh dari bahan makanan yang dikonsumsi sehari-hari, terutama sumber bahan makanan yang berasal dari tumbuh-tumbuhan (Nafsiati, 2009). Sebagian besar karbohidrat yang dikonsumsi berbentuk kompleks, selanjutnya akan dipecah menjadi bentuk sederhana melalui proses katabolisme dengan bantuan enzim. Selanjutnya karbohidrat sederhana diserap melalui usus dan didistribusikan ke berbagai organ tubuh yang membutuhkan energi (Kinanti & Abdullah, 2019). Karbohidrat sangat penting untuk kesehatan tubuh

secara menyeluruh. Untuk bisa melakukan aktivitas dengan penuh semangat, tubuh membutuhkan energi dan sebagian besar energi yang ada di dalam tubuh kita adalah yang disediakan oleh nutrisi ini. Bahkan tak hanya itu, karbohidrat juga memiliki peran penting dalam metabolisme lemak dan protein.

Karbohidrat merupakan komponen utama dalam ransum ternak yang berperan untuk menyediakan sumber energi utama pada proses metabolisme tubuh. Dalam sistem peternakan modern, peran karbohidrat tidak hanya terbatas pada penyediaan energi, tetapi juga berpengaruh terhadap kesehatan saluran pencernaan. Produktivitas ternak dan efisiensi biaya pakan.

Berdasarkan ukuran molekulnya, karbohidrat dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu:

1. Karbohidrat Sederhana

Karbohidrat ini tersusun dari satu molekul gula (monosakarida) atau bahkan dua molekul gula (disakarida). Karbohidrat ini sangat mudah dicerna dan diserap oleh tubuh. Ketika karbohidrat sederhana masuk ke dalam aliran darah, maka kadar gula darah akan meningkat secara signifikan dengan cepat. Peningkatan gula darah perlu diseimbangi dengan produksi hormon insulin di dalam tubuh. Ketika arus gulanya besar, maka tubuh membutuhkan hormon insulin dalam jumlah besar untuk menyeimbangkan kondisi gula dalam darah. Oleh karena itu, karbohidrat jenis ini tidak boleh dikonsumsi secara berlebihan. Karbohidrat sederhana mencakup monosakarida seperti glukosa, fruktosa dan galaktosa, serta disakarida seperti sukrosa dan laktosa. Jenis-jenis

karbohidrat ini umumnya ditemukan dalam berbagai produk makanan termasuk masu, buah-buahan dan susu (Almatsier, 2004).

2. Karbohidrat Kompleks

Karbohidrat jenis ini merupakan karbohidrat yang memiliki struktur lebih panjang dibandingkan karbohidrat sederhana karena tersusun dari tiga molekul gula atau bahkan lebih. Karena strukturnya yang panjang dan kompleks, proses pemecahannya dalam tubuh memerlukan waktu yang lama. Contoh dari karbohidrat kompleks adalah pati, glikogen (energi yang tersimpan di dalam tubuh), selulosa, serat (fiber) atau dalam konsumsi sehari-hari karbohidrat kompleks dapat ditemui di dalam produk pangan seperti nasi, kentang, jagung, singkong, ubi, pasta, roti, dan sebagainya (Almatsier, 2004).

Tabel 2. 1. Perbandingan Karbohidrat Sederhana dan Kompleks

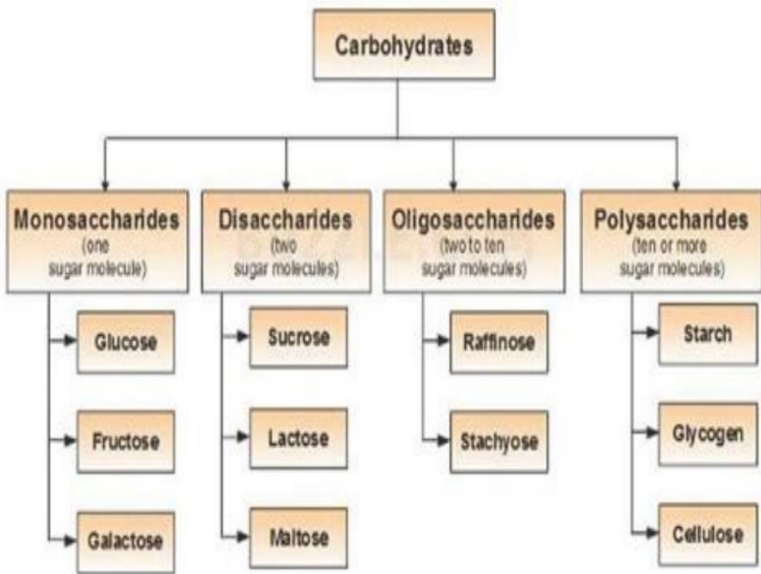
Kabohidrat Sederhana	Karbohidrat Kompleks
Mudah diserap oleh tubuh	Memerlukan waktu yang lama untuk diserap oleh tubuh
Memicu peningkatan kadar gula darah dalam waktu singkat	Kadar gula darah meningkat secara bertahap
Rasa kenyang tidak bertahan lama	Memberikan rasa kenyang yang bertahan lama
Minim nutrisi (jika olahan)	Kaya serat dan zat gizi

2.1.2 Klasifikasi Karbohidrat

Karbohidrat didefinisikan sebagai biomolekul yang mengandung sekelompok senyawa karbonil (aldehida atau keton) dan beberapa gugus hidroksil yang tersusun dari atom karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O), dengan atom hidrogen-oksigen rasio 2:1 (seperti rumus senyawa air). Namun, ada beberapa senyawa yang tidak mengikuti definisi stoikiometri yang tepat ini, seperti uronik asam. Selain itu, terdapat juga senyawa yang memiliki gugus mirip dengan karbohidrat, namun tidak diklasifikasikan sebagai salah satu dari karbohidrat, misalnya formaldehida dan asam asetat (Nasri, *et al.*, 2025)

Karbohidrat dapat diklasifikasikan ke dalam dua kelompok utama, yaitu gula dan non gula. Monosakarida adalah gula yang paling sederhana adalah dan dikelompokkan menjadi triosa, tetrosa, pentosa, heksosa dan heptose, tergantung pada jumlah atom karbon (C) yang terdapat di dalam molekul penyusunnya. Polisakarida atau glikan adalah polimer dari unit-unit monosakarida. Polisakarida ini terbagi menjadi homopolisakarida dan heteropolisakarida, yang jika dihidrolisis maka akan menghasilkan monosakarida serta senyawa turunannya. Sementara itu, karbohidrat kompleks merupakan senyawa karbohidrat yang terdiri dari komponen karbohidrat yang terikat dengan komponen non-karbohidrat, seperti pada glikolipid dan glikoprotein (Sudradjat & Riyanti, 2019).

Berdasarkan tingkat polimerasi, karbohidrat diklasifikasikan menjadi empat kelompok utama, yaitu monosakarida, disakarida, oligosakarida serta polisakarida.



Gambar 2. 2. Klasifikasi Karbohidrat

Sumber : (Nasri, *et al.*, 2025)

a. Monosakarida

Monosakarida merupakan bentuk paling dasar dari karbohidrat yang tidak dapat dihidrolisis karena tidak memiliki ikatan glikosidik yang dapat dipecah menjadi molekul yang lebih sederhana. Monosakarida disebut juga gula sederhana karena hanya memiliki 1 molekul gula dan merupakan unit dasar karbohidrat (Hanum, 2017). Secara fisik, monosakarida adalah padatan kristal yang tak berwarna, larut dalam air, namun tidak larut dalam pelarut nonpolar. Sebagian besar monosakarida memiliki rasa manis (Nasri, *et al.*, 2025). Contoh dari monosakarida adalah glukosa, fruktosa, galaktosa dan manosa.

Glukosa dan fruktosa merupakan monosakarida yang paling umum ditemukan dalam bentuk bebas di alam. Glukosa ditemukan secara alami dalam tanaman, buah-buahan, madu, serta dalam darah dan cairan tubuh hewan. Fruktosa bisa ditemukan dalam bentuk bebas di daun hijau, buah, dan madu, serta sebagai bagian dari sukrosa dan fruktan. Sedangkan manosa tidak ditemukan dalam bentuk bebas di alam, melainkan sebagai bagian dari polimer seperti mannan dan glikoprotein. Mannan dapat dijumpai pada ragi, kapang, dan bakteri. Galaktosa tidak tersedia bebas di alam, melainkan hasil pemecahan senyawa fermentasi, seperti laktosa pada susu (Sudradjat & Riyanti, 2019)

b. Disakarida

Secara teori, banyak jenis disakarida dapat terbentuk, tergantung pada jenis monosakarida penyusunnya dan bagaimana monosakarida tersebut terikat satu sama lainnya. Disakarida atau yang dikenal dengan sebutan gula ganda adalah jenis karbohidrat yang tersusun dari dua molekul monosakarida. Namun, disakarida yang paling relevan secara nutrisi meliputi laktosa, sukrosa, maltosa, dan selobiosa, yang jika dihidrolisis akan menghasilkan dua molekul heksosa (McDonald, *et al.*, 2010). Sukrosa yang tersusun atas glukosa dan fruktosa, umumnya ditemukan dalam jumlah besar pada tanaman, khususnya dalam gula tebu, dengan konsentrasi tertinggi sekitar 200 g/kg. Sementara itu, maltosa yang terdiri dari dua molekul glukosa, umumnya terdapat dalam tanaman yang kaya pati. Laktosa, gabungan antara glukosa dan galaktosa, ditemukan dalam susu dan dikenal sebagai gula susu karena dihasilkan oleh

kelenjar mamalia. Kandungan laktosa dalam susu sapi berkisar antara 43–48 g/kg. Selobiosa, yang juga terdiri dari dua glukosa tetapi terikat melalui ikatan β -(1,4), ditemukan dalam tanaman berserat. Ikatan ini tidak dapat dipecah oleh enzim mamalia, kecuali oleh enzim yang diproduksi mikroba di dalam rumen. Salah satu contoh senyawa trisakarida adalah rafinosa, yang dapat ditemukan pada biji kapuk dan tebu (Sudradjat & Riyanti, 2019).

c. Oligosakarida

Oligosakarida adalah karbohidrat yang terdiri dari 3–10 unit monosakarida. Meskipun tidak berfungsi utama sebagai sumber energi, oligosakarida berperan penting dalam kesehatan usus, sistem imun, dan performa produksi ternak. Namun, tidak semua golongan oligosakarida dapat dicerna oleh enzim pencernaan (Sebagian difermentasi oleh rumen). Frukto-Oligosakarida (FOS) secara alami terdapat dalam berbagai tanaman, terutama umbi-umbian dan sayuran. FOS termasuk dalam kelompok prebiotik, yaitu zat yang tidak dicerna oleh enzim pencernaan hewan, tetapi difermentasi oleh mikroorganisme menguntungkan dalam usus (seperti *Lactobacillus* dan *Bifidobacterium*). Mannan-Oligosakarida (MOS) terdapat pada dinding sel ragi (*yeast*), khususnya *Saccharomyces cerevisiae*, kapas dan kacang-kacangan (dalam jumlah kecil) dan juga produk fermentasi. Walaupun MOS sering digunakan seperti halnya prebiotik, namun MOS tidak secara khusus meningkatkan populasi bakteri menguntungkan. Sebaliknya, mekanisme kerja utamanya adalah dengan menempel pada patogen untuk mengeluarkannya dari

saluran pencernaan serta merangsang sistem imun tubuh (McDonald, et al., 2010).

d. Polisakarida

Polisakarida merupakan senyawa polimer yang terbentuk dari banyak monosakarida yang saling terikat melalui ikatan glikosidik. Senyawa ini merupakan komponen struktural utama dalam sel dan jaringan, serta ditemukan dalam mukus, hormon, enzim, dan zat kekebalan tubuh. Polisakarida terbagi menjadi dua jenis, yaitu homopolisakarida dan heteropolisakarida. Homoglikan mencakup senyawa seperti arabinan, xilan, lukan, fruktan, galaktan, mannan, dan glukosaminan. Contoh glukuan adalah pati (starch), glikogen, dan selulosa. Glikogen, yang terdapat di jaringan hewan, mirip dengan pati pada tanaman dan berfungsi sebagai cadangan energi jangka pendek. Hati dan ginjal dapat melepaskan glukosa ke dalam aliran darah, dengan glukosa hati menjadi sumber energi utama. Pati dan selulosa menjadi komponen utama dalam pakan ruminansia. Pakan konsentrat mengandung pati dalam jumlah yang besar, sedangkan pakan hijauan mengandung selulosa dalam jumlah yang lebih tinggi. Pakan hijauan juga mengandung hemiselulosa dan lignin. Selulosa dicerna di saluran pencernaan dengan bantuan enzim selulase dari mikroba rumen, menghasilkan selobiosa yang kemudian diubah menjadi glukosa oleh enzim selobiase. Heteropolisakarida meliputi senyawa seperti pektin, hemiselulosa, gum eksudat, asam mucilages, asam hyaluronic, dan chondroitin (Sudradjat & Riyanti, 2019).

2.2 Fungsi Karbohidrat dalam Tubuh Ternak

Karbohidrat adalah kelompok besar senyawa yang umumnya disebut gula, pati, dan selulosa (yang semuanya adalah gula atau polimer gula). Umumnya gula merupakan sumber penyimpanan energi. Dengan memecah gula menjadi karbon dioksida dan air, organisme hidup dapat melepaskan energi yang terkunci di dalamnya sehingga dapat digunakan untuk kebutuhan energi (Wahyudiati, 2017). Karbohidrat merupakan komponen terbesar dalam ransum pakan ruminansia dan dapat diklasifikasikan menjadi karbohidrat berserat (*Fiber Carbohydrate/FC*) dan karbohidrat non-serat (*Non-Fiber Carbohydrate/NFC*). Secara umum, karbohidrat pakan dimanfaatkan oleh ruminansia sebagai sumber bahan pati dan serat (Achmadi & Surono, 2022).

Secara biologis, karbohidrat mempunyai peran yang sangat penting untuk keberlangsungan hidup, diantaranya:

1. Sumber Energi Utama

Karbohidrat menyumbang hingga 60-80% total energi metabolik yang digunakan oleh ternak. Energi ini penting digunakan untuk aktivitas harian ternak, pertumbuhan otot dan jaringan serta produksi susu, telur dan daging.

2. Efisiensi Biaya Pakan

Karbohidrat merupakan komponen pakan yang relatif murah dan mudah didapat. Bahan-bahan seperti jagung, dedak padi, singkong, dan rumput banyak digunakan sebagai sumber utama karbohidrat. Pemanfaatan karbohidrat secara optimal dapat memperbaiki efisiensi rasio konversi pakan (FCR) serta

mengurangi ketergantungan pada protein sebagai sumber energi (McDonald, *et al.*, 2010).

3. Fungsi Khusus Pada Ruminansia

Pada ruminansia seperti sapi, kambing, dan domba, karbohidrat difermentasi oleh mikroorganisme di dalam rumen menjadi asam lemak volatil (*Volatile Fatty Acids/VFA*), termasuk asetat, propionat, dan butirat. Senyawa-senyawa ini berfungsi sebagai sumber energi utama bagi ruminansia. Proses ini memiliki peran penting dalam mendukung sintesis lemak susu (khususnya melalui asetat), sintesis glukosa di hati yang melibatkan penggunaan propionat sebagai bahan utama, serta butirat yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi sel epitel usus (Van Soest, 1994).

4. Menjaga Keseimbangan Sistem Pencernaan

Serat seperti selulosa dan hemiselulosa membantu menggerakkan usus, menjaga keasaman rumen tetap seimbang agar mengalami asidosis, dan menjaga populasi mikroba rumen tetap sehat (Preston & Leng, 1987).

5. Pencegahan Gangguan Metabolik

Pemenuhan keseimbangan karbohidrat dalam ransum sangat penting untuk mencegah terjadinya ketosis (khususnya pada sapi perah di awal masa laktasi), menghindari terjadinya asidosis rumen yang disebabkan karena mengonsumsi karbohidrat yang mudah difermentasi secara berlebihan, serta mencegah gangguan metabolisme energi yang dapat berdampak negatif pada produktivitas (Radostits, 2007).

6. Peran dalam Produksi dan Pertumbuhan

Karbohidrat berperan dalam meningkatkan produktivitas ternak dengan mendorong laju pertambahan bobot badan harian (ADG), memperbanyak produksi susu dan telur, serta menunjang efisiensi pembentukan otot dan jaringan tubuh (Ensminger, *et al.*, 1990).

2.3 Sumber Karbohidrat untuk Pakan Ternak

Beberapa sumber karbohidrat untuk pakan ternak, yaitu:

1. Jagung, sorgum, dedak, padi dan singkong merupakan bahan pakan sumber energi tinggi
2. Hijauan (rumput, legum)
3. Produk samping industri pertanian (onggok, molases)

2.4 Proses Pencernaan Ruminansia

Tahap awal pencernaan dimulai dari merenggut rumput dengan gigi seri, lalu ditelan dan menyimpan makanan untuk sementara di dalam rumen. Rumen mempunyai peranan penting dalam mencerna serat kasar. Pakan yang dikonsumsi ruminansia mengalami pencernaan di rongga mulut melalui proses pengunyahan oleh gigi, yang berfungsi untuk menghaluskan partikel makanan secara mekanis, disertai sekresi saliva untuk membantu melumasi makanan. Pada hewan monogastrik, saliva mengandung enzim amilase yang berperan untuk memecah pati menjadi maltosa. Selanjutnya, makanan diteruskan ke esofagus menuju rumen. Rumen merupakan tempat terjadinya

pencernaan protein, polisakarida, serta fermentasi selulosa yang dibantu oleh enzim selulase yang dihasilkan oleh bakteri dan fungi. Saliva akan bercampur dengan digesta rumen, lalu diteruskan ke retikulum, kemudian dibentuk menjadi gumpalan kasar atau bolus (Sudradjat & Riyanti, 2019).

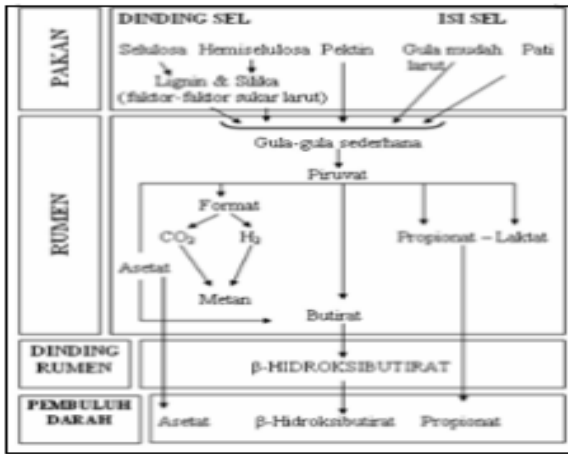
Bolus akan dikeluarkan kembali ke mulut untuk dikunyah ulang agar dapat memperlancar pencernaan. Setelah itu, makanan ditelan kembali ke saluran pencernaan menuju omasum sebagai tempat terjadinya penyerapan air. Selanjutnya, bolus bergerak menuju abomasum atau lambung sejati untuk dicerna secara kimiawi melalui kerja enzim proteolitik seperti proteinase dan sekresi asam lambung (HCl), sehingga makanan berubah menjadi bubur halus yang disebut kim. Kondisi asam di abomasum menciptakan lingkungan yang tidak memungkinkan bakteri untuk bertahan hidup, sehingga mikroorganisme yang ikut terbawa bersama bolus akan mati dan kemudian dimanfaatkan oleh tubuh ternak sebagai sumber protein. Selanjutnya kim diteruskan ke usus halus untuk dicerna di duodenum dengan bantuan enzim yang disekresikan oleh pankreas serta garam empedu yang dihasilkan oleh hati untuk membantu proses emulsi lemak. Hasil akhir dari proses ini berupa asam amino dan asam lemak yang siap diserap. Selanjutnya, proses penyerapan berlangsung di bagian jejunum dan ileum. Di bagian sekum dan kolon, terjadi pencernaan fermentative dengan produk hasil fermentasi dan air yang dapat diserap melalui dinding kolon dan sekum (Sudradjat & Riyanti, 2019).

2.5 Metabolisme Karbohidrat pada Ruminansia

Sebagian besar bahan pakan ruminansia mengandung karbohidrat seperti selulosa, hemiselulosa, pati dan karbohidrat yang dapat larut dalam air. Semua karbohidrat kecuali lignin, dapat diuraikan oleh mikroba rumen. Mikroba ini terdapat dalam rumen ruminansia dan menghasilkan enzim untuk membantu mencerna pakan. Karbohidrat dalam pakan umumnya terdiri dari gula dan pati yang mudah larut, serta selulosa dan hemiselulosa yang sulit larut. Kedua jenis karbohidrat tersebut difermentasi oleh mikroba rumen dan menghasilkan asam lemak volatil (VFA) (Sudradjat & Riyanti, 2019).

Pemecahan karbohidrat menjadi VFA terdiri dari dua tahap, yaitu:

1. Karbohidrat kompleks seperti selulosa, hemiselulosa dan pektin dihidrolisis ekstraseluler menjadi oligosakarida rantai pendek, terutama disakarida seperti selobiosa, maltose dan pentosa serta gula sederhana
2. Pemecahan oligosakarida dan gula sederhana menjadi VFA melalui aktivitas enzim intraseluler.



Gambar 2. 3. Metabolisme Karbohidrat pada Ruminansia
Sumber : (Sudradjat & Riyanti, 2019)

Ruminansia mampu mensintesis glukosa dari asam propionat yang dihasilkan di dalam rumen. Namun, glukosa bukan merupakan sumber energi utama bagi ruminansia seperti halnya pada hewan monogastrik. Oleh karena itu, kadar glukosa dalam jaringan ruminansia relatif rendah yaitu sekitar 40-70 mg% dalam darah, sedangkan pada hewan monogastrik kadar glukosa darah mencapai 100 mg%. Pada ruminansia muda (pre-ruminan), kadar glukosa darahnya setara dengan hewan monogastrik yaitu sekitar 100-120 mg%. Proses penyediaan energi dari karbohidrat dalam rumen berlangsung dalam dua tahap, yaitu:

Tahap 1

- Heksosa (senyawa dengan 6 atom karbon) $\rightarrow$ 2 piruvat + 4 (H) + 2 ATP
- Pentosa (senyawa dengan 5 atom karbon) $\rightarrow$ 1,67 piruvat (H) + 1,67 ATP

Tahap 2

- a. $2 \text{ piruvat} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Asam asetat} + 2 \text{ CO}_2 + 2 \text{ H}_2 + 2 \text{ ATP}$
- b. $2 \text{ Piruvat} + 8 \text{ (H)} \rightarrow 2 \text{ Asam propionat} + 2 \text{ H}_2\text{O} + 2 \text{ ATP}$
- c. $2 \text{ Piruvat} + 4 \text{ (H)} \rightarrow \text{Asam butirat} + 2 \text{ H}_2 + 2 \text{ CO}_2 + 2 \text{ ATP}$

Energi yang terbentuk akan dimanfaatkan untuk kebutuhan dasar kehidupan dan sintesis protein mikroba. Proses ini memungkinkan mikroba berkembang biak, dan pada akhirnya mikroba tersebut dapat digunakan oleh hewan inangnya sebagai sumber protein dengan nilai biologis tinggi (Sudradjat & Riyanti, 2019).

Sebanyak 75% asam lemak volatil (VFA) diserap langsung melalui dinding retikulorumen ke dalam aliran darah, sementara sekitar 20% diserap di bagian abomasum dan omasum, dan sisanya sekitar 5% melewati usus halus untuk kemudian diserap (Sudradjat & Riyanti, 2019).

Proses penyerapan asam lemak volatil (VFA) dipengaruhi oleh perbedaan konsentrasi antara cairan rumen dan sel epitel atau darah. Semakin rendah pH cairan rumen, maka semakin cepat laju penyerapan VFA. Asam butirat yang berasal dari rumen akan melalui dinding rumen dan diubah menjadi β -hidroksibutirat dalam darah, sedangkan asam propionat akan diubah menjadi asam laktat. Hal ini terjadi karena aktivitas enzim tertentu yang terdapat dalam sel epitel rumen. Senyawa β -hidroksibutirat dapat digunakan sebagai sumber energi oleh berbagai jaringan tubuh seperti otot skeletal (otot rangka) dan hati (Sudradjat & Riyanti, 2019).

DAFTAR PUSTAKA

- Achmadi, J. & Surono, 2022. *Karbohidrat Pakan Ruminansia*. Semarang: UNDIP Press .
- Almatsier, S., 2004. *Prinsip Dasar Ilmu Gizi*. Jakarta: Pt Gramedia Pustaka Utama.
- Azhar, M., 2016. *Biomolekul Sel: Karbohidrat, Protein dan Enzim*. Padang: UNP Press.
- Ensminger, M. E., Oldfield, J. E. & Heinemann, W. W., 1990. *Feeds and Nutrition*. Ensminger Publising Company.
- Hanum, G. R., 2017. *Buku Ajar Biokimia Dasar*. Sidoarjo: UMSIDA Press.
- Kinanti, R. G. & Abdullah, A., 2019. *Biokimia Karbohidrat Dalam Perspektif Ilmu Keolahragaan*. Malang: Wineka Media.
- Lieberman, M. & Peet, A., 2018. *Marks' Basic Medical Biochemistry*. 5th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer.
- McDonald, P. et al., 2010. *Animal Nutrition*. 7th ed. PEARSON.
- Nafsiati, A., 2009. *Konsep Dasar Kimia*. Malang: UIN Malang Press.
- Nasri, Hevira, L., Ritonga, S., Iksen, Ningsih, E., Tahar, M., Fahmi, A., Alif, A., Dirga, A., Arisanty, D., Putri, N., F., Atjo, M., N., Uyun, H., S., K., 2025. *Biokimia Dasar (Teori dan Esensinya)*. Padang: GET PRESS INDONESIA.
- Preston, T. R. & Leng, R. A., 1987. *Matching Ruminant Production Systems with Available Resources in the Tropics and Sub-Tropics*. ILRI.
- Radostits, O. M., 2007. *Veterinary Medicine: A Textbook of the Diseases of Cattle, Horse, Sheep, Pigs and Goats*. Saunders Elsevier.

- Sudradjat, M. S. & Riyanti, L., 2019. *Nutrisi dan Pakan Ternak*. Jakarta: PUSAT PENDIDIKAN PERTANIAN.
- Sumbono, A., 2021. *Seri Biokimia Pangan Dasar*. Sleman: Deepublish.
- Van Soest, P. J., 1994. *Nutritional Ecology Of Ruminant (2nd ed)*. Cornell University Press.
- Wahyudiati, D., 2017. *Biokimia*. Mataram: LEPPIM MATARAM.

BAB 3

LIPID

Oleh Alfiah Alif

3.1 Pendahuluan

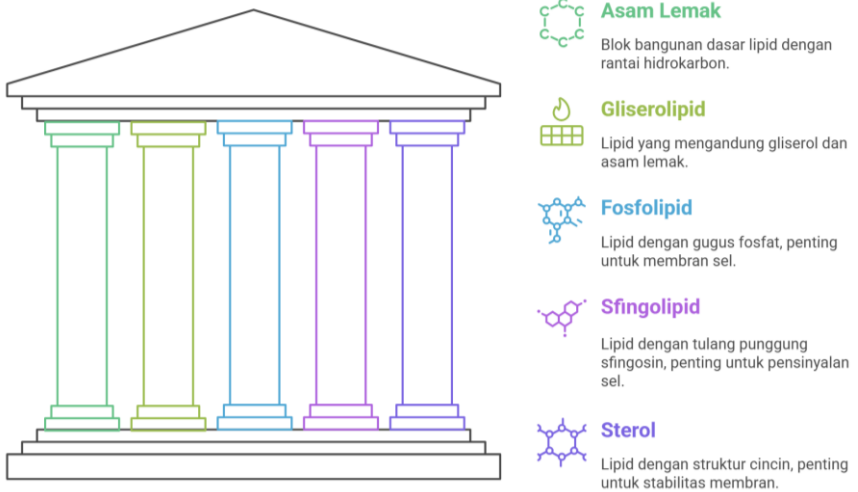
Lipid merupakan kelompok biomolekul esensial dalam berbagai proses biologis yang mendasari fungsi normal tubuh hewan. Dalam konteks ilmu biokimia veteriner, pemahaman mengenai struktur, klasifikasi, serta jalur metabolisme lipid sangat penting dalam menjelaskan peran lipid tidak hanya sebagai penyedia energi tetapi juga sebagai komponen struktural membran sel dan mediator sinyal antar sel. Berbeda dengan karbohidrat dan protein, lipid menunjukkan keragaman struktural yang luar biasa, yang pada gilirannya menghasilkan keragaman fungsional yang luas, mulai dari kestabilan membran hingga pembentukan hormon steroid dan prostaglandin. Kompleksitas ini membutuhkan pendekatan analisis yang komprehensif, termasuk studi lipidomik yang saat ini berkembang pesat.

Dalam praktik kedokteran hewan, gangguan metabolisme lipid sering kali menjadi indikator penyakit sistemik seperti gangguan endokrin, kelainan hepatik, dan kondisi inflamasi kronis. Oleh karena itu, bab ini akan membahas struktur dan klasifikasi lipid, mekanisme β -oksidasi dan sintesis asam lemak, metabolisme kolesterol

dan lipoprotein, serta gangguan metabolik terkait lipid pada hewan. Selain itu, bagian akhir bab ini akan menguraikan kebutuhan asam lemak esensial dalam nutrisi veteriner serta relevansinya dalam menunjang pertumbuhan, reproduksi, dan status kesehatan hewan secara keseluruhan. Pemahaman menyeluruh atas aspek-aspek ini menjadi kunci dalam mendukung diagnosis, terapi, dan pencegahan berbagai kondisi patologis yang berkaitan dengan lipid dalam ilmu kedokteran hewan modern.

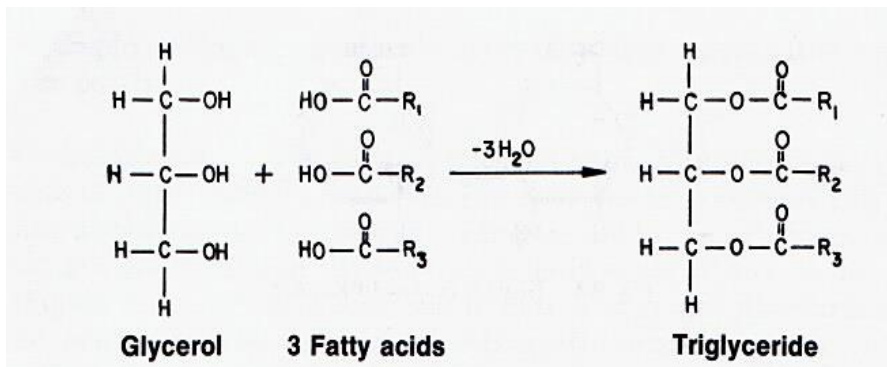
3.2 Struktur dan Klasifikasi Lipid

Lipid merupakan kelompok molekul biologis yang sangat beragam dalam hal struktur dan fungsi. Keberadaan lipid sangat penting dalam sistem biologis, terutama dalam struktur membran sel, penyimpanan energi, dan sebagai molekul pensinyal. Klasifikasi lipid umumnya didasarkan pada struktur kimia dan gugus fungsi yang dikandungnya, menghasilkan beberapa kategori utama seperti asam lemak, gliserolipid, fosfolipid, sfingolipid, dan sterol (Conroy et al., 2023; Liebisch et al., 2020; Randolph et al., 2020). Klasifikasi ini menjadi sangat penting karena membantu menjelaskan peran fisiologis dari setiap tipe lipid serta hubungannya dengan kondisi kesehatan dan penyakit (Bian et al., 2020).



Gambar 3. 1. Klasifikasi Lipid

Asam lemak adalah struktur lipid paling sederhana dan berfungsi sebagai unit dasar pembangun lipid yang lebih kompleks. Mereka terdiri dari rantai hidrokarbon panjang yang diakhiri dengan gugus karboksil. Rantai ini bisa jenuh (tanpa ikatan rangkap) atau tidak jenuh (memiliki satu atau lebih ikatan rangkap), yang mempengaruhi sifat fisik dan fungsi metabolik dari asam lemak tersebut (Conroy et al., 2023). Gliserolipid, yang mencakup trigliserida dan fosfolipid, terdiri dari kerangka gliserol yang teresterifikasi dengan asam lemak. Glicerofosfolipid seperti fosfatidilkolin dan fosfatidiletanolamin adalah komponen penting dari membran sel yang mempengaruhi fluiditas dan fungsi membran (Randolph et al., 2020; Sapir, 2020).



Gambar 3. 2. Struktur Lipid

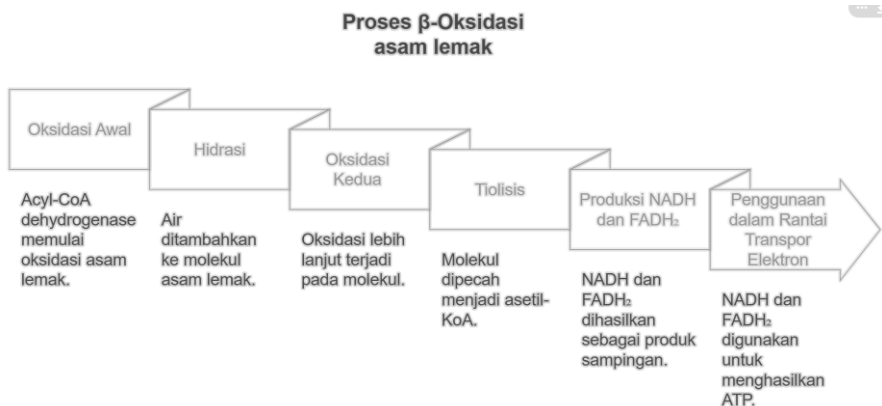
Sfingolipid, di sisi lain, memiliki kerangka dasar sfingosin dan memainkan peran penting dalam pembentukan rakit lipid (lipid raft) dalam membran sel yang berperan dalam pensinyalan dan dinamika membran (Bonney & Prentice, 2021; Conroy et al., 2023). Kolesterol, yang merupakan tipe sterol, turut memberikan stabilitas pada membran sel dengan menjaga fluiditas serta bertindak sebagai prekursor bagi hormon steroid (Bian et al., 2020). Keberagaman struktur ini mencerminkan kerumitan fungsi lipid dalam sistem biologis dan menjadi dasar dari studi lipidomik, yaitu bidang ilmu yang berfokus pada profil lengkap metabolit lipid dalam organisme (Bonney & Prentice, 2021; Conroy et al., 2023).

Klasifikasi lipid secara modern difasilitasi oleh sistem seperti LIPID MAPS, yaitu sebuah basis data yang menyediakan nomenklatur standar dan alat analisis data lipidomik (Liebisch et al., 2020). Teknologi analitik seperti spektrometri massa semakin memudahkan deteksi dan karakterisasi lipid dengan akurasi tinggi, memberikan

pemahaman yang lebih dalam mengenai peran lipid dalam metabolisme dan penyakit (Bonney & Prentice, 2021; Randolph et al., 2020).

3.3 Jalur β -Oksidasi dan Sintesis Asam Lemak

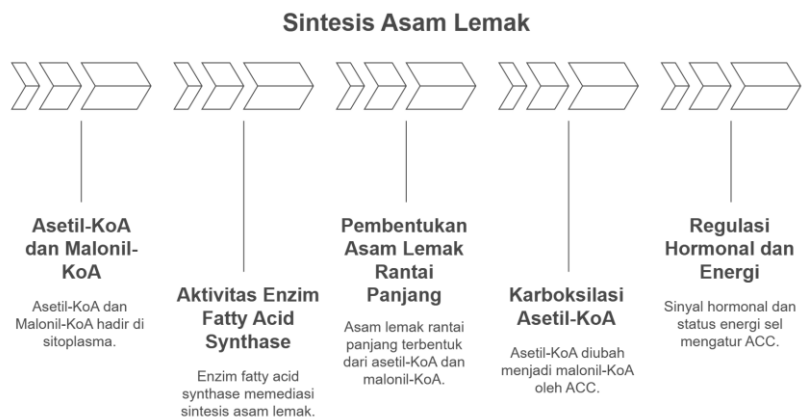
Jalur β -oksidasi dan sintesis asam lemak merupakan dua proses metabolik penting dalam menjaga keseimbangan energi dan homeostasis lipid dalam organisme. β -oksidasi adalah jalur katabolik utama untuk asam lemak, di mana molekul asam lemak diubah secara bertahap di dalam mitokondria menjadi asetil-KoA, NADH, dan FADH_2 melalui serangkaian reaksi enzimatik (Girdhar et al., 2021; Li et al., 2022). Reaksi ini melibatkan oksidasi awal oleh acyl-CoA dehydrogenase, diikuti oleh hidrasi, oksidasi kedua, dan tiolisis. Produk NADH dan FADH_2 selanjutnya digunakan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan ATP, khususnya untuk kebutuhan energi organ seperti jantung, hati, dan otot rangka (Yu et al., 2022).



Gambar 3. 3. Proses β -oksidasi asam lemak

Transportasi asam lemak ke dalam mitokondria bergantung pada karnitin, yang memungkinkan masuknya molekul melalui sistem carnitine palmitoyltransferase (CPT) (Yang et al., 2023). Proses ini diatur secara ketat oleh malonil-KoA, suatu inhibitor alosterik CPT1A, yang menunjukkan adanya hubungan regulasi antara sintesis dan oksidasi asam lemak (Nallanthighal et al., 2020). Dalam keadaan energi surplus, sintesis asam lemak atau lipogenesis mendominasi, sementara pada saat puasa atau kekurangan energi, β -oksidasi diaktifkan untuk memobilisasi cadangan lemak (Yu et al., 2022).

Sebaliknya, sintesis asam lemak terjadi di sitoplasma, terutama di hati dan jaringan adiposa. Proses ini mengubah asetil-KoA dan malonil-KoA menjadi asam lemak rantai panjang melalui kerja enzim fatty acid synthase (Yang et al., 2023; Li et al., 2020). Langkah awal dalam lipogenesis dimulai dengan karboksilasi asetil-KoA menjadi malonil-KoA oleh enzim acetyl-CoA carboxylase (ACC), yang dikontrol oleh sinyal hormonal dan status energi sel (Chen et al., 2020; Green et al., 2020).



Gambar 3. 4. Sintesis Asam Lemak

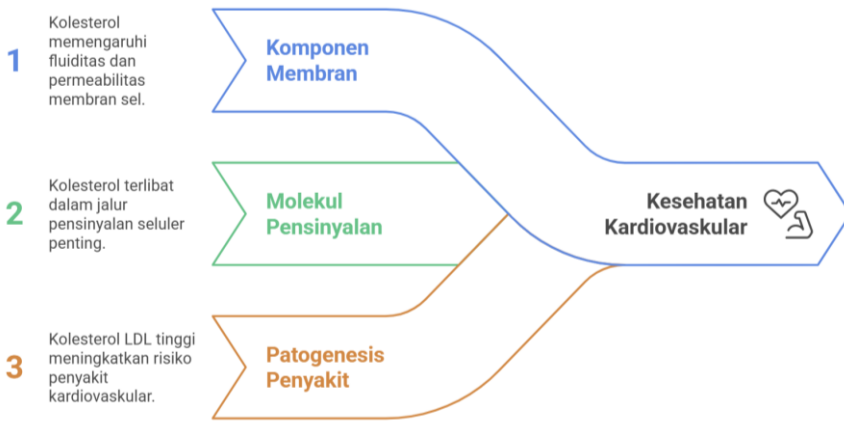
Studi terbaru menunjukkan adanya hubungan antagonistik antara lipogenesis dan β -oksidasi, khususnya dalam konteks patologis seperti kanker. Akumulasi malonil-KoA selama lipogenesis dapat menghambat β -oksidasi, yang menunjukkan persaingan metabolik pada sel kanker, yang cenderung menggunakan asam lemak sebagai sumber energi untuk pertumbuhan (Nallanthighal et al., 2020). Misalnya, sel glioblastoma dapat mengaktifkan β -oksidasi untuk meningkatkan ketahanan terhadap terapi radiasi, mencerminkan pergeseran metabolik yang kompleks (Jiang et al., 2022).

Asupan diet juga berpengaruh terhadap regulasi jalur ini. Asam lemak omega-3 dari makanan terbukti menghambat lipogenesis dan sekaligus meningkatkan β -oksidasi, memberikan kemungkinan pendekatan terapeutik untuk penyakit seperti fatty liver dan sindrom metabolik (Ding et al., 2022; Green et al., 2020).

3.4 Metabolisme Kolesterol dan Lipoprotein

Kolesterol dan lipoprotein memainkan peran penting dalam fisiologi seluler, baik sebagai komponen struktural membran, molekul pensinyal, maupun sebagai faktor dalam patogenesis penyakit kardiovaskular. Sintesis kolesterol terjadi di hampir semua sel mamalia melalui jalur mevalonat, yang dimulai dari kondensasi dua molekul asetil-KoA (Huang et al., 2020). Langkah kunci dalam jalur ini adalah konversi HMG-KoA menjadi mevalonat oleh enzim HMG-CoA reductase, yang menjadi target utama obat statin

(Liu et al., 2021)



Gambar 3. 5. Peran kolesterol dalam kesehatan jantung

Homeostasis kolesterol dikendalikan oleh keseimbangan antara sintesis, penyerapan, penyimpanan, dan ekskresi. Penyerapan kolesterol terutama terjadi melalui partikel LDL yang diambil oleh sel melalui reseptor LDL (Li et al., 2020). Kolesterol yang berlebih disimpan sebagai ester kolesterol melalui enzim ACAT dan juga dapat dikeluarkan dalam bentuk asam empedu atau partikel lipoprotein dari hati (Huang et al., 2020; Kenny et al., 2020)

Lipoprotein berfungsi sebagai sistem transportasi lipid dalam plasma. Kelas utama meliputi kilomikron, VLDL, IDL, LDL, dan HDL. LDL dikenal sebagai “kolesterol jahat” karena keterkaitannya dengan aterosklerosis, sedangkan HDL dikenal sebagai “kolesterol baik” karena kemampuannya mengangkut kolesterol kembali ke hati untuk ekskresi (Qin et al., 2020)

Dalam beberapa penyakit, metabolisme kolesterol yang tidak terkontrol dapat memicu tumorigenesis melalui mekanisme seperti penghindaran ferroptosis dan modulasi sistem imun (Zhang et al., 2021; Xiao et al., 2023). Bahkan, mikrobiota usus juga berkontribusi terhadap metabolisme kolesterol melalui interaksi nutrisi dan imunologis (Kenny et al., 2020).

3.5 Gangguan Metabolisme Lemak pada Hewan

Gangguan metabolisme lemak pada hewan merupakan permasalahan klinis yang kompleks dalam kedokteran hewan. Salah satu gangguan yang umum adalah hiperlipidemia, yaitu tingginya kadar lipid dalam darah yang banyak ditemukan pada anjing dengan gangguan endokrin seperti hipotiroidisme dan sindrom Cushing (Sieber-Ruckstuhl et al., 2022). Ketidakseimbangan hormon ini dapat menghambat pemecahan lipid dan menyebabkan penumpukan trigliserida dalam hati atau disebut steatosis hepatic (Knebel et al., 2020)

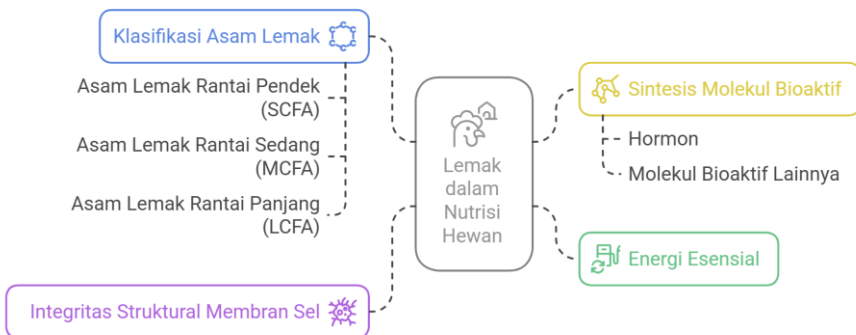
Selain faktor endokrin, lingkungan dan diet juga memengaruhi metabolisme lemak. Paparan senyawa toksik seperti carbendazim pada ikan zebra dilaporkan mengganggu metabolisme glikolipid dan menyebabkan akumulasi lipid di hati (Bao et al., 2020; Costa et al., 2022)

Faktor genetik juga memiliki peran signifikan. Mutasi pada gen yang terkait dengan lipogenesis dapat menyebabkan lipodistrofi, yakni distribusi abnormal lemak tubuh dan penumpukan lipid pada jaringan non-adiposa (Knebel et al., 2020). Selain itu, ritme sirkadian juga

berpengaruh terhadap regulasi metabolisme lipid. Gangguan jam biologis terbukti berhubungan dengan hiperlipidemia dan steatosis hepatik, sebagaimana terlihat pada model tikus dengan ritme sirkadian terganggu (Kim et al., 2021)

Secara klinis, gangguan ini dapat menyebabkan penyakit serius seperti pankreatitis, penyakit hati, dan gangguan kardiovaskular. Akumulasi lipid kronis memicu stres oksidatif dan inflamasi yang dapat berkembang menjadi non-alcoholic steatohepatitis (NASH), fibrosis hati, hingga sirosis (Hewage et al., 2022). Penanganannya meliputi diet rendah lemak, pengelolaan berat badan, serta terapi farmakologis untuk mengoreksi gangguan hormonal. Riset terbaru juga mengeksplorasi obat yang dapat memodulasi metabolisme asam lemak dan meredakan resistensi insulin (Blokhin et al., 2023).

3.6 Kebutuhan Lemak dalam Nutrisi Veteriner



Gambar 3. 6. Peran lemak dalam nutrisi hewan

Lemak sangat penting dalam nutrisi hewan karena menyediakan energi, menjaga struktur membran sel, dan mendukung sintesis molekul bioaktif seperti hormon. Asam lemak diklasifikasikan berdasarkan panjang rantai karbon dan tingkat kejenuhan. Asam lemak rantai pendek (SCFA), sedang (MCFA), dan panjang (LCFA) memiliki fungsi metabolik yang berbeda (Kimura et al., 2020; Pedersen et al., 2023)

Beberapa asam lemak esensial, seperti linoleat (omega-6) dan alfa-linolenat (omega-3), tidak dapat disintesis oleh hewan dan harus diperoleh dari makanan. Selain itu, EPA dan DHA, dua asam lemak omega-3 rantai panjang, terbukti memiliki efek anti-inflamasi dan mendukung fungsi kognitif, terutama pada masa pertumbuhan, kehamilan, dan laktasi (Prasinou et al., 2020; Wood et al., 2021)

Menurut National Research Council (NRC), anjing dewasa memerlukan asupan lemak sekitar 5-10% dari total kalori, tergantung pada usia, ukuran, dan status kesehatannya (Kumar et al., 2024). Pada ternak, konsumsi lemak yang cukup dapat meningkatkan kesuburan dan kualitas daging, karena lemak mempengaruhi profil asam lemak dalam produk daging (Cattalam et al., 2021; Pinheiro et al., 2023)

Rasio omega-6 terhadap omega-3 sangat penting dalam mencegah kondisi inflamasi kronis. Diet komersial sering kali terlalu kaya akan omega-6, yang bersumber dari minyak nabati, tanpa keseimbangan asupan omega-3 dari sumber seperti minyak ikan atau alga (Kumar et al., 2024; Pedersen et al., 2023)

3.7 Penutup

Lipid memainkan peran yang sangat penting dalam sistem biologis hewan, mulai dari fungsi struktural hingga regulasi metabolik. Melalui klasifikasi yang sistematis dan pemahaman struktur molekul, kita dapat mengelompokkan lipid menjadi berbagai kategori fungsional yang mendasari aktivitas biologis yang kompleks. Proses metabolisme lipid seperti β -oksidasi dan lipogenesis menunjukkan dinamika metabolik yang saling berlawanan namun terkoordinasi, yang sangat penting dalam menjaga homeostasis energi dan integritas fisiologis hewan. Demikian pula, metabolisme kolesterol dan lipoprotein menunjukkan keterkaitan yang erat antara struktur lipid dan konsekuensi klinis yang menyertainya.

Gangguan metabolisme lipid, baik akibat faktor genetik, endokrin, lingkungan, maupun diet, memberikan tantangan tersendiri dalam praktik veteriner. Kondisi seperti hiperlipidemia, steatosis hepatik, dan gangguan metabolik lainnya bukan hanya berdampak pada kesehatan hewan, tetapi juga memerlukan pendekatan manajemen yang berbasis pada pemahaman biokimia yang mendalam. Selain itu, pengaturan nutrisi lemak yang tepat, termasuk pemilihan jenis dan rasio asam lemak, merupakan langkah penting dalam mendukung kesehatan dan produktivitas hewan secara berkelanjutan.

Dengan memahami struktur, metabolisme, serta implikasi klinis dan nutrisi dari lipid, mahasiswa diharapkan mampu mengintegrasikan ilmu biokimia dalam proses pengambilan keputusan diagnostik dan terapeutik yang lebih tepat. Bab ini sekaligus menjadi fondasi bagi

pemahaman lebih lanjut mengenai peran lipid dalam konteks penyakit kompleks dan pendekatan nutrigenomik di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bao, Z., Zhao, Y., Wu, A., Lou, Z., Lu, H., Yu, Q., Fu, Z., & Jin, Y. (2020). Sub-Chronic Carbendazim Exposure Induces Hepatic Glycolipid Metabolism Disorder Accompanied by Gut Microbiota Dysbiosis in Adult Zebrafish (Daino Rerio). *The Science of the Total Environment*, 739, 140081.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140081>
- Bian, X., Liu, R., Meng, Y., Xing, D., Xu, D., & Lu, Z. (2020). Lipid Metabolism and Cancer. *The Journal of Experimental Medicine*, 218(1).
<https://doi.org/10.1084/jem.20201606>
- Blokhin, M. E., Kuranov, S. O., Хвостов, М. В., Фоменко, В. В., Luzina, O. A., Zhukova, N., Elhajjar, C., Толстикова, Т. Г., & Салахутдинов, Н. Ф. (2023). Terpene-Containing Analogues of Glitazars as Potential Therapeutic Agents for Metabolic Syndrome. *Current Issues in Molecular Biology*, 45(3), 2230–2247.
<https://doi.org/10.3390/cimb45030144>
- Bonney, J. R., & Prentice, B. M. (2021). Perspective on Emerging Mass Spectrometry Technologies for Comprehensive Lipid Structural Elucidation. *Analytical Chemistry*, 93(16), 6311–6322.
<https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c00061>
- Cattellam, J., Argenta, F. M., Filho, D. C. A., Brondani, I. L., Nörnberg, J. L., Pacheco, R. F., Mayer, A. R., Machado, D. S., Teixeira, O. d. S., & Borchate, D. (2021). Nutritional Management and Sexual Condition in Cattle Determine Differentiation in the Fatty Acid Profile of Meat. *Semina Ciências Agrárias*, 42(4), 2453–2470.
<https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n4p2453>
- Chen, X., Shang, L., Deng, S., Li, P., Chen, K., Gao, T., Zhang, X.,

- Chen, Z., & Zeng, J. (2020). Peroxisomal Oxidation of Erucic Acid Suppresses Mitochondrial Fatty Acid Oxidation by Stimulating Malonyl-CoA Formation in the Rat Liver. *Journal of Biological Chemistry*, 295(30), 10168–10179.
<https://doi.org/10.1074/jbc.ra120.013583>
- Conroy, M. J., Andrews, R., Andrews, S., Cockayne, L., Dennis, E. A., Fahy, E., Gaud, C., Griffiths, W. J., Jukes, G., Kolchin, M., Mendivelso, K., Lopez-Clavijo, A. F., Ready, C., Subramaniam, S., & O'Donnell, V. B. (2023). LIPID MAPS: Update to Databases and Tools for the Lipidomics Community. *Nucleic Acids Research*, 52(D1), D1677–D1682. <https://doi.org/10.1093/nar/gkad896>
- Costa, R. M., Chaib, V. R. M. e, Domingues, A. G., Rubio, K. T. S., & Martucci, M. E. P. (2022). Untargeted Metabolomics Reveals Lipid Impairment in the Liver of Adult Zebrafish (*Danio Rerio*) Exposed to Carbendazim. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(2), 437–448. <https://doi.org/10.1002/etc.5534>
- Ding, Q., Hao, Q., Zhang, Q., Yang, Y., Olsen, R. E., Ringø, E., Ran, C., Zhang, Z., & Zhou, Z. (2022). DHA Suppresses Hepatic Lipid Accumulation via Cyclin D1 in Zebrafish. *Frontiers in Nutrition*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.797510>
- Girdhar, K., Powis, A., Raisingani, A., Chrudinová, M., Huang, R., Tran, T. M., Sevgi, K., Dogru, Y. D., & Altındış, E. (2021). Viruses and Metabolism: The Effects of Viral Infections and Viral Insulins on Host Metabolism. *Annual Review of Virology*, 8(1), 373–391. <https://doi.org/10.1146/annurev-virology-091919-102416>
- Green, C., Pramfalk, C., Charlton, C., Gunn, P. J., Cornfield, T., Pavlides, M., Karpe, F., & Hodson, L. (2020). Hepatic De Novo Lipogenesis Is Suppressed and Fat Oxidation Is

- Increased by Omega-3 Fatty Acids at the Expense of Glucose Metabolism. *BMJ Open Diabetes Research & Care*, 8(1), e000871. <https://doi.org/10.1136/bmjdr-2019-000871>
- Hewage, S. M., Au-Yeung, K. K. W., Prashar, S., Wijerathne, C. U. B., Karmin, O., & Siow, Y. L. (2022). Lingonberry Improves Hepatic Lipid Metabolism by Targeting Notch1 Signaling. *Antioxidants*, 11(3), 472. <https://doi.org/10.3390/antiox11030472>
- Huang, B., Song, B., & Xu, C. (2020). Cholesterol Metabolism in Cancer: Mechanisms and Therapeutic Opportunities. *Nature Metabolism*, 2(2), 132–141. <https://doi.org/10.1038/s42255-020-0174-0>
- Jiang, N., Xie, B., Xiao, W., Fan, M., Xu, S., Duan, Y., Hamsafar, Y., Evans, A. C., Huang, J., Zhou, W., Lin, X., Ye, N., Wanggou, S., Chen, W., Jing, D., Fragoso, R., Dugger, B. N., Wilson, P. F., Coleman, M. A., ... Li, J. J. (2022). Fatty Acid Oxidation Fuels Glioblastoma Radioresistance With CD47-mediated Immune Evasion. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29137-3>
- Kenny, D. J., Plichta, D. R., Shungin, D., Koppel, N., Hall, A. B., Fu, B., Vasan, R. S., Shaw, S. Y., Vlamakis, H., Balskus, E. P., & Xavier, R. J. (2020). Cholesterol Metabolism by Uncultured Human Gut Bacteria Influences Host Cholesterol Level. *Cell Host & Microbe*, 28(2), 245–257.e6. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2020.05.013>
- Kim, H., Wei, J., Song, Z., Mottillo, E. P., Samavati, L., Zhang, R., Li, L., Chen, X., Jena, B. P., Lin, J. D., Fang, D., & Zhang, K. (2021). Regulation of Hepatic Circadian Metabolism by the E3 Ubiquitin Ligase HRD1-controlled CREBH/PPAR α Transcriptional Program. *Molecular Metabolism*, 49, 101192. <https://doi.org/10.1016/j.molmet.2021.101192>

- Kimura, I., Ichimura, A., Ohue-Kitano, R., & Igarashi, M. (2020). Free Fatty Acid Receptors in Health and Disease. *Physiological Reviews*, 100(1), 171–210. <https://doi.org/10.1152/physrev.00041.2018>
- Knebel, B., Müller-Wieland, D., & Kotzka, J. (2020). Lipodystrophies—Disorders of the Fatty Tissue. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(22), 8778. <https://doi.org/10.3390/ijms21228778>
- Kumar, R., Goswami, M., & Pathak, V. (2024). Gas Chromatography Based Analysis of Fatty Acid Profiles in Poultry Byproduct-Based Pet Foods: Implications for Nutritional Quality and Health Optimization. *Asian Journal of Research in Biochemistry*, 14(4), 1–17. <https://doi.org/10.9734/ajrb/2024/v14i4289>
- Li, J., Xia, Q., Di, C., Li, C., Si, H., Zhou, B., Yu, S., Li, Y., Huang, J., Lu, Y., Huang, M., Liang, H., Liu, X., & Zhao, Q. (2022). Tumor Cell-Intrinsic CD96 Mediates Chemoresistance and Cancer Stemness by Regulating Mitochondrial Fatty Acid β -Oxidation. *Advanced Science*, 10(7). <https://doi.org/10.1002/advs.202202956>
- Liebisch, G., Fahy, E., Aoki, J., Dennis, E. A., Durand, T., Ejsing, C. S., Fedorova, M., Feußner, I., Griffiths, W. J., Köfeler, H., Merrill, A. H., Murphy, R. C., O'Donnell, V. B., Oskolkova, O., Subramaniam, S., Wakelam, M. J., & Spener, F. (2020). Update on LIPID MAPS Classification, Nomenclature, and Shorthand Notation for MS-derived Lipid Structures. *The Journal of Lipid Research*, 61(12), 1539–1555. <https://doi.org/10.1194/jlr.s120001025>
- Liu, W., Chakraborty, B., Safi, R., Kazmin, D., Chang, C., & McDonnell, D. P. (2021). Dysregulated Cholesterol Homeostasis Results in Resistance to Ferroptosis Increasing Tumorigenicity and Metastasis in Cancer. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25354-4>

- Nallanthighal, S., Rada, M., Heiserman, J. P., Cha, J., Sage, J., Zhou, B., Yang, W., Hu, Y., Korgaonkar, C., Hanos, C. T., Ashkavand, Z., Norman, K. R., Oršulić, S., & Cheon, D. (2020). Inhibition of Collagen XI Alpha 1-Induced Fatty Acid Oxidation Triggers Apoptotic Cell Death in Cisplatin-Resistant Ovarian Cancer. *Cell Death and Disease*, 11(4). <https://doi.org/10.1038/s41419-020-2442-z>
- Pedersen, K., Ipsen, D. H., Skat-Rørdam, J., Lykkesfeldt, J., & Tveden-Nyborg, P. (2023). Dietary Long-Chain Fatty Acids Accelerate Metabolic Dysfunction in Guinea Pigs With Non-Alcoholic Steatohepatitis. *Nutrients*, 15(11), 2445. <https://doi.org/10.3390/nu15112445>
- Pinheiro, R. S. B., Farias, I. M. S. C. de, Francisco, C. L., & Moreno, G. M. B. (2023). Physicochemical Quality and Fatty Acid Profile in the Meat of Goats Fed Forage Cactus as a Substitute for Tifton 85 Hay. *Animals*, 13(6), 957. <https://doi.org/10.3390/ani13060957>
- Prasinou, P., Crisi, P. E., Chatgililoglu, C., Tommaso, M. D., Sansone, A., Gramenzi, A., Belà, B., Santis, F. D., Boari, A., & Ferreri, C. (2020). The Erythrocyte Membrane Lipidome of Healthy Dogs: Creating a Benchmark of Fatty Acid Distribution and Interval Values. *Frontiers in Veterinary Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00502>
- Qin, W., Yang, Z., Li, M., Chen, Y., Zhao, X., Qin, Y., Song, J., Wang, B.-B., Yuan, B., Cui, X., Shen, F., He, J., Bi, Y., Ning, G., Fu, J., & Wang, H. (2020). High Serum Levels of Cholesterol Increase Antitumor Functions of Nature Killer Cells and Reduce Growth of Liver Tumors in Mice. *Gastroenterology*, 158(6), 1713–1727. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2020.01.028>
- Randolph, C. E., Blanksby, S. J., & McLuckey, S. A. (2020). Enhancing Detection and Characterization of Lipids

- Using Charge Manipulation in Electrospray Ionization-Tandem Mass Spectrometry. *Chemistry and Physics of Lipids*, 232, 104970.
<https://doi.org/10.1016/j.chemphyslip.2020.104970>
- Sapir, A. (2020). Not So Slim Anymore—Evidence for the Role of SUMO in the Regulation of Lipid Metabolism. *Biomolecules*, 10(8), 1154.
<https://doi.org/10.3390/biom10081154>
- Sieber-Ruckstuhl, N. S., Tham, W. K., Baumgartner, F., Selva, J., Wenk, M. R., Burla, B., & Boretti, F. S. (2022). Serum Lipidome Signatures of Dogs With Different Endocrinopathies Associated With Hyperlipidemia. *Metabolites*, 12(4), 306.
<https://doi.org/10.3390/metabo12040306>
- Wood, J., Minter, L. J., Stoskopf, M. K., Bibus, D., Ange, D., Tollefson, T. N., Fellner, V., & Heugten, K. A. (2021). Investigation of Dried Blood Spot Cards for Fatty Acid Analysis Using Porcine Blood. *Veterinary Medicine International*, 2021, 1–4.
<https://doi.org/10.1155/2021/6624751>
- Xiao, M., Xu, J., Wang, W., Zhang, B., Liu, J., Li, J., Xu, H., Zhao, Y., Yu, X., & Shi, S. (2023). Functional Significance of Cholesterol Metabolism in Cancer: From Threat to Treatment. *Experimental & Molecular Medicine*, 55(9), 1982–1995. <https://doi.org/10.1038/s12276-023-01079-w>
- Yang, X., Bie, X., Liu, H., Shi, X., Zhang, D., Zhao, D., Yu, H., Yang, J., Yan, W., Chen, G., Chen, L., Zhu, Z., Yang, F., Ma, X., Liu, X., Zheng, H., & Zhang, K. (2023). Metabolomic Analysis of Pig Spleen Reveals African Swine Fever Virus Infection Increased Acylcarnitine Levels to Facilitate Viral Replication. *Journal of Virology*, 97(8).
<https://doi.org/10.1128/jvi.00586-23>

Yu, H. K., Ok, S., Kim, S.-M., & Sohn, J. (2022). Anesthetic Management of Patients With Carnitine Deficiency or a Defect of the Fatty Acid β -Oxidation Pathway. *Medicine*, 101(7), e28853. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000028853>

BAB 4

ASAM NUKLEAT

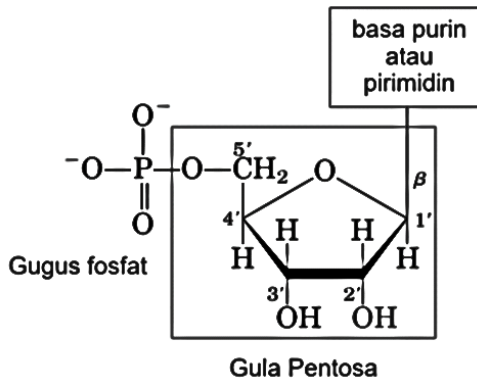
Oleh Elva Stiawan

Sel merupakan unit terkecil pembangun makhluk hidup yang secara umum memiliki organel-organel dengan fungsi khusus tertentu. Sel sendiri secara umum dapat dikategorisasikan menjadi sel eukariot dan sel prokariot meskipun di beberapa kalangan atau kajian sudah mendefinisikan bahwa istilah sel hanya dibatasi di kelompok eukariot, bahkan lebih spesifik lagi sel mamalia. Sebagai contoh, di dalam bidang biofarmasi seringkali sudah dipahami maksud istilah kultur sel adalah kegiatan kultivasi terhadap sel mamalia, sedangkan istilah tersebut terkadang kurang disepakati untuk kultivasi lainnya, semisal kultur bakteri, kultur mikobakteria, atau kultur virus. Sel prokariot sendiri merupakan organisme uniseluler sederhana yang salah satu sifatnya adalah tidak memiliki inti sel atau organel dengan membran ganda. Contoh dari sel prokariot adalah bakteri. Sebaliknya, sel eukariot memiliki inti sel dan organel-organel dengan membran ganda. Di dalam sel terdapat serangkaian reaksi sintesis biomolekul dan metabolisme yang beragam dari molekul sederhana sampai makromolekul (asam nukleat, karbohidrat, dan protein).

Sehubungan dengan kajian informasi genetik terdapat istilah yang umum untuk dikenal di dalam ilmu hayati, misalnya istilah gen dan genom. Gen dapat diungkapkan sebagai materi genetik yang tersusun atas urutan nukleotida tertentu yang berada pada kromosom, sedangkan genom merupakan keseluruhan informasi genetik yang dimiliki suatu sel atau organisme. Kromosom merupakan untai kode genetik suatu organisme yang terkemas sedemikian rupa. Pada sel eukariot, kromosom paling banyak terdapat di dalam inti sel dengan sebagian kecil materi genetik terdapat pula di mitokondria dan di kloroplas pada tumbuhan. Sementara itu, kromosom sirkuler pada sel prokariot terdapat di sitoplasma, area tersebut dinamai nukleoid. Sementara itu, genom merupakan keseluruhan informasi genetik yang dimiliki suatu sel atau organisme atau dapat pula dimaknai sebagai keseluruhan asam nukleat yang memuat informasi genetik. Gen didefinisikan sebagai materi genetik yang tersusun atas polimer nukleotida yang berada pada kromosom. Berdasarkan *National Human Genome Research Institute*, gen merupakan unit dasar pewarisan genetik yang diturunkan dari orang tua pada keturunannya.

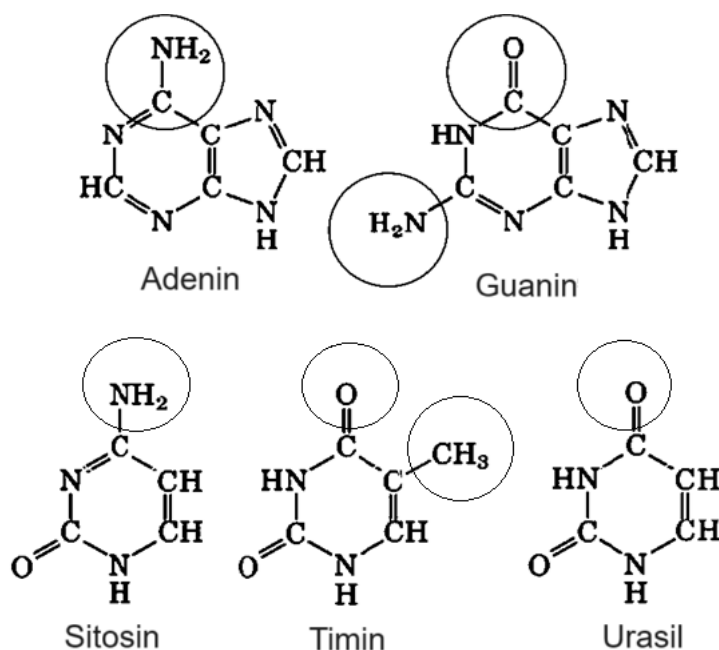
4.1 Struktur Monomer dan Makromolekul Pembawa Informasi Genetik

Nukleotida merupakan monomer atau unit pembangun dari asam nukleat sebagai biomakromolekul yang telah dikenal luas sebagai pembawa materi genetik. Satu molekul nukleotida terdiri atas basa nitrogen, gula, dan fosfat ditunjukkan oleh Gambar 4.1.



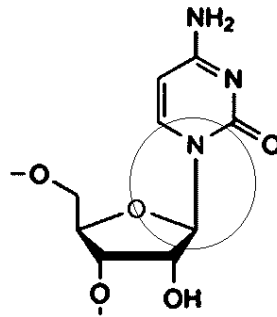
Gambar 4. 1. Struktur umum nukleotida yang terdiri atas basa dan gula (di dalam tanda kotak) serta gugus fosfat (Nelson & Cox, 2013)

Terdapat dua tipe basa nitrogen pada nukleotida, yaitu purin dan pirimidin. Gambar 4.2. menunjukkan struktur kimia dari basa purin dan pirimidin. Tampak terdapat beberapa perbedaan gugus fungsi baik sesama basa purin maupun pirimidin.



Gambar 4. 2. Beberapa contoh nukleotida kelompok purin (atas) dan pirimidin (bawah) dengan sejumlah gugus fungsi yang diberi tanda lingkaran sebagai pembeda

Basa pada nukleotida terdiri atas basa purin dan pirimidin. Adenin (6-amino purin dan Guanin (2-amino-6 keto purin) tergolong basa purin, sedangkan sitosin (2-keto-4-amino pirimidin) dan Timin (atau urasil pada RNA) termasuk basa pirimidin). Cincin pentosa pada nukleotida terikat kepada gugus nukleosida melalui ikatan β -N-Glikosidik. Ikatan ini terbentuk di posisi N1 pada pirimidin dan posisi N9 di basa purin (Nelson & Cox, 2013). Ikatan ini sangat stabil terhadap hidrolisis, terutama pada pirimidin, dan dapat diputuskan dengan bantuan asam.



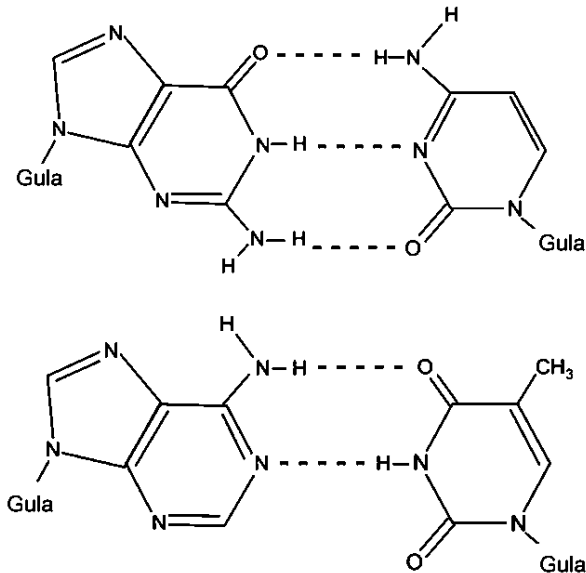
Gambar 4. 3. Ikatan β -N-Glikosidik di dalam nukleotida (diberi tanda lingkaran)

Selain basa-basa yang telah disebutkan diatas, terdapat pula sejumlah nukleotida termodifikasi. Proses modifikasi terjadi setelah transkripsi (RNA) atau replikasi (DNA). Salah satu contohnya adalah Inosin yang merupakan intermediet dalam jalur sintesis purin, sedangkan sisanya terdapat di t-RNA. Sementara itu, contoh lainnya dapat ditunjukkan oleh sejumlah molekul bukleotida yang telah mengalami modifikasi atau derivatisasi di satu atau lebih gugus fungsi yang dimiliki molekul tersebut, antara lain 5-Metilsitidin, Psedouridin, 5-hidroksimetilsitidin, 7-metilguanosin, dan 4-tiouridin. Adapun Nukleotida memiliki sejumlah fungsi lainnya selain dari menjadi unit pembangun asam nukleat. Nukleotida dapat berperan sebagai sumber energi metabolisme, antara lain dalam bentuk ATP, GTP, CTP, atau UTP, dan sebagai kofaktor yang menunjang performa enzim, sebagai contoh NAD⁺, NADP⁺, dan FAD. Sementara itu, terdapat pula beberapa nukleotida yang berperan sebagai peyokong hantaran sinyal untuk menjalankan sejumlah fungsi koordinasi tubuh, misalnya dalam bentuk siklik

adenosin monofosfat (cAMP) dan siklik guanosin monofosfat (cGMP).

Sehubungan dengan fungsi di dalam tubuh organisme, asam nukleat tidak hanya memiliki satu peran yang populer berupa penyimpanan informasi genetik. Terdapat sejumlah fungsi lain yang dapat ditunjukkan oleh asam nukleat dalam hal peran vital biomakromolekul ini di dalam tubuh organisme. Asam nukleat juga memiliki peran di dalam menghantarkan serta menerjemahkan informasi genetik seperti yang ditunjukkan oleh peran mRNA di dalam proses transkripsi dan tRNA dan rRNA di dalam proses tranlasi. Selain itu, terdapat kelompok asam nukleat yang memiliki peran seperti halnya pada enzim, yaitu ribozim yang merupakan salah satu enzim dari golongan non-protein.

Sementara itu, molekul DNA merupakan polimer dari molekul sederhana (nukleotida) yang menentukan sifat-sifat organisme dan diturunkan dari generasi ke generasi. Terdapat beberapa perbedaan antara DNA dengan RNA. Pada DNA, setiap monomernya kehilangan satu atom O pada atom karbon nomor dua. Selain itu, Timin hanya terdapat pada DNA, sedangkan Urasil hanya terdapat pada RNA. Ikatan hidrogen dapat terbentuk antar basa nitrogen. Antara Adenin dan Timin (atau Urasil pada RNA) terbentuk tiga ikatan hidrogen, sedangkan antara Guanin dan Sitosin terbentuk dua ikatan hidrogen.

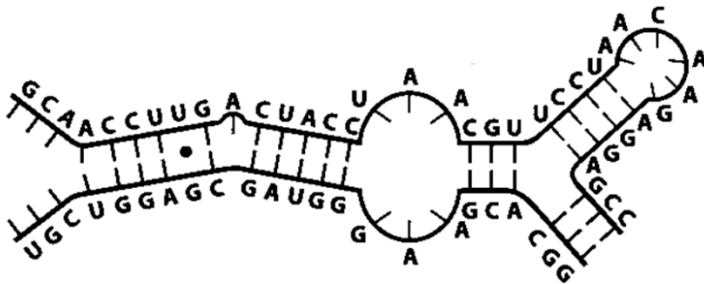


Gambar 4. 4. Ikatan hidrogen antara Adenin-Timin (atas) dan Guanin-Sitosin (bawah) (Lodish Harvey et al., 2008)

Monomer-monomer asam nukleat selanjutnya dapat mengalami reaksi polimerisasi menjadi biomakromolekul berbasis asam nukleat. Monomer-monomer tersebut berpolimerisasi dan terhubung melalui ikatan fosfodiester. Nukleotida-nukleotida terhubung oleh ikatan fosfodiester antara ujung 5'- dengan ujung 3'-gugus hidroksil dari gula. Berdasarkan struktur kimia, DNA memiliki bentuk *double helix* dengan basa satu berpasangan satu dengan yang lain, sedangkan struktur RNA berupa satu untai sehingga cukup beragam disebabkan oleh interaksi yang terjadi antar basa. Seperti halnya ikatan hidrogen yang dapat putus akibat suhu tinggi, suhu tinggi (dan beberapa penyebab lainnya, misalnya enzim tertentu) dapat memutuskan interaksi antar basa nitrogen pada DNA atau disebut dengan denaturasi.

Ketika lepas sempurna, terdapat dua untai DNA yang bentuknya tidak lagi heliks ganda. Selain oleh suhu, DNA juga dapat terputus menjadi dua untai oleh peran enzim yang terlibat dalam pembukaan untai DNA dalam proses replikasi DNA, yaitu helicase dan topoisomerase.

Berbeda dengan DNA yang secara umum memiliki struktur alfa heliks, RNA memiliki struktur yang lebih bervariasi. Banyak RNA memiliki struktur tiga dimensi yang lebih rumit. Molekul RNA yang berupa satu untai memiliki jauh lebih banyak kemungkinan bentuk konformasi daripada molekul DNA. Struktur RNA ditentukan oleh urutan nukleotida penyusunnya. Lipatan dan lekukan pada RNA dipengaruhi oleh ikatan hidrogen dan interaksi antar basa nitrogen.



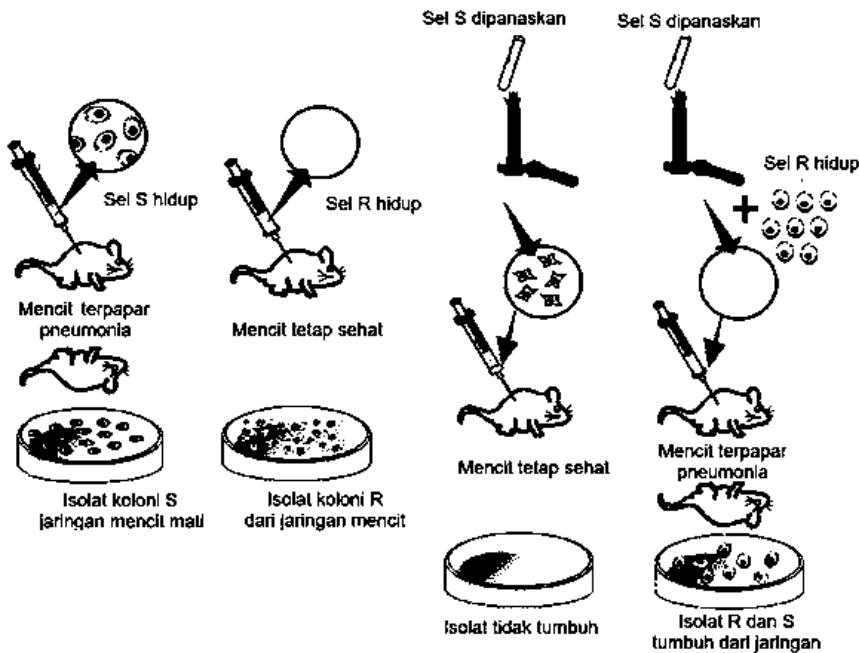
Gambar 4. 5. Salah satu contoh bentuk RNA yang dapat saling berinteraksi secara intramolekuler (Nelson & Cox, 2013)

Selain itu, terdapat juga struktur RNA yang jauh lebih kompleks, misalnya 16S rRNA yang dimiliki oleh sejumlah kelompok mikroba. RNA ini merupakan urutan yang sering digunakan untuk identifikasi mikroba. Pada eukariot, misalnya alga dan fungsi, 18S rRNA seringkali digunakan

untuk mengidentifikasi spesies atau kedekatan suatu organisme dengan organisme lainnya.

4.2 Fungsi Makromolekul Pembawa Informasi Genetik

Sejarah penemuan asam nukleat sebagai pembawa materi genetik merupakan hasil eksperimen Fred Griffith pada tahun 1928 menggunakan *Diplococcus pneumomiae* yang merupakan mikroba dengan dua tipe, yaitu patogen (tipe S) dan non-patogen (tipe R). Penyuntikkan patogen tipe S terhadap tikus mengakibatkan kematian, sedangkan non-patogen tipe R tidak menimbulkan kematian terhadap tikus. Pemanasan mikroba tipe S diketahui menunjukkan tikus tetap dalam keadaan sehat. Kemudian, pengamatan dilanjutkan dengan mikroba tipe S yang dimatikan dengan panas, lalu dicampur dengan mikroba tipe R yang hasil penyuntikkannya mengakibatkan tikus mati. Griffith mengambil kesimpulan bahwa faktor penyebab tikus mati tidak hancur oleh panas dan bisa ter-transformasi ke sel non-patogen. Percobaan kemudian dilanjutkan dengan memberi perlakuan berbeda terhadap tipe S yang telah dimatikan/dipanaskan diberi perlakuan berbeda sebelum dicampur tipe R, yaitu masing-masing direaksikan dengan deoksiribonuklease, ribonuklease, dan protease (Shen, 2019).



Gambar 4. 6. Skema percobaan Fred Griffith pada tahun 1928 (Shen, 2019)

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa baik pemberian ribonuklease maupun pemberian protease menunjukkan pertumbuhan patogen tipe S dan R. Hal yang sama juga ditunjukkan pada hasil pengamatan pada pembiakkan patogen tanpa perlakuan menunjukkan pertumbuhan tipe S dan R. Di sisi lain, pemberian deoksiribonuklease menunjukkan hasil yang berbeda, yaitu patogen tipe R saja yang tumbuh. Temuan ini menunjukkan bahwa pembawa sifat patogen rusak oleh enzim pendegradasi deoksiribonukleat atau sering disingkat sebagai DNA. Pengamatan lebih jauh tadi mengantarkan Griffith ke kesimpulan bahwa aktivitas transformasi rusak oleh keberassan DNase sebagai pendegradasi DNA. Di sisi

lainnya, baik enzim enzim pendegradasi protein maupun pendegradasi RNA tidak mengakibatkan kerusakan (Gambar 4.6).

Percobaan lainnya yang dilakukan Hershey and Chase (1952) melalui infeksi bakteri oleh virus tipe bakteriofage yang dilabeli ^{32}P untuk menandai DNA yang dibandingkan dengan metode yang sama, tetapi dengan label yang berbeda berupa ^{35}S . Teknik ini dilakukan untuk menandai protein dengan tujuan bahwa virus berlabel ^{32}P terus diturunkan dari generasi ke generasi, sedangkan virus berlabel ^{35}S tidak lagi terdeteksi di keturunan berikutnya. Hal tersebut menunjukkan materi genetik yang menurunkan sifat secara turun menurun tidak dibawa oleh protein, yang di dalam kasus ini diwakili oleh ^{35}S , dengan konsiderasi bahwa di dalam protein terdapat sejumlah asam amino yang mengandung komponen Sulfur, yaitu metionin dan sistein. Sementara itu, konsiderasi Fosfor (P) merupakan komponen yang selalu terdapat di dalam polimer asam nukleat. Dengan demikian, hasil studi ini juga menunjukkan bahwa sifat suatu organisme dibawa dan diturunkan oleh keberadaan DNA yang memiliki struktur tulang punggung fosfodiester.

DNA sebagai materi genetik diturunkan ke generasi selanjutnya melalui mekanisme dengan beberapa tahapan. Tahapan-tahapan tersebut antara lain replikasi DNA, transkripsi, dan translasi. Dalam hal replikasi, DNA sebagai asam nukleat terkenal mampu menggandakan diri melalui tahap replikasi. Replikasi DNA memerlukan koordinasi dari beragam tipe protein dan enzim. Pada tahap awal, DNA perlu dibongkar secara struktur agar berbagai protein dengan perannya masing-masing dapat menjalankan fungsinya

terkait replikasi. Contoh-contoh protein yang berperan dalam replikasi DNA antara lain berupa topoisomerase yang berperan di dalam membongkar dan meluruskan untai DNA, helikase yang berperan di dalam membuka untai ganda DNA, DNA polimerase yang bertugas di dalam penggandaan DNA dengan cetakan yang terorganisasi, DNA ligase yang bertugas di dalam mengkatalisis pembentukan ikatan fosfodiester di untai DNA, serta beberapa protein atau enzim lainnya yang sebenarnya masih bisa disebutkan dengan peran-peran yang spesifik.

Tahapan selanjutnya di dalam penurunan sifat organisme adalah transkripsi dan translasi. Tahap transkripsi merupakan proses pembuatan RNA yang disalin dari molekul DNA dengan bantuan enzim RNA polimerase. Selanjutnya, terjadi proses translasi berupa sintesis protein oleh ribosom menggunakan cetakan dari mRNA (*messenger* RNA) hasil transkripsi. Proses translasi ini juga dikenal sebagai proses biosintesis protein. Biosintesis protein berjalan berkaitan dengan tahapan-tahapan ekspresi gen, yaitu diawali dengan transkripsi berupa proses pembuatan RNA yang disalin dari molekul DNA dengan bantuan enzim RNA polimerase dengan tahap akhir berupa translasi berupa proses sintesis protein oleh ribosom menggunakan cetakan dari mRNA. Terdapat lima tahap biosintesis protein yang secara berturut-turut berlangsung dengan tahapan aktivasi asam amino, inisiasi, elongasi, terminasi, pelipatan protein, serta proses pascatranslasi yang terjadi di banyak kasus biosintesis protein (Nelson & Cox, 2013). Adapun proses pascatranslasi dapat ditampilkan dengan sejumlah proses lanjutan atau modifikasi, antara lain penambahan gugus kofaktor atau koenzim, penambahan gugus non-protein di

permukaan protein, proses pelipatan lanjutan secara spesifik dengan bantuan protein kaperon, dan lainnya. Sebagai contoh, kelompok karbohidrat seringkali menjadi gugus non-poliipeptida yang umum ditambahkan dengan produk akhir berupa glikoprotein.

Lebih lanjut, aktivitas-aktivitas yang terkait di dalam penerjemahan dan penurunan informasi genetik umumnya perlu dikontrol sedemikian rupa. Terdapat sejumlah alasan yang mendasari pengontrolan terhadap ekspresi gen, antara lain koordinasi keterkaitan antara satu sel dengan sel atau komponen lainnya, pencegahan biosintesis dari bahan atau senyawa yang tidak dibutuhkan oleh tubuh, serta pencegahan akumulasi produk berkategori toksik. Aspek-aspek yang menjadi penekanan dalam pengontrolan utama informasi genetik antara lain berupa regulasi pembentukan dan aktivitas enzim yang terlibat di dalam ekspresi gen menghasilkan suatu protein, pengontrolan afinitas suatu enzim atau protein fungsional terhadap suatu substrat spesifik, pengaturan laju reaksi dan tampilan struktur yang ditentukan secara genetik, serta penyesuaian ekspresi gen berdasarkan kondisi lingkungan. Regulasi gen dapat dikategorikan dengan regulasi negatif dan regulasi positif. Regulasi negatif menampilkan penghambatan gen yang sedang aktif ditranskripsi melalui peran represor, sedangkan regulasi positif menampilkan bahwa suatu gen tidak selalu diterjemahkan, kecuali melalui keberadaan aktivator. Sebagai contoh, pengontrolan melalui regulasi berdasarkan gen dalam hal pembentukan protein antara lain dapat diaplikasikan oleh tubuh dengan aktivitas pengontrolan poin-poin berupa jumlah salinan gen, efisiensi transkripsi gen, kestabilan mRNA, efisiensi translasi mRNA,

kestabilan produk protein, dampak pascatranslasi, misalnya pelipatan protein, modifikasi kovalen, fosforilasi, dan sebagainya.

4.3 Teknik Laboratorium Dasar terkait Struktur Asam Nukleat

Analisis asam nukleat umumnya diawali dengan tahap isolasi DNA. Isolasi DNA ini secara umum dilakukan melalui pemecahan sel untuk mengeluarkan DNA dan pemisahan DNA dengan komponen lain (protein, karbohidrat, dan lainnya) menggunakan berbagai pelarut yang cocok. Selanjutnya, ekstraksi DNA dilakukan melalui resuspensi menggunakan pelarut yang cocok. Begitu pula teknik yang dilakukan guna mengisolasi DNA total atau genom yang terutama dilakukan dengan tahapan secara berturut-turut antara lain berupa preparasi sampel, misalnya jaringan, sel, atau komponen yang mengandung asam nukleat, pemecahan sel atau jaringan untuk mengeluarkan DNA dan komponen lainnya, pembersihan DNA dari komponen pengotor, dan pengumpulan DNA biasanya melalui metode ekstraksi DNA dan resuspensi menggunakan pelarut yang sesuai serta elusi untuk pengumpulan DNA. Hasil dari isolasi DNA ini yang kemudian umum digunakan sebagai sampel yang relatif bersih dari pengotor untuk analisis atau modifikasi lebih lanjut melalui sejumlah teknik atau metode riset berbasis asam nukleat.

Teknik dasar yang populer selanjutnya adalah pembongkaran dan penempelan untai DNA melalui metode PCR (*Polymerase Chain Reaction*). Teknik ini sering diaplikasikan untuk mengamplifikasi urutan DNA yang

menjadi target analisis melalui sejumlah tahapan. Secara umum, teknik PCR ditampilkan dengan reaksi berantai dengan bantuan enzim polimerisase yang dilanjutkan proses amplifikasi (perbanyak) DNA secara *in vitro*. Prinsip dasar dari teknik ini adalah pengontrolan suhu untuk melepaskan dan menempelkan urutan DNA pendek bernama primer secara berulang di urutan DNA spesifik yang menjadi target untuk diamplifikasi. DNA primer merupakan oligonukleotida spesifik yang berfungsi untuk membatasi fragmen DNA yang akan diamplifikasi. DNA primer disusun komplemen terhadap salah satu untai, dengan ujung 3' sebagai akhir. Terdapat dua tipe primer, yaitu primer maju dan primer mundur yang dikembangkan berdasarkan aspek pertimbangan penempelan terhadap DNA target dan pelepasan di suhu tertentu.

Pembongkaran struktur alfa-heliks dari DNA sangat esensial pada metode PCR. Proses PCR berlangsung melalui siklus dengan variasi temperatur denaturasi ($\pm 94^{\circ}\text{C}$), penempelan primer ($\pm 55^{\circ}\text{C}$), dan perpanjangan ($\pm 72^{\circ}\text{C}$). Keberhasilan dari teknik PCR ini juga dapat ditampilkan oleh satu untai urutan DNA diamplifikasi menjadi berjuta salinan urutan DNA. Seringkali teknik ini digunakan untuk memperjelas tampilan pita DNA yang diinginkan menjadi cukup terbaca oleh metode gel elektroforesis. Elektroforesis gel agarosa sendiri merupakan pemisahan fragmen-fragmen DNA dengan prinsip pemisahan urutan-urutan nukleotida berdasarkan berat molekulnya dengan aliran listrik. DNA yang lebih ringan berjalan lebih cepat daripada DNA yang lebih berat. Hasil elektroforesis dibandingkan dengan standar untuk menentukan keberadaan DNA target. Hasil elektroforesis dilihat di bawah sinar UV untuk melihat pita-

pita urutan DNA. Teknik PCR memiliki beberapa kelebihan berupa sifat yang sensitif dengan amplifikasi secara eksponensial dari DNA yang sangat sedikit, yaitu skala $pg - ng$. Selain itu, teknik ini relatif cepat hingga metode terkini dapat dilakukan kurang dari satu hari serta cenderung aman karena metode ini secara umum berkategori non-radioaktif dan tanpa penggunaan pelarut-pelarut organik yang memiliki tingkat bahaya yang sedang atau tinggi.

Teknik dasar laboratorium lainnya terkait struktur asam nukleat yang cukup fundamental adalah pemotongan dan penyambungan urutan DNA pada plasmid. Konstruksi plasmid bakteri fungsional secara *in vitro* merupakan hasil penelitian Cohen dan rekan-rekannya, yaitu mengenai plasmid resistan antibiotik dan teknik transformasi dengan $CaCl_2$, sebagai sumbangsih dasar teknologi DNA rekombinan. Teknik ini merupakan penggabungan informasi genetik dari sumber yang berbeda guna menghasilkan struktur genetik baru yang dapat dimultiplikasi. Plasmid umum digunakan pada teknik ini. Plasmid merupakan DNA ekstrakromosom yang dapat bereplikasi sendiri. Plasmid sebagai vektor kloning memiliki sejumlah karakteristik antara lain berukuran kecil sehingga relatif mudah dimanipulasi, memiliki kapabilitas untuk ditransfer dari sel ke sel, mudah diisolasi, dideteksi dan diseleksi, bersifat multi kopi sehingga membantu mendapatkan DNA dalam jumlah besar, serta memiliki beberapa sisi pengenalan enzim restriksi.

Terdapat sejumlah bahan utama yang diperlukan dalam penelitian yang memfokuskan kepada plasmid, antara lain enzim restriksi dan enzim ligase. Enzim restriksi merupakan enzim pemotong yang di keadaan alaminya

berfungsi untuk melindungi bakteri dari DNA asing, misalnya virus. Sementara DNA organisme penghasil enzim mengalami metilasi sehingga tidak dapat dipotong. Enzim restriksi memiliki lebih dari satu tipe. Enzim restriksi tipe I berperan dalam memotong DNA pada jarak 1000 bp atau lebih dari sisi pengenalan, sedangkan enzim restriksi tipe II berperan dalam memotong pada bagian tengah sisi pengenalan. Teknik pemotongan DNA juga dibagi menjadi dua tipe, yaitu pemotongan DNA untai ganda pada titik yang sama menghasilkan ujung tumpul dan pemotongan DNA pada titik yang berbeda menghasilkan ujung lancip. Sementara itu enzim ligase adalah enzim penyambung. Sebagai contoh adalah DNA ligase dari T4 bacteriophage yang mengkatalisis pembentukan ikatan antara 3'-OH dari satu untai dan 5'-PO₄ dari untai DNA lain. Melalui pemanfaatan struktur asam nukleat, terutama berupa urutan monomer nukleotida, sejumlah aplikasi yang lebih luas dari baik dari teknik PCR dan DNA rekombinan semakin berkembang untuk diterapkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Lodish Harvey, Berk Arnold, Kaiser Chris A., Krieger Monty, Scott P. Matthew, Bretscher Anthony, Ploegh Hidde, & Matsudaira Paul. (2008). Molecular Cell Biology (Tenney Sara & Ahr Katherine, Eds.; 6th ed.). W. H. Freeman and Company.
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2013). Lehninger: Principles of Biochemistry, Sixth Edition. www.courses.bfwpub.com/lehninger6e.
- Shen, C.-H. (2019). Nucleic Acids: DNA and RNA. In Diagnostic Molecular Biology (pp. 1–25). Elsevier. <https://doi.org/4.1016/b978-0-12-802823-0.00001-8>

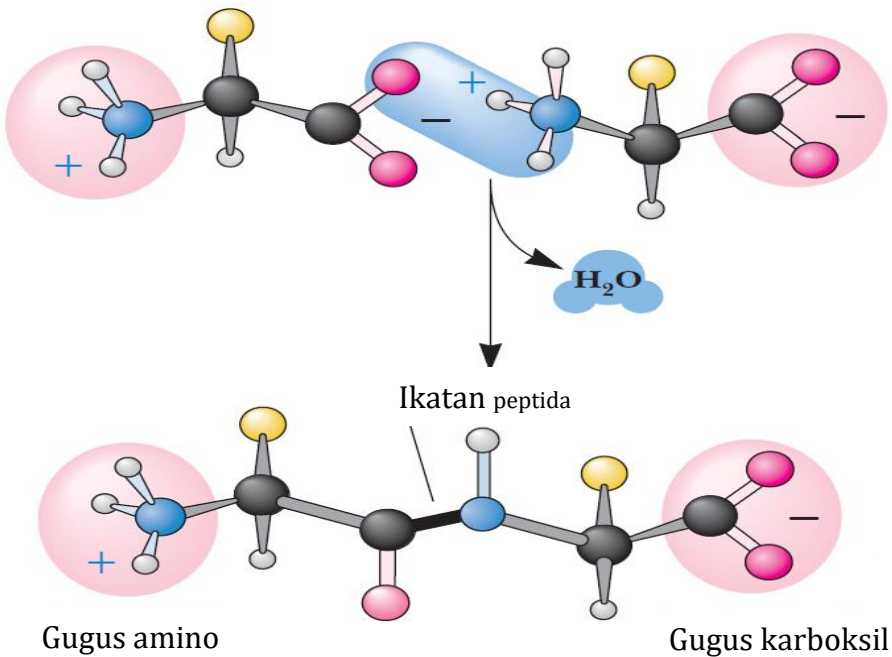
BAB 5

ASAM AMINO DAN PROTEIN

Oleh Ira Oktavia

5.1 Asam Amino

Asam amino merupakan penyusun utama protein, sehingga tiap asam amino disebut sebagai monomer. Atom-atom penyusun utama asam amino diantaranya yaitu karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N) dan atom lain yang ditemukan pada rantai samping seperti sulfur (S) (Kamble *et al.*, 2021). Ikatan yang menghubungkan antar asam amino untuk menyusun protein disebut dengan ikatan peptida. Ikatan peptida terbentuk dari gugus alfa karboksil (-COO^-) asam amino yang bereaksi dengan gugus alfa amino (-NH_2^+) asam amino lainnya sehingga terjadi ikatan -CO-NH- (Vasudevan, S and Vaidyanathan, 2005).



Gambar 5. 1. Proses pembentukan ikatan peptida antar asam amino

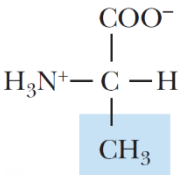
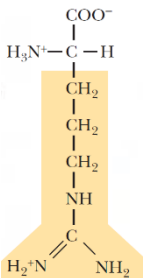
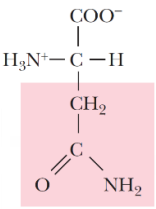
(Campbell and Farrel, 2007)

Dua asam amino yang berikatan disebut dipeptida. Tiga sampai sembilan asam amino yang berikatan disebut oligopeptida. Sedangkan apabila terdiri dari 10-50 asam amino yang berikatan disebut polipeptida. Apabila terdiri lebih dari 50 asam amino maka disebut protein (Vasudevan, S and Vaidyanathan, 2005).

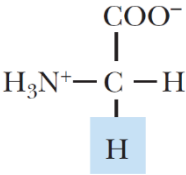
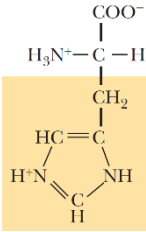
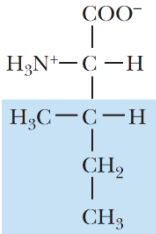
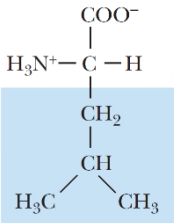
5.1.1 Jenis dan Struktur Asam Amino

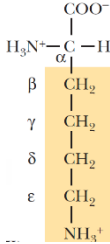
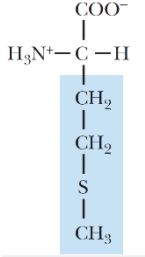
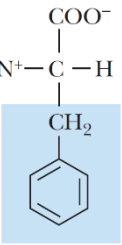
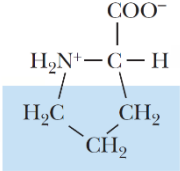
Terdapat 20 jenis asam amino sebagai penyusun protein.

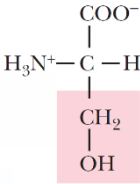
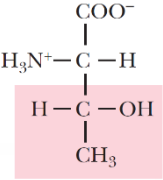
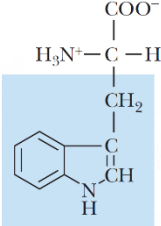
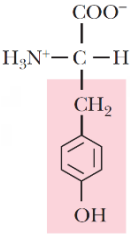
Tabel 5. 1. Daftar jenis asam-amino dan strukturnya

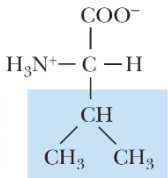
No	Asam Amino	Singkatan 3 Huruf	Singkatan 1 Huruf	Gambar Struktur
1.	Alanin	Ala	A	
2.	Arginin	Arg	R	
3.	Asparagin	Asn	N	

No	Asam Amino	Singkatan 3 Huruf	Singkatan 1 Huruf	Gambar Struktur
4.	Asam aspartat	Asp	D	$ \begin{array}{c} \text{COO}^- \\ \\ \text{H}_3\text{N}^+ - \text{C} - \text{H} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{COO}^- \end{array} $
5.	Sistein	Cys	C	$ \begin{array}{c} \text{COO}^- \\ \\ \text{H}_3\text{N}^+ - \text{C} - \text{H} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{SH} \end{array} $
6.	Asam glutamat	Glu	E	$ \begin{array}{c} \text{COO}^- \\ \\ \text{H}_3\text{N}^+ - \text{C} - \text{H} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{COO}^- \end{array} $
7.	Glutamin	Gln	Q	$ \begin{array}{c} \text{COO}^- \\ \\ \text{H}_3\text{N}^+ - \text{C} - \text{H} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{C} \\ // \quad \backslash \\ \text{O} \quad \text{NH}_2 \end{array} $

No	Asam Amino	Singkatan 3 Huruf	Singkatan 1 Huruf	Gambar Struktur
8.	Glisin	Gly	G	
9.	Histidin	His	H	
10.	Isoleusin	Ile	I	
11.	Leusin	Leu	L	

No	Asam Amino	Singkatan 3 Huruf	Singkatan 1 Huruf	Gambar Struktur
12.	Lisin	Lys	K	
13.	Metionin	Met	M	
14.	Fenilalanin	Phe	F	
15.	Prolin	Pro	P	

No	Asam Amino	Singkatan 3 Huruf	Singkatan 1 Huruf	Gambar Struktur
16.	Serin	Ser	S	 The chemical structure of Serine is shown. It consists of a central alpha-carbon bonded to a hydrogen atom (H), an amino group (H₃N⁺), a carboxylate group (COO⁻), and a side chain. The side chain is highlighted in a pink box and consists of a methylene group (CH₂) bonded to a hydroxyl group (OH).
17.	Treonin	Thr	T	 The chemical structure of Threonine is shown. It consists of a central alpha-carbon bonded to a hydrogen atom (H), an amino group (H₃N⁺), a carboxylate group (COO⁻), and a side chain. The side chain is highlighted in a pink box and consists of a chiral carbon bonded to a hydrogen atom (H), a hydroxyl group (OH), and a methyl group (CH₃).
18.	Triptofan	Trp	W	 The chemical structure of Tryptophan is shown. It consists of a central alpha-carbon bonded to a hydrogen atom (H), an amino group (H₃N⁺), a carboxylate group (COO⁻), and a side chain. The side chain is highlighted in a blue box and consists of a methylene group (CH₂) bonded to an indole ring system.
19.	Tirosin	Tyr	Y	 The chemical structure of Tyrosine is shown. It consists of a central alpha-carbon bonded to a hydrogen atom (H), an amino group (H₃N⁺), a carboxylate group (COO⁻), and a side chain. The side chain is highlighted in a pink box and consists of a methylene group (CH₂) bonded to a para-hydroxyphenyl ring (a benzene ring with an OH group at the para position).

No	Asam Amino	Singkatan 3 Huruf	Singkatan 1 Huruf	Gambar Struktur
20.	Valin	Val	V	

(Campbell and Farrel, 2007)

5.1.2 Klasifikasi Asam Amino

- 1. Klasifikasi berdasarkan polaritas gugus rantai samping (-R)

Tabel 5. 2. Tipe asam amino berdasarkan polaritas -R

No	Tipe	Asam Amino
1.	Non polar alifatik	Ala, Leu, Ilc, Val, Met, Phe, Trp, Pro
2.	Polar tidak bermuatan	Gly, Ser, Thr, Cys, Gln, Asn, Tyr
3.	Polar dengan gugus samping bermuatan positif	Lys, Arg, His
4.	Polar dengan gugus samping bermuatan negatif	Asp, Glu

(Kamble *et al.*, 2021)

Asam amino yang tergolong nonpolar maka bersifat hidrofobik, sehingga hanya dapat berinteraksi dengan molekul-molekul nonpolar saja. Sedangkan asam amino

yang tergolong polar maka bersifat hidrofilik, sehingga di dalam tubuh dapat berinteraksi dengan air yang sangat kuat.

2. Klasifikasi berdasarkan jenis rantai samping (-R)

Setiap asam amino memiliki gugus rantai samping yang khas. Gugus rantai samping tersebut meliputi nonpolar, karboksil, amina, aromatic, hidroksil dan lainnya.

Tabel 5. 3. Jenis asam amino berdasarkan jenis -R

No.	Jenis rantai samping	Asam amino
1.	Nonpolar	Ala, Gly, Ilc, Leu, Met, Pro, Val
2.	Karboksil	Asp, Glu
3.	Amina	Arg, His, Lys
4.	Aromatik	Phe, Trp, Try
5.	Hidroksil	Ser, Thr
6.	Lainnya	Asn, Cys, Gln

(Keiser, 2016)

3. Klasifikasi berdasarkan sumber asam amino

Berdasarkan sumber perolehan, sebanyak 20 asam amino dikelompokkan menjadi tiga jenis. Jenis yang pertama yaitu asam amino esensial, yaitu asam amino

yang hanya dapat diperoleh dari luar tubuh, sehingga perlu konsumsi makanan yang berasal dari hewani maupun nabati. Berikutnya asam amino non-esensial, yaitu asam amino yang dapat disintesis oleh tubuh dengan syarat dalam keadaan sehat. Terakhir asam amino semi-esensial, yaitu asam amino yang dapat diperoleh dari luar tubuh dengan mengkonsumsi makanan. Asam amino semi esensial hanya dibutuhkan oleh anak-anak dalam masa pertumbuhan dan tidak diperlukan pada orang dewasa (Vasudevan, S and Vaidyanathan, 2005).

Tabel 5. 4. Jenis asam amino berdasarkan sumber perolehan

No.	Tipe	Asam amino
1.	Esensial	Val, Leu, Ilc, Phe, Thr, Met, Trp, Lys
2.	Non esensial	Gly, Ala, Ser, Cys, Asn, Asp, Glu, Gln, Tyr, Pro
3.	Semi esensial	His, Arg

(Kamble *et al.*, 2021)

5.2 Protein

Protein terbentuk dari hasil polimerisasi asam amino yang dihubungkan melalui ikatan peptida dan terdiri dari rantai-rantai polipeptida yang besar (Vasudevan, S and Vaidyanathan, 2005). Protein bersifat amfoter, yaitu dapat berperan sebagai basa karena memiliki gugus -NH2 dan dapat berperan sebagai asam karena memiliki gugus -COOH. Protein dapat terdenaturasi atau mengalami kerusakan

apabila dipanaskan, terkena sinar UV atau sinar X, terkena urea, detergent dan lain-lain. Denaturasi dapat terjadi karena struktur protein berubah konformasinya. Akibat denaturasi menyebabkan protein akan inaktif dan kehilangan fungsi biologisnya. Protein yang sudah rusak disebut koagulan (Colver, 2015).

5.2.1 Fungsi Protein

1. Transportasi

Protein berfungsi untuk transport ion-ion atau molekul-molekul kecil dalam tubuh (Colver, 2015).

2. Penyimpan

Protein berfungsi untuk menyimpan molekul sebelum digunakan kembali. Contohnya feritin untuk menyimpan Fe sebelum digunakan untuk mensintesis zat besi (Colver, 2015).

3. Nutrisi

Protein berperan sebagai sumber nutrisi untuk diubah menjadi energi. Contohnya albumin pada telur dan kasein pada susu (Colver, 2015).

4. Pelindung

Protein berfungsi sebagai antibodi untuk melindungi tubuh dari benda asing seperti bakteri maupun virus penyebab penyakit (Colver, 2015).

5. Penyembuhan luka

Protein berperan sebagai pembentuk benang-benang fibrin untuk membentuk kulit baru (Colver, 2015).

6. Transmisi

Protein berperan untuk mentransmisikan sinyal jaringan sinapsis dari otak untuk disampaikan pada reseptor protein lain agar melakukan aktifitas (Colver, 2015).

7. Hormonal

Hormon-hormon pada makhluk hidup merupakan protein yang memiliki fungsi untuk mengatur sistem tubuh. Contohnya insulin berfungsi untuk mengatur kadar gula darah (Colver, 2015).

5.2.2 Struktur Protein

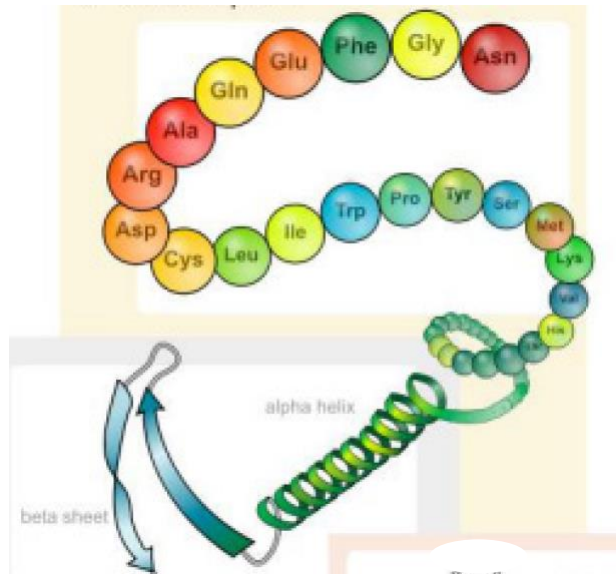
1. Struktur Primer

Pada struktur primer protein tersusun atas rangkaian sederhana asam amino yang terbentuk dari beberapa rantai polipeptida (Meisenberg and Simmons, 2012). Pada tahapan ini protein hanya distabilkan oleh ikatan kovalen yang berasal dari ikatan peptida antar rantai polipeptida (Vasudevan, S and Vaidyanathan, 2005).

2. Struktur Sekunder

- Pada struktur sekunder masing-masing rantai polipeptida protein akan membentuk struktur α -heliks dan ada yang membentuk struktur β -strand atau β -sheet. β -sheet adalah jumlah β -strand yang saling berikatan sejumlah dua atau lebih (Meisenberg and Simmons, 2012). Pada tahapan ini struktur protein distabilkan melalui ikatan-ikatan non-kovalen. Ikatan-ikatan tersebut meliputi yang pertama yaitu ikatan hidrogen. Ikatan hidrogen memiliki gaya elektrostatis lemah yang ditimbulkan oleh atom-atom elektronegatif yang saling berikatan secara kovalen. Berikutnya yang kedua ialah ikatan ionik (ikatan elektrostatis) yang dapat ditimbulkan oleh asam-asam amino dengan muatan negatif dan positif. Selanjutnya yang ketiga ialah interaksi hidrofobik yang terbentuk dari interaksi antar rantai samping hidrofobik yang nonpolar sehingga membentuk daerah lipofilik. Terakhir yang

keempat yaitu interaksi van der Waals yang sangat lemah, namun meski demikian interaksi ini memiliki peran yang sangat besar dalam menstabilkan struktur protein pada tahap sekunder (Vasudevan, S and Vaidyanathan, 2005).



Gambar 5. 2. Struktur primer dan sekunder protein
(Keiser, 2016)

3. Struktur Tersier

Terbentuknya struktur tersier ketika antara struktur α -helix dan β -strand saling berinteraksi melalui ikatan membentuk satu rantai polipeptida. Pada tahapan ini setiap protein satu rantai polipeptida disebut subunit molekul (Meisenberg and Simmons, 2012). Protein pada tahapan struktur tersier distabilkan oleh interaksi-interaksi ikatan non kovalen sama seperti pada tahapan struktur sekunder. Namun perbedaannya pada tahapan ini protein sudah mulai memiliki fungsi biologis

(Vasudevan, S and Vaidyanathan, 2005). Berikut merupakan salah satu contoh struktur tersier lisozim yang terdiri dari satu rantai polipeptida dengan struktur α -heliks dan β -sheet saling berinteraksi.



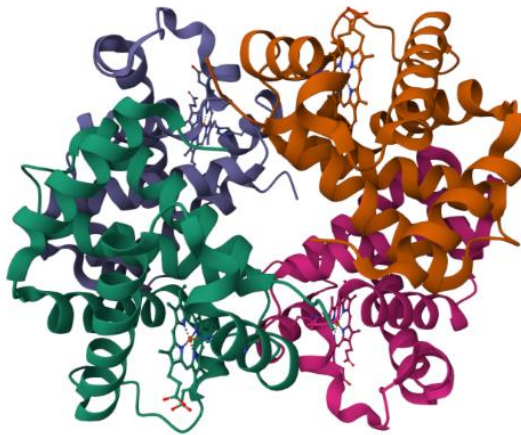
Gambar 5. 3. Struktur tersier protein lisozim

(<https://www.rcsb.org/structure/1GD6> diakses pada 31 Mei 2025)

4. Struktur Kuartener

Pada tahapan struktur kuartener, protein tersusun atas dua atau lebih subunit molekul yang saling berinteraksi (Meisenberg and Simmons, 2012). Struktur kuartener juga distabilkan oleh interaksi ikatan-ikatan non-kovalen. Struktur kuartener hanya terbentuk apabila pada saat mencapai tahapan struktur tersier, protein masih belum memiliki fungsi biologis.

Berdasarkan jumlah penyusun struktur kuartener protein, maka seringkali dikenal istilah homodimer dan heterodimer. Homodimer terdiri atas dua rantai polipeptida yang sama (sejenis) sebagai fungsional unit, contohnya hemoglobin. Sedangkan heterodimer mengandung dua tipe rantai polipeptida yang berbeda sebagai fungsional unit, contohnya immunoglobulin. (Vasudevan, S and Vaidyanathan, 2005). Berikut merupakan salah satu contoh struktur kuartener hemoglobin manusia yang terdiri dari 4 rantai polipeptida sejenis yang saling berinteraksi.



Gambar 5. 4. Struktur kuartener protein hemoglobin
(<https://www.rcsb.org/3d-view/7VDE/1> diakses pada
31 Mei 2025)

DAFTAR PUSTAKA

- Campbell, M. K. and Farrel, S. O. (2007) *Biochemistry*.
- Colver, J. (2015) *Basics of biochemistry, Veterinary Nursing Journal*. doi: 10.1080/17415349.2015.1009270.
- Kamble, C. *et al.* (2021) 'A Review on Amino Acids', *STM Journals*, 8(3), pp. 19–27. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/357957572>.
- Keiser, G. (2016) *Fundamentals of Biochemistry*. doi: 10.1007/978-981-10-0945-7_4.
- Meisenberg, G. and Simmons, W. H. (2012) 'Introduction to Protein Structure', in *Principles of Medical Biochemistry*, pp. 16–30. doi: 10.1016/b978-0-323-07155-0.00002-2.
- Vasudevan, D., S, S. and Vaidyanathan, K. (2005) *Textbook of Biochemistry for Medical Students*.
<https://www.rcsb.org/structure/1GD6> diakses pada 31 Mei 2025
- <https://www.rcsb.org/3d-view/7VDE/1> diakses pada 31 Mei 2025

BAB 6

VITAMIN

Oleh Waode Rustiah

6.1 Pendahuluan

Vitamin merupakan senyawa organik esensial yang diperlukan tubuh dalam jumlah kecil untuk menunjang berbagai fungsi biologis penting. Berbeda dengan makronutrien seperti karbohidrat, protein, dan lemak, vitamin tidak menghasilkan energi, tetapi berperan sebagai kofaktor enzimatik, pengatur metabolisme, serta pelindung sel melalui aktivitas antioksidannya.

Konsep vitamin pertama kali diperkenalkan oleh Casimir Funk pada tahun 1912, saat ia meneliti penyakit beri-beri yang ternyata disebabkan oleh kekurangan zat gizi tertentu. Sejak itu, penelitian tentang vitamin berkembang pesat dan berbagai vitamin telah diidentifikasi, masing-masing memiliki fungsi unik dalam menjaga kesehatan. Penyakit-penyakit yang dahulu umum terjadi, seperti skorbut, rakhitis, dan pelagra, kini dapat dicegah dengan asupan vitamin yang memadai.

Vitamin secara umum dibagi menjadi dua kategori utama: vitamin yang larut dalam lemak (A, D, E, dan K) dan yang larut dalam air (vitamin B kompleks dan C). Vitamin larut lemak cenderung disimpan dalam jaringan tubuh dan

memiliki risiko toksisitas yang lebih tinggi bila dikonsumsi berlebihan. Sementara itu, vitamin larut air tidak disimpan dalam jumlah banyak, sehingga perlu asupan rutin setiap hari.

Kebutuhan vitamin dapat bervariasi tergantung usia, jenis kelamin, kondisi fisiologis, dan status kesehatan individu. Di berbagai wilayah, terutama negara berkembang, kekurangan vitamin masih menjadi masalah gizi utama, khususnya pada kelompok rentan seperti balita, ibu hamil, dan lansia. Sebaliknya, penggunaan suplemen vitamin yang tidak tepat juga dapat menimbulkan efek samping.

Untuk itu, pemahaman yang komprehensif tentang jenis-jenis vitamin, sumber alaminya, kebutuhan harian, hingga dampak kekurangan dan kelebihan, sangat penting. Bab ini akan membahas secara terperinci masing-masing vitamin, termasuk struktur, fungsi fisiologis, manifestasi klinis defisiensinya, serta perannya dalam pencegahan dan pengobatan penyakit.

6.2 Klasifikasi dan Karakteristik Vitamin

Vitamin diklasifikasikan berdasarkan kelarutannya menjadi dua kelompok utama, yaitu vitamin larut dalam lemak dan vitamin larut dalam air. Kelarutan ini memengaruhi cara vitamin diserap, ditransportasikan, disimpan, dan dikeluarkan dari tubuh. Pemahaman terhadap karakteristik ini penting untuk memahami efek fisiologis serta risiko kekurangan atau kelebihan masing-masing vitamin.

6.2.1 Vitamin Larut dalam Lemak

Vitamin larut dalam lemak terdiri dari vitamin A, D, E, dan K. Vitamin ini memerlukan keberadaan lemak dalam makanan untuk proses absorpsi di usus halus. Setelah diserap, vitamin-vitamin ini ditransportasikan melalui sistem limfatik dalam bentuk kompleks lipoprotein dan sebagian besar disimpan dalam hati serta jaringan adiposa. Karena disimpan dalam tubuh, vitamin larut lemak tidak perlu dikonsumsi setiap hari, tetapi juga memiliki risiko lebih tinggi untuk menyebabkan toksisitas jika dikonsumsi berlebihan.

Karakteristik Umum:

- **Absorpsi:** Bersama lipid, memerlukan garam empedu
- **Transport:** Dalam bentuk kompleks lipoprotein (chylomicron, VLDL, dll.)
- **Penyimpanan:** Terutama di hati dan jaringan lemak
- **Ekskresi:** Lambat, terutama melalui feses

6.2.1.1 Vitamin A

Vitamin A adalah vitamin larut lemak yang memainkan peran penting dalam berbagai proses fisiologis, terutama dalam sistem penglihatan, pertumbuhan sel, sistem kekebalan, serta menjaga kesehatan kulit dan jaringan epitel. Vitamin ini tersedia dalam dua bentuk utama, yaitu **retinoid** (bentuk aktif yang berasal dari sumber hewani) dan **karotenoid** (provitamin A yang berasal dari tumbuhan).

Struktur dan Bentuk

Retinoid meliputi retinol, retinal, dan asam retinoat, yang masing-masing memiliki fungsi berbeda dalam tubuh. β -karoten, jenis karotenoid yang paling dikenal, dapat dikonversi menjadi retinol, meskipun efisiensinya bervariasi tergantung pada kondisi tubuh dan asupan makanan.

Fungsi

Vitamin A penting untuk pembentukan pigmen visual **rhodopsin**, yang dibutuhkan untuk penglihatan dalam kondisi minim cahaya. Selain itu, asam retinoat berperan dalam regulasi gen yang mengontrol pertumbuhan dan diferensiasi sel. Vitamin ini juga memperkuat sistem imun dan diperlukan dalam proses reproduksi.

Metabolisme

Vitamin A diserap di usus bersama lemak, lalu diangkut melalui sistem limfatik ke hati dalam bentuk retinil ester. Di hati, vitamin ini disimpan dan dilepaskan sesuai kebutuhan, lalu diedarkan ke jaringan melalui ikatan dengan retinol-binding protein (RBP).

Sumber Makanan

Retinoid terutama ditemukan dalam makanan hewani seperti hati, telur, dan susu, sementara karotenoid banyak terdapat dalam sayuran dan buah berwarna oranye atau hijau tua, seperti wortel, bayam, dan ubi jalar.

Kekurangan Vitamin A

Kekurangan vitamin A masih menjadi masalah gizi di berbagai negara. Gejala awalnya adalah rabun senja, yang jika tidak ditangani bisa berkembang menjadi kerusakan mata serius (xerophthalmia) hingga kebutaan. Selain itu, kekurangan vitamin A dapat menurunkan daya tahan tubuh dan menghambat pertumbuhan anak.

Toksisitas

Karena dapat disimpan dalam tubuh, kelebihan vitamin A berisiko menyebabkan toksisitas. Gejalanya meliputi mual, gangguan hati, dan kelainan tulang. Pada ibu hamil, konsumsi dosis tinggi retinoid berpotensi menimbulkan cacat lahir.

Kebutuhan Harian

Asupan harian vitamin A dinyatakan dalam **Retinol Activity Equivalent (RAE)**. Rekomendasi umumnya:

- Laki-laki dewasa: 900 µg RAE
- Perempuan dewasa: 700 µg RAE
- Ibu hamil: 770 µg RAE
- Ibu menyusui: 1300 µg RAE

6.2.1.2 Vitamin D

Vitamin D adalah vitamin larut lemak yang memiliki peran krusial dalam mengatur keseimbangan kalsium dan fosfat dalam tubuh, yang mendukung kesehatan tulang dan gigi. Vitamin ini bisa diperoleh melalui paparan sinar matahari, serta dari sumber makanan tertentu dan suplemen.

Struktur dan Bentuk

Vitamin D terdiri dari dua bentuk utama: **D2 (ergokalsiferol)** yang ditemukan pada tumbuhan dan **D3 (kolekalsiferol)** yang disintesis di kulit manusia melalui paparan sinar UVB. Kedua bentuk ini diubah menjadi bentuk aktifnya, **kalsitriol**, di hati dan ginjal, yang kemudian mengatur penyerapan kalsium dan fosfat di usus.

Fungsi

Fungsi utama vitamin D adalah untuk meningkatkan penyerapan kalsium dan fosfat dari saluran pencernaan, yang penting untuk pembentukan dan pemeliharaan tulang dan gigi. Selain itu, vitamin D juga berperan dalam pengaturan sistem imun, serta fungsi otot dan sistem kardiovaskular.

Metabolisme

Vitamin D disintesis di kulit setelah terpapar sinar matahari, khususnya UVB, yang mengubah kolesterol menjadi bentuk prekursor vitamin D. Prekursor ini kemudian dikonversi menjadi D3 dan disimpan dalam hati. Vitamin D juga dapat diperoleh dari makanan atau suplemen, setelah diserap oleh usus, kemudian dikonversi di hati dan ginjal menjadi bentuk aktifnya, kalsitriol.

Sumber Makanan

Sumber alami vitamin D meliputi ikan berlemak seperti salmon, sarden, dan makarel, minyak hati ikan, serta produk susu yang diperkaya. Vitamin D juga dapat diperoleh

dari suplemen atau melalui paparan sinar matahari langsung.

Kekurangan Vitamin D

Kekurangan vitamin D dapat menyebabkan gangguan pembentukan tulang seperti **rakhitis** pada anak-anak dan **osteomalasia** pada orang dewasa, yang keduanya menyebabkan kelemahan dan kelainan tulang. Kekurangan vitamin D juga terkait dengan peningkatan risiko osteoporosis pada lansia, serta gangguan sistem kekebalan tubuh.

Toksisitas

Kelebihan vitamin D dapat menyebabkan **hiperkalsemia**, yaitu kadar kalsium darah yang terlalu tinggi, yang dapat menyebabkan kerusakan ginjal, gangguan jantung, dan pembentukan batu ginjal. Toksisitas ini biasanya terjadi karena konsumsi suplemen dalam dosis tinggi, bukan karena paparan sinar matahari.

Kebutuhan Harian

Rekomendasi kebutuhan harian vitamin D berdasarkan usia dan kondisi meliputi:

- Dewasa: 600–800 IU
- Lansia: 800–1000 IU
- Ibu hamil dan menyusui: 800–1000 IU

6.2.1.3 Vitamin K

Vitamin K adalah vitamin larut lemak yang memiliki peran penting dalam proses pembekuan darah dan kesehatan tulang. Terdapat dua bentuk utama vitamin K: **K1**

(filokuinon) yang ditemukan dalam makanan nabati, terutama sayuran berdaun hijau, dan **K2 (menakuinon)** yang ditemukan dalam produk hewani dan hasil fermentasi.

Struktur dan Bentuk

Vitamin K terdiri dari dua bentuk utama: **K1 (filokuinon)** dan **K2 (menakuinon)**. K1 umumnya terdapat dalam sayuran hijau dan berfungsi dalam proses pembekuan darah, sedangkan K2 ditemukan dalam produk hewani dan makanan yang difermentasi, serta berperan dalam pengaturan kesehatan tulang dengan membantu aktivasi protein pengikat kalsium.

Fungsi

Fungsi utama vitamin K adalah untuk mengaktifkan protein yang terlibat dalam **koagulasi darah**, yang mencegah perdarahan berlebih. Selain itu, vitamin K juga berperan dalam pembentukan dan pemeliharaan **tulang**. Vitamin K membantu mengaktifkan osteokalcin, sebuah protein penting dalam metabolisme tulang yang mengikat kalsium ke matriks tulang.

Metabolisme dan Penyimpanan

Setelah diserap melalui usus, vitamin K diangkut oleh lipoprotein ke hati, tempat terjadinya proses aktivasi protein koagulasi darah. Sebagian besar vitamin K disimpan dalam hati, dan sisanya tersebar di jaringan tubuh. Vitamin K memiliki mekanisme ekskresi yang lebih cepat dibandingkan dengan vitamin lain, sehingga tubuh membutuhkan pasokan yang kontinu dari makanan atau suplemen.

Sumber Makanan

Sumber utama vitamin K1 adalah sayuran hijau, seperti **bayam, kale, brokoli, dan selada**. Sumber vitamin K2 meliputi produk fermentasi seperti **tempe, natto, dan keju**, serta makanan hewani seperti **daging, telur, dan hati**.

Kekurangan Vitamin K

Kekurangan vitamin K dapat menyebabkan gangguan dalam pembekuan darah, yang berisiko menyebabkan perdarahan yang tidak terkendali, seperti **penurunan prothrombin** (waktu pembekuan darah yang lebih lama). Pada bayi baru lahir, kekurangan vitamin K dapat menyebabkan **penyakit perdarahan vitamin K**. Selain itu, kekurangan vitamin K juga terkait dengan peningkatan risiko osteoporosis karena pengaruhnya terhadap pengaturan kalsium dalam tulang.

Toksisitas

Vitamin K memiliki tingkat toksisitas yang rendah, karena tubuh cenderung mengeluarkan kelebihan vitamin K, terutama bentuk K1 yang terdapat dalam makanan. Namun, penggunaan suplemen vitamin K dalam dosis tinggi harus dihindari pada orang yang mengonsumsi obat pengencer darah seperti warfarin, karena dapat memengaruhi efektivitas obat tersebut.

Kebutuhan Harian

Kebutuhan harian vitamin K bervariasi tergantung usia dan jenis kelamin:

- Dewasa: 90–120 µg
- Ibu hamil dan menyusui: 90 µg

- Anak-anak: 30–75 µg (berdasarkan usia)

6.2.2 Vitamin Larut dalam Air

Vitamin larut air meliputi vitamin B kompleks dan vitamin C. Vitamin ini larut dalam air, diserap dengan mudah dari saluran cerna, tidak disimpan dalam jumlah besar dalam tubuh, dan kelebihanannya diekskresikan melalui urin. Karena tidak disimpan, konsumsi harian sangat penting.

Karakteristik Umum:

- **Absorpsi:** Cepat, di usus halus
- **Transport:** Terlarut dalam plasma
- **Penyimpanan:** Minimal, kecuali B12
- **Ekskresi:** Melalui urin → risiko toksisitas rendah

6.2.2.1 Vitamin B1 (Tiamin)

Vitamin B1, atau tiamin, adalah salah satu vitamin larut air yang penting untuk metabolisme energi dalam tubuh, khususnya dalam pengolahan karbohidrat. Tiamin berperan dalam konversi glukosa menjadi energi, serta dalam fungsi sistem saraf, otot, dan jantung.

Struktur dan Bentuk

Tiamin adalah senyawa yang terdiri dari dua bagian: **tiamin pirimidin** dan **tiamin thiazol**. Kedua bagian ini bergabung membentuk tiamin aktif yang digunakan tubuh dalam berbagai proses biokimia. Vitamin B1 mudah rusak oleh panas, cahaya, dan pengolahan makanan yang tidak tepat.

Fungsi

Fungsi utama tiamin adalah sebagai koenzim dalam metabolisme karbohidrat, terutama dalam reaksi yang mengubah glukosa menjadi energi yang dibutuhkan oleh tubuh. Tiamin juga terlibat dalam fungsi saraf, dengan membantu transmisi impuls saraf dan menjaga integritas sel saraf. Selain itu, tiamin berperan dalam fungsi otot dan mendukung kesehatan jantung.

Metabolisme dan Penyimpanan

Tiamin diserap di usus kecil dan dibawa ke dalam darah untuk disebarkan ke jaringan tubuh. Sebagian besar tiamin yang diserap akan diubah menjadi bentuk aktifnya, **tiamin pirofosfat**, yang digunakan dalam proses metabolik. Tiamin tidak disimpan dalam jumlah besar dalam tubuh, sehingga harus dipenuhi secara teratur dari makanan.

Sumber Makanan

Sumber utama tiamin meliputi **biji-bijian, sereal yang diperkaya, daging babi, dan kacang-kacangan**. Selain itu, tiamin juga dapat ditemukan dalam produk makanan lainnya seperti roti, pasta, dan nasi yang diperkaya.

Kekurangan Vitamin B1

Kekurangan tiamin dapat menyebabkan kondisi yang dikenal sebagai **beri-beri**, yang memiliki dua bentuk: **beri-beri kering**, yang memengaruhi sistem saraf dan otot, dan **beri-beri basah**, yang memengaruhi sistem kardiovaskular. Kekurangan tiamin yang lebih parah dapat menyebabkan *syndrome Wernicke-Korsakoff*, sebuah gangguan

neurologis yang sering ditemukan pada penderita alkoholisme kronis.

Toksisitas

Vitamin B1 umumnya tidak beracun meskipun dikonsumsi dalam jumlah yang lebih tinggi dari yang dibutuhkan tubuh, karena kelebihannya akan dikeluarkan melalui urin. Oleh karena itu, risiko toksisitas dari tiamin sangat rendah.

Kebutuhan Harian

Kebutuhan harian tiamin berdasarkan usia dan jenis kelamin adalah sebagai berikut:

- Dewasa: 1,1–1,2 mg
- Ibu hamil: 1,4 mg
- Ibu menyusui: 1,4 mg

6.2.2.2 Vitamin B2 (Riboflavin)

Vitamin B2, atau riboflavin, merupakan vitamin larut air yang berperan penting dalam proses metabolisme energi, terutama dalam oksidasi karbohidrat, lemak, dan protein. Riboflavin juga mendukung fungsi enzim-enzim dalam tubuh serta menjaga kesehatan kulit, mata, dan sistem saraf.

Struktur dan Bentuk

Riboflavin adalah senyawa berwarna kuning cerah yang terdiri dari inti isoalloxazine yang terikat pada ribitol. Dalam tubuh, riboflavin dikonversi menjadi dua bentuk koenzim aktif: **flavin mononukleotida (FMN)** dan **flavin adenin dinukleotida (FAD)**, yang berperan dalam berbagai reaksi redoks penting untuk produksi energi.

Fungsi

Fungsi utama vitamin B2 adalah sebagai bagian dari enzim flavoprotein yang terlibat dalam proses **respirasi seluler** dan **reaksi oksidasi-reduksi**. Vitamin ini juga berperan dalam metabolisme vitamin lain seperti vitamin B6 dan niasin, serta berkontribusi dalam produksi hormon dan pemeliharaan jaringan tubuh.

Metabolisme dan Penyimpanan

Riboflavin diserap di usus halus dan diedarkan melalui plasma dalam bentuk bebas maupun dalam bentuk ikatan dengan protein. Setelah masuk ke dalam sel, riboflavin diubah menjadi FMN dan FAD. Karena sifatnya yang larut air, riboflavin tidak disimpan dalam jumlah besar di tubuh dan kelebihan akan dikeluarkan melalui urin, yang kadang menimbulkan warna kuning cerah khas.

Sumber Makanan

Vitamin B2 dapat ditemukan dalam berbagai makanan seperti **produk susu (susu, yogurt, keju), telur, daging organ seperti hati, ikan, sayuran berdaun hijau, serta sereal dan roti yang diperkaya**. Riboflavin juga cukup tahan terhadap panas, tetapi dapat rusak oleh paparan cahaya.

Kekurangan Vitamin B2

Defisiensi riboflavin, meskipun jarang terjadi sendiri, sering muncul bersamaan dengan kekurangan vitamin B kompleks lainnya. Gejala awal meliputi **radang bibir (cheilitis), pecah-pecah di sudut mulut (angular stomatitis), lidah merah dan sakit (glossitis)**, serta **mata**

sensitif terhadap cahaya dan kulit bersisik. Kekurangan jangka panjang dapat memengaruhi metabolisme energi dan fungsi enzimatis tubuh.

Toksisitas

Riboflavin memiliki **tingkat toksisitas yang sangat rendah**, karena kelebihanannya dengan mudah dikeluarkan lewat urin. Tidak ada laporan efek toksik yang signifikan dari konsumsi tinggi riboflavin melalui makanan atau suplemen.

Kebutuhan Harian

Kebutuhan harian vitamin B2 bervariasi menurut usia dan kondisi:

- Dewasa: 1,1–1,3 mg
- Ibu hamil: 1,4 mg
- Ibu menyusui: 1,6 mg

6.2.2.3 Vitamin B3 (Niasin)

Vitamin B3, atau niasin, adalah vitamin larut air yang berperan penting dalam produksi energi sel dan metabolisme nutrisi. Niasin mencakup dua bentuk aktif, yaitu **asam nikotinat** dan **nikotinamida**, yang keduanya dapat diubah dalam tubuh menjadi koenzim penting: **NAD (nikotinamida adenin dinukleotida)** dan **NADP (nikotinamida adenin dinukleotida fosfat)**.

Struktur dan Bentuk

Secara kimia, niasin memiliki struktur cincin piridin dengan gugus karboksilat (untuk asam nikotinat) atau gugus amida (untuk nikotinamida). Kedua bentuk ini memiliki

aktivitas biologis dan berfungsi sebagai prekursor koenzim NAD/NADP dalam reaksi redoks seluler.

Fungsi

Niasin berfungsi sebagai **komponen penting koenzim NAD dan NADP**, yang terlibat dalam lebih dari 400 reaksi enzimatik, termasuk respirasi seluler, metabolisme glukosa, asam lemak, dan asam amino. Selain itu, niasin juga berperan dalam sintesis DNA, perbaikan kerusakan sel, dan pengaturan ekspresi gen.

Metabolisme dan Penyimpanan

Vitamin B3 dapat diperoleh langsung dari makanan atau disintesis dalam tubuh dari asam amino **triptofan**, meski proses ini tidak efisien. Setelah diserap di usus, niasin diedarkan dalam darah dan diubah menjadi NAD/NADP di berbagai jaringan. Karena bersifat larut air, niasin tidak disimpan dalam jumlah besar dan kelebihanannya diekskresikan melalui urin.

Sumber Makanan

Sumber niasin meliputi **daging tanpa lemak (ayam, sapi, ikan), hati, kacang-kacangan, biji-bijian utuh, dan sereal yang diperkaya**. Triptofan yang dapat diubah menjadi niasin juga terdapat dalam produk hewani seperti telur dan susu.

Kekurangan Vitamin B3

Kekurangan niasin dapat menyebabkan penyakit klasik bernama **pelagra**, yang ditandai dengan **tiga D: dermatitis, diare, dan demensia**—dan pada kasus lanjut, dapat berujung pada **kematian**. Pelagra terutama terjadi di

populasi yang mengandalkan jagung sebagai sumber utama karbohidrat tanpa proses alkalisasi yang tepat.

Toksisitas

Niasin dalam bentuk suplemen (terutama asam nikotinat) dapat menyebabkan efek samping jika dikonsumsi dalam dosis tinggi, seperti **flushing** (kemerahan dan rasa panas pada kulit), **gangguan pencernaan**, **kerusakan hati**, dan **gangguan metabolisme glukosa**. Namun, bentuk nikotinamida umumnya lebih aman meski dalam dosis tinggi.

Kebutuhan Harian

Kebutuhan niasin sering dinyatakan dalam satuan **NE (Niacin Equivalent)**, karena mempertimbangkan kontribusi triptofan:

- Dewasa: 14–16 mg NE
- Ibu hamil: 18 mg NE
- Ibu menyusui: 17 mg NE

6.2.2.4 Vitamin B5 (Asam Pantotenat)

Vitamin B5, dikenal juga sebagai **asam pantotenat**, adalah vitamin larut air yang berperan sentral dalam metabolisme sel, khususnya sebagai bagian dari **koenzim A (CoA)**. Koenzim A merupakan molekul kunci dalam berbagai jalur metabolik, termasuk sintesis dan pemecahan karbohidrat, lemak, dan protein.

Struktur dan Bentuk

Asam pantotenat terdiri dari dua komponen: asam pantoat dan β -alanin, yang terikat secara kovalen. Di dalam

tubuh, vitamin ini digunakan untuk membentuk koenzim A dan senyawa lain seperti fosfopantetein, yang penting untuk aktivitas beberapa enzim dalam sintesis asam lemak.

Fungsi

Fungsi utama vitamin B5 adalah sebagai prekursor **koenzim A**, yang berperan dalam siklus asam sitrat (siklus Krebs), biosintesis asam lemak, kolesterol, hormon steroid, dan neurotransmitter. Vitamin ini juga mendukung metabolisme energi serta regenerasi dan perbaikan sel.

Metabolisme dan Penyimpanan

Asam pantotenat diserap di usus halus dalam bentuk bebas dan diedarkan dalam darah ke seluruh tubuh. Setelah digunakan untuk membentuk CoA, kelebihan akan diekskresikan melalui urin. Karena larut air dan tidak disimpan dalam jumlah besar, asupan harian yang cukup sangat diperlukan.

Sumber Makanan

Nama "pantotenat" berasal dari bahasa Yunani "*pantothén*", yang berarti "dari mana saja," mencerminkan bahwa vitamin ini memang tersebar luas di berbagai makanan. Sumber utama meliputi **daging organ (hati, ginjal), daging ayam, ikan, telur, produk susu, biji-bijian utuh, alpukat, dan sayuran seperti brokoli dan jamur.**

Kekurangan Vitamin B5

Kekurangan vitamin B5 sangat jarang terjadi karena penyebarannya yang luas dalam makanan. Jika terjadi, biasanya disertai kekurangan vitamin B lainnya. Gejala yang mungkin muncul meliputi **kelelahan, sakit kepala, gangguan tidur, iritasi saluran pencernaan,** dan dalam

kasus berat dapat terjadi **sensasi terbakar di kaki** (burning feet syndrome).

Toksisitas

Asam pantotenat memiliki **tingkat toksisitas yang sangat rendah**. Konsumsi dalam jumlah tinggi umumnya tidak menimbulkan efek samping yang serius, karena kelebihanannya mudah dikeluarkan melalui urin. Dosis sangat tinggi kadang menyebabkan diare ringan atau keluhan gastrointestinal.

Kebutuhan Harian

Rekomendasi asupan harian asam pantotenat bersifat estimasi (AI/Adequate Intake), karena data kekurangan pada manusia sangat terbatas:

- Dewasa: 5 mg
- Ibu hamil: 6 mg
- Ibu menyusui: 7 mg

6.2.2.5 Vitamin B6 (Piridoksin dan Bentuk Turunannya)

Vitamin B6 adalah kelompok vitamin larut air yang terdiri dari tiga bentuk utama: piridoksin, piridoksal, dan piridoksamin, yang semuanya memiliki aktivitas biologis setelah dikonversi menjadi bentuk aktifnya, yaitu piridoksal 5'-fosfat (PLP). Vitamin ini sangat penting dalam metabolisme asam amino, neurotransmitter, dan sintesis hemoglobin.

Struktur dan Bentuk

Ketiga bentuk vitamin B6 memiliki struktur kimia yang serupa dengan cincin piridin sebagai inti dasarnya. Dalam tubuh, semuanya dapat diubah menjadi **PLP**, yang

merupakan koenzim utama dalam lebih dari 100 reaksi enzimatik, terutama yang berkaitan dengan metabolisme asam amino.

Fungsi

Fungsi utama vitamin B6 adalah sebagai **koenzim PLP**, yang terlibat dalam:

- Dekarboksilasi dan transaminasi asam amino
- Sintesis neurotransmitter seperti serotonin, dopamin, GABA, dan norepinefrin
- Metabolisme homosistein menjadi sistein (berperan dalam kesehatan kardiovaskular)
- Pembentukan hemoglobin
- Fungsi sistem imun dan pemeliharaan glukosa darah

Metabolisme dan Penyimpanan

Vitamin B6 diserap di usus halus dalam bentuk bebas dan kemudian dimetabolisme di hati menjadi PLP. Tidak seperti vitamin B lainnya, sebagian kecil PLP dapat disimpan dalam otot, meskipun tubuh tetap memerlukan asupan harian yang teratur karena sifat larut airnya.

Sumber Makanan

Vitamin B6 tersedia secara luas dalam makanan. Sumber utamanya meliputi:

- **Daging (ayam, sapi, ikan)**
- **Hati dan ginjal**
- **Kentang**
- **Pisang**
- **Sereal yang diperkaya**
- **Kacang-kacangan dan biji-bijian**

Ketersediaan hayati vitamin B6 dari makanan hewani lebih tinggi dibanding dari tumbuhan.

Kekurangan Vitamin B6

Defisiensi vitamin B6 bisa terjadi pada orang dengan konsumsi alkohol berlebihan, penggunaan obat tertentu (seperti isoniazid atau kontrasepsi oral), serta pada kondisi kekurangan gizi. Gejalanya antara lain:

- **Iritabilitas dan depresi**
- **Glositis (radang lidah) dan stomatitis**
- **Neuropati perifer (kesemutan dan mati rasa)**
- **Anemia mikrositik**

Pada bayi, kekurangan B6 dapat menyebabkan kejang karena gangguan produksi neurotransmitter.

Toksisitas

Meskipun vitamin B6 larut air, konsumsi suplemen dalam dosis tinggi (lebih dari 100 mg/hari dalam jangka panjang) dapat menyebabkan **kerusakan saraf perifer** (neuropati sensorik), dengan gejala seperti mati rasa, kesemutan, dan kelemahan otot.

Kebutuhan Harian

Kebutuhan harian vitamin B6 tergantung pada asupan protein, karena perannya dalam metabolisme asam amino:

- Dewasa: 1,3–1,7 mg
- Ibu hamil: 1,9 mg
- Ibu menyusui: 2,0 mg

6.2.2.6 Vitamin B7 (Biotin)

Vitamin B7, juga dikenal sebagai **biotin**, adalah vitamin larut air yang berperan sebagai koenzim dalam berbagai

reaksi karboksilasi penting dalam tubuh. Biotin membantu dalam metabolisme lemak, karbohidrat, dan protein serta penting untuk menjaga kesehatan kulit, rambut, sistem saraf, dan fungsi genetik.

Struktur dan Bentuk

Biotin memiliki struktur yang khas berupa cincin imidazolidon dan tiopenan dengan rantai asam valerat. Dalam tubuh, biotin digunakan sebagai bagian dari **enzim karboksilase**, yang membantu menambahkan gugus karboksil ke berbagai substrat metabolik.

Fungsi

Biotin berfungsi sebagai **koenzim untuk lima enzim utama** yang terlibat dalam:

- **Gluconeogenesis** (pembentukan glukosa dari prekursor non-karbohidrat)
- **Sintesis asam lemak**
- **Katabolisme asam amino rantai cabang (leusin, isoleusin, valin)**
- **Regulasi ekspresi gen**

Biotin juga berperan dalam **proses epigenetik**, termasuk modifikasi histon dan regulasi transkripsi DNA.

Metabolisme dan Penyimpanan

Biotin diserap di usus halus dan sebagian diproduksi oleh mikroflora usus. Dalam sirkulasi, biotin ditransportasikan dalam bentuk bebas atau terikat protein. Karena bersifat larut air, biotin tidak disimpan dalam jumlah besar dan kelebihananya dikeluarkan melalui urin.

Sumber Makanan

Biotin dapat ditemukan dalam banyak jenis makanan, meskipun dalam jumlah kecil. Sumber makanan meliputi:

- **Telur (kuning telur, tapi putih telur mentah mengandung avidin yang menghambat absorpsi biotin)**
- **Hati dan ginjal**
- **Kacang-kacangan (almond, kacang tanah)**
- **Kedelai**
- **Biji-bijian utuh**
- **Pisang dan kembang kol**

Selain dari makanan, sebagian kebutuhan biotin juga dapat dipenuhi dari produksi bakteri usus.

Kekurangan Vitamin B7

Defisiensi biotin jarang terjadi pada individu sehat, tetapi dapat muncul akibat:

- **Konsumsi putih telur mentah dalam jangka panjang** (karena avidin)
- **Gangguan metabolisme bawaan (biotinidase deficiency)**
- **Penggunaan antibiotik jangka panjang**
Gejala defisiensi meliputi **rambut rontok, ruam kulit kering di sekitar mata dan mulut, kelelahan, halusinasi, depresi, dan gangguan neurologis.**

Toksisitas

Tidak ditemukan toksisitas biotin dari makanan atau suplemen dosis tinggi pada manusia. Biotin umumnya aman karena kelebihanannya akan dibuang melalui urin. Namun,

dosis tinggi dapat mengganggu hasil beberapa tes laboratorium, seperti hormon tiroid dan troponin.

Kebutuhan Harian

Rekomendasi asupan biotin diberikan dalam bentuk estimasi kecukupan (AI):

- Dewasa: 30 µg
- Ibu hamil: 30 µg
- Ibu menyusui: 35 µg

6.2.2.7 Vitamin B9 (Asam Folat)

Vitamin B9, dikenal luas sebagai **asam folat** dalam bentuk sintetiknyanya dan **folat** dalam bentuk alaminya, adalah vitamin larut air yang sangat penting dalam proses pembelahan sel, pembentukan DNA dan RNA, serta metabolisme asam amino tertentu. Perannya sangat krusial terutama selama masa kehamilan dan pertumbuhan.

Struktur dan Bentuk

Folat terdiri dari tiga komponen utama: **pteridin**, **asam para-aminobenzoat (PABA)**, dan satu atau lebih gugus **asam glutamat**. Bentuk aktif biologisnya dalam tubuh adalah **tetrahidrofolat (THF)** dan turunannya, yang berfungsi sebagai donor gugus satu karbon dalam berbagai reaksi metabolisme.

Asam folat adalah bentuk sintetis yang lebih stabil dan digunakan dalam suplemen serta fortifikasi makanan. Di dalam tubuh, asam folat harus direduksi menjadi THF sebelum dapat berfungsi.

Fungsi

Fungsi utama folat dalam tubuh antara lain:

- **Sintesis dan perbaikan DNA/RNA**
- **Metabolisme asam amino**, terutama konversi homosistein menjadi metionin (bersama vitamin B12)
- **Produksi sel darah merah**
- **Pertumbuhan jaringan**, terutama selama kehamilan dan masa remaja
- **Pencegahan cacat tabung saraf pada janin**

Metabolisme dan Penyimpanan

Folat diserap di usus halus (jejunum) dan kemudian dikonversi dalam hati menjadi bentuk aktifnya. Karena sifatnya yang larut air, kelebihan folat diekskresikan melalui urin, meski hati dapat menyimpan sejumlah kecil untuk kebutuhan jangka pendek.

Sumber Makanan

Folat secara alami banyak ditemukan dalam makanan seperti:

- **Sayuran berdaun hijau (bayam, brokoli, asparagus)**
- **Hati dan ginjal**
- **Kacang-kacangan dan lentil**
- **Buah-buahan (jeruk, alpukat)**
- **Sereal yang difortifikasi**

Namun, folat dalam makanan cenderung sensitif terhadap panas dan dapat rusak selama proses memasak.

Kekurangan Vitamin B9

Kekurangan folat dapat menyebabkan:

- **Anemia megaloblastik** (sel darah merah besar dan tidak matang)
- **Kelelahan, lemah, dan iritabilitas**
- **Gangguan pada sistem pencernaan**
- **Cacat tabung saraf pada janin** seperti spina bifida, bila kekurangan terjadi saat awal kehamilan

Faktor risiko defisiensi termasuk kehamilan, konsumsi alkohol, malabsorpsi, dan pemakaian obat tertentu (misalnya metotreksat, trimetoprim).

Toksisitas

Asam folat dalam dosis tinggi umumnya aman, namun dapat **menutupi gejala defisiensi vitamin B12**, yang jika tidak ditangani bisa menyebabkan kerusakan saraf permanen. Oleh karena itu, suplemen folat dalam dosis tinggi perlu disertai pemantauan kadar B12.

Kebutuhan Harian

- Dewasa: 400 µg DFE (Dietary Folate Equivalent)
- Ibu hamil: 600 µg DFE
- Ibu menyusui: 500 µg DFE

Catatan: 1 µg DFE = 1 µg folat makanan = 0,6 µg asam folat dari suplemen (dengan makanan) = 0,5 µg asam folat dari suplemen (tanpa makanan).

6.2.2.8 Vitamin B12 (Kobalamin)

Vitamin B12, atau **kobalamin**, adalah satu-satunya vitamin yang mengandung unsur **kobalt** dalam strukturnya dan merupakan salah satu vitamin B kompleks yang paling

kompleks secara kimiawi. Vitamin ini berperan penting dalam **pembentukan sel darah merah, fungsi neurologis, dan sintesis DNA**, serta sangat bergantung pada interaksi dengan faktor intrinsik untuk penyerapannya.

Struktur dan Bentuk

Kobalamin memiliki struktur yang khas berupa cincin korin dengan atom kobalt di pusatnya. Beberapa bentuk aktif vitamin B12 yang berfungsi di dalam tubuh antara lain:

- **Metilkobalamin**, yang terlibat dalam reaksi metilasi homosistein menjadi metionin
- **Adenosilkobalamin**, yang berperan dalam konversi asam metilmalonat menjadi suksinil-KoA dalam metabolisme lemak dan protei

Fungsi

Vitamin B12 memiliki fungsi vital sebagai koenzim dalam dua jalur utama:

- **Metilasi homosistein menjadi metionin**, yang penting untuk sintesis DNA dan metilasi RNA serta protein (berinteraksi dengan folat)
- **Konversi metilmalonil-KoA menjadi suksinil-KoA**, yang dibutuhkan dalam metabolisme asam lemak dan asam amino rantai ganjil

Vitamin ini juga penting untuk pemeliharaan **selubung mielin** pada sistem saraf pusat dan perifer.

Metabolisme dan Penyimpanan

Vitamin B12 memiliki mekanisme absorpsi yang unik. Di lambung, ia dilepaskan dari makanan oleh asam lambung dan enzim pepsin, lalu berikatan dengan **faktor intrinsik** yang diproduksi oleh sel parietal. Kompleks ini kemudian

diserap secara aktif di ***ileum terminal***. Setelah diserap, vitamin B12 diangkut dalam darah oleh protein **transkobalamin** dan disimpan terutama di **hati**, dengan cadangan tubuh yang cukup untuk beberapa tahun.

Sumber Makanan

Vitamin B12 hanya ditemukan secara alami dalam produk hewani, antara lain:

- **Daging merah**
- **Hati dan ginjal**
- **Ikan dan kerang (misalnya sarden, salmon, tiram)**
- **Telur dan produk susu**

Makanan nabati tidak mengandung B12 aktif, sehingga **vegetarian dan vegan** sangat berisiko mengalami defisiensi jika tidak mengonsumsi makanan yang difortifikasi atau suplemen.

Kekurangan Vitamin B12

Defisiensi vitamin B12 dapat menyebabkan:

- Anemia megaloblastik
- Neuropati perifer dan gangguan neurologis (mati rasa, kesemutan, gangguan keseimbangan)
- Gangguan kognitif dan demensia
- Glositis dan sariawan

Kekurangan ini dapat muncul akibat:

- Malabsorpsi (misalnya pada gastritis atrofi, penyakit Crohn, atau setelah gastrektomi)
- Kurangnya faktor intrinsik (anemia pernisiiosa)
- Diet vegan tanpa suplemen

Toksisitas

Vitamin B12 memiliki **toksisitas yang sangat rendah**, dan kelebihan asupan umumnya tidak menimbulkan efek samping karena tubuh hanya menyerap jumlah yang dibutuhkan dan sisanya dieliminasi.

Kebutuhan Harian

- Dewasa: 2,4 µg
- Ibu hamil: 2,6 µg
- Ibu menyusui: 2,8 µg

6.2.2.9 Vitamin C (Asam Askorbat)

Vitamin C, atau **asam askorbat**, adalah vitamin larut air yang dikenal luas sebagai antioksidan kuat dan kofaktor penting dalam berbagai reaksi enzimatik. Vitamin ini memiliki peran esensial dalam **pembentukan kolagen**, **penyerapan zat besi non-heme**, **peningkatan imunitas**, dan **perlindungan terhadap stres oksidatif**.

Struktur dan Sifat Kimia

Vitamin C memiliki struktur berupa senyawa enam karbon dengan gugus hidroksil yang menjadikannya sangat larut air. Bentuk aktif utamanya adalah **asam askorbat**, yang dalam kondisi tertentu dapat teroksidasi menjadi **asam dehidroaskorbat** dan dapat direduksi kembali ke bentuk aktifnya di dalam tubuh.

Fungsi

Vitamin C memiliki berbagai fungsi biologis penting:

- **Sintesis kolagen**, dengan bertindak sebagai kofaktor bagi enzim hidroksilase pada prolin dan lisin

- **Peningkatan penyerapan zat besi non-heme** di saluran cerna dengan mereduksi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+}
- **Antioksidan**, melindungi sel dari kerusakan akibat radikal bebas
- **Sintesis neurotransmitter** seperti norepinefrin
- **Regenerasi antioksidan lain**, seperti vitamin E
- **Dukungan terhadap sistem imun**, termasuk peningkatan fungsi sel fagosit dan produksi antibodi

Metabolisme dan Ekskresi

Vitamin C diserap secara aktif di usus halus dan didistribusikan ke berbagai jaringan. Karena tidak disintesis oleh tubuh manusia dan tidak disimpan dalam jumlah besar, kelebihan asupan diekskresikan dengan cepat melalui urin. Konsentrasi vitamin C dalam darah diatur ketat, dan kelebihan asupan akan menyebabkan peningkatan ekskresi ginjal.

Sumber Makanan

Vitamin C ditemukan melimpah pada buah dan sayuran segar, antara lain:

- **Jeruk, lemon, kiwi, dan stroberi**
- **Pepaya dan mangga**
- **Tomat dan paprika**
- **Sayuran berdaun hijau, brokoli, dan kubis**

Kandungan vitamin C bisa menurun akibat penyimpanan lama dan proses pemanasan selama memasak.

Kekurangan Vitamin C

Defisiensi vitamin C menyebabkan penyakit **skorbut**, yang ditandai oleh:

- **Kelemahan umum dan kelelahan**
- **Gusi berdarah dan pembengkakan**
- **Kulit kering dan mudah memar**
- **Penyembuhan luka yang lambat**
- **Nyeri sendi dan anemia**

Skorbut dapat muncul setelah beberapa minggu hingga bulan asupan vitamin C yang tidak memadai, terutama pada populasi rentan seperti lansia, pecandu alkohol, atau individu dengan diet terbatas.

Toksisitas

Vitamin C umumnya aman bahkan dalam dosis tinggi, namun konsumsi lebih dari 2.000 mg/hari dapat menyebabkan:

- **Diare dan gangguan pencernaan**
- **Risiko batu ginjal oksalat** pada individu rentan
- **Interferensi pada hasil pemeriksaan laboratorium tertentu**

Kebutuhan Harian

- Pria dewasa: 90 mg
- Wanita dewasa: 75 mg
- Ibu hamil: 85 mg
- Ibu menyusui: 120 mg

Perokok disarankan untuk menambah asupan harian sebesar **+35 mg** karena meningkatnya stres oksidatif.

6.3 Penutup

Vitamin merupakan zat gizi mikro yang sangat dibutuhkan tubuh untuk menunjang berbagai fungsi fisiologis, meskipun hanya dalam jumlah kecil. Peranannya

sangat vital dalam menjaga keseimbangan metabolik, pertumbuhan, dan perlindungan terhadap berbagai gangguan kesehatan. Kekurangan salah satu vitamin dapat memicu berbagai kondisi patologis, mulai dari gejala ringan hingga gangguan yang serius. Sebaliknya, konsumsi berlebih, terutama untuk vitamin yang bersifat larut lemak, juga dapat menimbulkan efek toksik yang merugikan.

Pengelompokan vitamin berdasarkan kelarutannya menjadi dua kategori utama—larut dalam lemak dan larut dalam air—berimplikasi pada cara penyimpanan dalam tubuh, metabolisme, serta risiko defisiensi dan keracunan. Vitamin yang larut air umumnya tidak disimpan dalam jumlah besar sehingga perlu asupan rutin, sementara vitamin larut lemak cenderung disimpan dalam jaringan tubuh dan penggunaannya harus lebih diawasi.

Penguasaan pengetahuan yang mendalam mengenai struktur, sumber pangan, peran biokimia, kebutuhan harian, serta kondisi akibat kelebihan dan kekurangan setiap vitamin sangat penting, baik dalam praktik klinik, pengajaran, maupun edukasi masyarakat. Hal ini menjadi bagian penting dalam strategi promosi gizi dan pencegahan penyakit berbasis nutrisi.

Di era modern, tantangan baru muncul dengan pola makan yang tinggi kalori namun miskin mikronutrien, kecenderungan konsumsi makanan ultra-proses, dan penggunaan suplemen secara sembarangan. Oleh karena itu, edukasi gizi yang akurat dan berdasarkan ilmu pengetahuan menjadi sangat penting untuk membangun kebiasaan makan yang sehat dan berkelanjutan.

Pemahaman menyeluruh mengenai peran vitamin akan membantu setiap individu dalam membuat keputusan

gizi yang tepat demi menunjang kualitas hidup dan kesehatan jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Foley, D. (2021). Vitamin A and its role in health and disease. *Journal of Clinical Nutrition*, 45(3), 237-249. <https://doi.org/10.1056/nejmra2020518>.
- Kashyap, S., & Gupta, M. (2020). The metabolic roles of vitamin D and its deficiency in health. *Endocrine Reviews*, 41(5), 745-763. <https://doi.org/10.1210/er.2020-00234>.
- Meydani, M. (2019). The role of vitamin E in immune function and chronic disease. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 110(4), 794-802. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqz234>.
- Groff, J. L., & Gropper, S. S. (2017). *Advanced Nutrition and Human Metabolism* (6th ed.). Wadsworth Cengage Learning.
- Smith, A. D., & Refsum, H. (2018). Vitamin B12 and folate in the prevention of neurodegenerative diseases. *Neurology Research International*, 2018, Article ID 5786194. <https://doi.org/10.1155/2018/5786194>.
- Matsumoto, M., & Saito, H. (2020). Biochemical functions and clinical implications of vitamin B6. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 78, 108422. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2020.108422>.
- Luo, S., & Chen, M. (2019). Vitamin C: A crucial antioxidant for health and disease. *Antioxidants*, 8(6), 1-10. <https://doi.org/10.3390/antiox8060183>.

- Institute of Medicine (US) Food and Nutrition Board. (2000). *Dietary reference intakes for vitamin C, vitamin E, selenium, and carotenoids*. National Academies Press.
- Semba, R. D., & Bloem, M. W. (2017). *The Impact of Micronutrients on Health and Disease*. Springer International Publishing.
- World Health Organization. (2021). Vitamin and mineral requirements in human nutrition (2nd ed.). World Health Organization.

BAB 7

MINERAL

Oleh Amalyah Febryanti

7.1 Pendahuluan

Mineral merupakan unsur anorganik yang diperlukan dalam jumlah kecil hingga sedang oleh tubuh hewan untuk menunjang fungsi fisiologis dan metabolisme yang optimal. Dalam konteks biokimia veteriner, mineral memainkan peran penting sebagai kofaktor enzim, regulator keseimbangan elektrolit, komponen struktural jaringan tubuh, serta agen antioksidan yang melindungi sel dari kerusakan oksidatif. Keberadaan mineral yang cukup dan seimbang dalam ransum hewan sangat berpengaruh terhadap produktivitas, pertumbuhan, kesehatan reproduksi, dan daya tahan terhadap penyakit (Armayanti et al. 2024; Suprayitno et al. 2020).

Kebutuhan mineral bervariasi tergantung pada spesies hewan, umur, status fisiologis (misalnya laktasi, pertumbuhan, kebuntingan), serta faktor lingkungan. Dalam praktik peternakan modern, ketidakseimbangan mineral menjadi salah satu tantangan utama yang dapat menyebabkan gangguan metabolik, penyakit klinis, dan penurunan kualitas produk hewan, seperti susu, daging, dan telur (Suprayitno et al. 2020; Gunawan et al. 2016; Nurcahyo et al. 2017; Kurnia et al. 2012).

Selain itu, mineral juga terlibat dalam sistem pensinyalan intraseluler, ekspresi gen, dan regulasi enzimatis yang kompleks. Misalnya, kalsium (Ca^{2+}) bertindak sebagai second messenger dalam berbagai jalur pensinyalan, sementara seng (Zn^{2+}) penting untuk transkripsi gen dan stabilitas protein. Ketidakseimbangan asupan mineral dapat menyebabkan kondisi patologis seperti rakhitis, anemia, gangguan neurologis, dan penurunan fertilitas (Widhyari, Esfandiari, Wijaya, et al. 2015a; Rahayu & Maulida 2022; Dwipartha et al. 2014; Rahardjo 2023).

Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang jenis-jenis mineral, peran biokimianya, mekanisme metabolisme, serta dampak klinis dari defisiensi atau toksisitasnya sangat penting bagi dokter hewan dan praktisi nutrisi hewan. Bab ini akan mengulas secara komprehensif fungsi mineral dalam tubuh hewan, dengan fokus pada aspek biokimia dan aplikasinya dalam dunia veteriner.

7.2 Klasifikasi Mineral

Mineral diklasifikasikan berdasarkan jumlah yang dibutuhkan oleh tubuh hewan dalam dua kelompok utama, yaitu makromineral dan mikromineral (trace minerals). Pembagian ini penting dalam perancangan ransum serta penanganan gangguan nutrisi secara klinis (Sugiharto 2021; Hamdi Mayulu 2023a).

Makromineral

Makromineral adalah mineral yang dibutuhkan dalam jumlah relatif besar (biasanya >100 mg/kg berat badan per hari) dan memiliki fungsi struktural serta metabolik yang

signifikan (Sugiharto 2021; Hamdi Mayulu 2023a; Hidayati et al. 2025). Makromineral utama meliputi:

1. Kalsium (Ca): Komponen utama tulang dan gigi, terlibat dalam kontraksi otot, transmisi impuls saraf, pembekuan darah, dan aktivitas enzimatis.
2. Fosfor (P): Berperan dalam metabolisme energi (ATP), pembentukan tulang, dan fungsi membran sel.
3. Magnesium (Mg): Kofaktor lebih dari 300 enzim, termasuk yang terlibat dalam sintesis protein dan DNA, serta menjaga kestabilan fungsi neuromuskular.
4. Kalium (K): Elektrolit utama intraseluler yang mengatur tekanan osmotik, keseimbangan asam-basa, dan fungsi otot.
5. Natrium (Na): Elektrolit ekstraseluler utama yang penting dalam keseimbangan cairan, transmisi saraf, dan penyerapan nutrisi di usus.
6. Klorida (Cl): Berperan dalam pembentukan asam lambung (HCl) dan menjaga keseimbangan elektrolit.
7. Sulfur (S): Komponen asam amino sulfur (metionin, sistein), vitamin (biotin, tiamin), serta senyawa penting lain seperti glutathione.

Mikromineral (Trace Minerals)

Mikromineral dibutuhkan dalam jumlah yang sangat kecil (<100 mg/kg), namun perannya sangat penting untuk aktivitas enzimatis, fungsi imun, dan reproduksi (Nurmin et al. 2018; Yanuartono et al. 2016). Mikromineral utama mencakup:

1. Zink (Zn): Penting untuk sintesis protein dan asam nukleat, penyembuhan luka, dan fungsi imun (Widhyari 2012).

2. Tembaga (Cu): Terlibat dalam pembentukan pigmen, hemoglobin, dan aktivitas enzim antioksidan.
3. Mangan (Mn): Berperan dalam metabolisme tulang dan karbohidrat serta aktivitas enzim.
4. Selenium (Se): Kofaktor untuk glutathione peroxidase, penting untuk pertahanan antioksidan dan fungsi reproduksi.
5. Besi (Fe): Komponen utama hemoglobin dan mioglobin, terlibat dalam transportasi oksigen dan respirasi seluler.
6. Iodium (I): Diperlukan untuk sintesis hormon tiroid, yang mengatur metabolisme basal.
7. Kobalt (Co): Komponen dari vitamin B12 (kobalamin), penting untuk metabolisme energi dan fungsi hematopoietik.

Keseimbangan antara makro dan mikromineral harus dijaga, karena adanya interaksi antagonistik maupun sinergistik antar mineral yang dapat mempengaruhi absorpsi dan bioaktivitasnya. Misalnya, kelebihan molibdenum (Mo) dapat menghambat absorpsi tembaga (Cu), sedangkan vitamin E dapat meningkatkan efektivitas selenium (Se) (Putra 2024; Sulaiman et al. 2022; Setyawati & Hartini 2018; Runtuboi & Sujarta 2023; Wahidah & Achmad 2020).

7.3 Peran Biokimia Mineral

Mineral memainkan berbagai peran penting dalam sistem biokimia hewan, baik sebagai kofaktor reaksi enzimatik maupun sebagai komponen struktural jaringan tubuh. Pemahaman mengenai peran-peran ini menjadi krusial dalam konteks pencegahan penyakit, peningkatan

performa ternak, dan pengembangan terapi nutrisi dalam kedokteran hewan (Mose et al. 2025; Ningtias et al. 2022; Hamdi Mayulu 2023a; Sugiharto 2021).

7.3.1 Kofaktor Enzim

Banyak enzim tidak dapat menjalankan fungsinya tanpa kehadiran mineral sebagai kofaktor. Mineral dapat membantu menstabilkan struktur enzim, memfasilitasi transfer elektron, atau bertindak sebagai aktivator enzim (Susanti & Fibriana 2018; Madigan et al. 2019; Talaro, Kathleen P. dan Talaro 2002; Garrett & Grisham 2017; Nelson & Cox 2017; Atmaja et al. 2022; Siregar & Desi Ardilla 2024). Contoh penting meliputi:

1. Zink (Zn): Kofaktor untuk enzim DNA dan RNA polimerase, karbonik anhidrase, dan superoksida dismutase.
2. Tembaga (Cu): Penting dalam enzim sitokrom c oksidase dan lisil oksidase.
3. Selenium (Se): Kofaktor enzim glutathione peroksidase yang melindungi sel dari stres oksidatif.
4. Mangan (Mn): Diperlukan dalam fungsi enzim mitokondria seperti arginase dan piruvat karboksilase.

7.3.2 Komponen Struktural Tulang dan Gigi

Kalsium dan fosfor merupakan dua mineral utama yang membentuk struktur tulang dan gigi melalui pembentukan kristal hidroksiapatit. Keseimbangan antara Ca dan P sangat penting, karena rasio yang tidak tepat dapat menyebabkan gangguan mineralisasi tulang, seperti rakhitis pada hewan muda dan osteomalasia pada hewan dewasa

(Armayanti et al. 2024; Rahayu & Maulida 2022; Hamdi Mayulu 2023a; Sugiharto 2021; Hidayati et al. 2025; Sulaiman et al. 2022).

7.3.3 Fungsi Saraf dan Otot

Mineral seperti natrium (Na^+), kalium (K^+), kalsium (Ca^{2+}), dan magnesium (Mg^{2+}) berperan besar dalam transmisi impuls saraf dan kontraksi otot (Siregar & Desi Ardilla 2024; Sumbono 2021):

1. Na^+ dan K^+ : Mengatur potensial aksi pada membran sel saraf dan otot.
2. Ca^{2+} : Penting dalam pelepasan neurotransmitter serta kontraksi otot polos dan rangka.
3. Mg^{2+} : Menstabilkan membran dan bertindak sebagai penghambat fisiologis Ca^{2+} yang berlebihan.

7.3.4 Regulasi Osmotik dan pH Tubuh

Elektrolit seperti Na^+ , K^+ , dan Cl^- memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan cairan antar kompartemen tubuh dan regulasi asam-basa. Mekanisme seperti pompa natrium-kalium (Na^+/K^+ ATPase) memastikan homeostasis volume sel dan konsentrasi ion (Sumbono 2021; Ardiansyah et al. 2020).

7.3.5 Antioksidan dan Perlindungan Sel

Mineral seperti selenium dan zink terlibat dalam sistem antioksidan tubuh (Ernawati 2013; Sumbono 2021):

1. Selenium: Bagian dari enzim glutathione peroxidase yang mengubah peroksida menjadi air, sehingga mencegah kerusakan oksidatif pada lipid membran.

2. Zink: Menstabilkan membran sel dan menghambat produksi radikal bebas melalui aktivasi superoksida dismutase (SOD).

7.3.6 Peran dalam Reproduksi dan Sistem Imun

Mineral juga berperan penting dalam fungsi reproduksi dan sistem imun (Sumbono 2021; Ningtias et al. 2022; Widhyari et al. 2015b; Dewantari 2013):

1. Zn dan Se: Meningkatkan kualitas sperma dan fertilitas.
2. Cu dan Mn: Berperan dalam pembentukan hormon reproduktif dan perkembangan embrio.
3. Fe dan I: Mempengaruhi oksigenasi jaringan dan aktivitas tiroid yang penting untuk perkembangan sistem reproduksi.

7.4 Metabolisme Mineral dalam Tubuh Hewan

Metabolisme mineral mencakup proses kompleks yang melibatkan absorpsi, transportasi, distribusi, penyimpanan, dan ekskresi mineral dalam tubuh hewan. Setiap tahapan dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk bentuk kimia mineral, kebutuhan fisiologis hewan, interaksi antar mineral, serta keberadaan senyawa penghambat atau pendukung dalam pakan (Armayanti et al. 2024).

7.4.1 Absorpsi Mineral

Absorpsi terjadi terutama di usus halus melalui dua mekanisme utama (Chuzaemi et al. 2020; Armayanti et al. 2024):

1. Transpor aktif: Melibatkan protein pembawa dan membutuhkan energi, umumnya untuk mineral seperti kalsium, zat besi, dan fosfor.
2. Difusi pasif: Terjadi ketika konsentrasi mineral di lumen usus lebih tinggi dari dalam sel usus.

Faktor yang memengaruhi absorpsi (Arifin 2007; Chuzaemi et al. 2020; Sumbono 2021; Armayanti et al. 2024):

1. Kelarutan dan bentuk mineral: bentuk organik (chelated) umumnya lebih mudah diserap dibanding bentuk anorganik.
2. pH usus: pH yang optimal mendukung ionisasi mineral sehingga lebih mudah diserap.
3. Antagonis dan sinergis mineral: misalnya, kelebihan kalsium dapat menurunkan absorpsi magnesium dan seng.
4. Faktor antinutrisi: asam fitat, oksalat, dan tanin dalam pakan dapat mengikat mineral dan menghambat penyerapannya.

7.4.2 Transportasi dalam Darah

Setelah diserap, mineral dibawa dalam darah dalam bentuk:

1. Bebas (ionik): Misalnya Na^+ dan K^+ .
2. Terikat protein: Misalnya Fe terikat dengan transferrin, Cu dengan ceruloplasmin.
3. Terikat molekul organik: Seperti Zn yang dapat berikatan dengan asam amino atau peptida.

7.4.3 Distribusi dan Penyimpanan

Mineral didistribusikan ke jaringan tubuh sesuai kebutuhan (Pribadi et al. 2004; Chuzaemi et al. 2020):

1. Kalsium dan fosfor: Mayoritas tersimpan dalam tulang.
2. Zat besi: Disimpan dalam hati dan sumsum tulang sebagai ferritin atau hemosiderin.
3. Selenium dan zink: Tersebar dalam jaringan aktif metabolisme tinggi (liver, ginjal, pankreas).

Penyimpanan ini memungkinkan tubuh bertahan sementara saat terjadi kekurangan asupan mineral.

7.4.4 Ekskresi

Ekskresi mineral dilakukan melalui (Widhyari, Esfandiari & Cahyono 2015; Widhyari, Esfandiari, Wijaya, et al. 2015b; Wibowo 2013; Mariana et al. 2021):

1. Ginjal (urin): Jalur utama untuk mineral yang larut dalam air seperti Na, K, Cl, Mg.
2. Feses: Mineral yang tidak diserap atau disekresikan kembali ke usus.
3. Keringat dan air susu: Dalam jumlah kecil, terutama pada hewan menyusui.

Tubuh menjaga homeostasis mineral melalui mekanisme umpan balik hormonal (Mainassy et al. 2024). Misalnya:

1. Kalsium: Diatur oleh hormon paratiroid (PTH), kalsitonin, dan vitamin D.
2. Fosfor: Juga dipengaruhi oleh PTH dan vitamin D.
3. Zat besi: Diatur oleh hepsidin, hormon hati yang mengontrol absorpsi dan distribusi zat besi.

7.5 Defisiensi dan Toksisitas Mineral

Keseimbangan mineral yang tepat sangat penting bagi kesehatan ternak. Kekurangan (defisiensi) maupun kelebihan (toksisitas) mineral dapat menimbulkan gangguan metabolisme, pertumbuhan, produktivitas, dan reproduksi. Oleh karena itu, pemahaman mengenai gejala klinis dan penyebabnya penting dalam praktik kedokteran veteriner dan formulasi pakan (Arifin 2007; Chuzaemi et al. 2020; Sumbono 2021; Armayanti et al. 2024; Widhyari 2012; Sugiharto 2021; Hamdi Mayulu 2023a; Yanuartono et al. 2016).

7.5.1 Defisiensi Mineral

Defisiensi mineral dapat bersifat primer (asupan rendah dalam pakan) atau sekunder (akibat gangguan absorpsi, interaksi antagonistik, atau peningkatan kebutuhan fisiologis).

Contoh dan dampaknya (Armayanti et al. 2024; Nurcahyo et al. 2017; Nurmin et al. 2018; Yanuartono et al. 2016):

1. Kalsium (Ca): Rakhitis pada hewan muda, osteomalasia pada hewan dewasa, parturient paresis pada sapi perah.
2. Fosfor (P): Pertumbuhan terhambat, pica (kebiasaan makan benda asing), reproduksi terganggu.
3. Zat Besi (Fe): Anemia mikro-sitik hipokromik, terutama pada anak babi.
4. Tembaga (Cu): Depigmentasi rambut/wol, anemia, gangguan pertumbuhan tulang.
5. Selenium (Se): Penyakit otot putih (white muscle disease), distrofia otot pada anak ternak.

6. Yodium (I): Geter gondok (goiter), kegagalan pertumbuhan, lahir mati akibat hipotiroidisme.

7.5.2. Toksisitas Mineral

Toksisitas dapat terjadi akibat asupan berlebih, interaksi sinergis yang berlebihan, atau paparan lingkungan (misalnya dari air minum atau kontaminasi pakan).

Contoh dan dampaknya (Armeyanti et al. 2024; Nurcahyo et al. 2017; Nurmin et al. 2018; Yanuartono et al. 2016):

1. Selenium: Toksik dalam jumlah tinggi, menyebabkan kerontokan rambut, deformitas kuku, dan kematian.
2. Tembaga: Akumulasi dalam hati menyebabkan keracunan akut (terutama pada domba).
3. Fluor (F): Fluorosis kronik, merusak gigi dan tulang.
4. Zink (Zn): Menurunkan penyerapan Cu dan Fe, gangguan pencernaan (Widhyari 2012).
5. Nitrat (NO_3^-) dan Nitrit (NO_2^-): Bukan mineral esensial, tetapi keberadaannya dalam air/pakan dapat menyebabkan methemoglobinemia.

7.5.3 Faktor Risiko dan Pencegahan

1. Pemantauan kualitas pakan dan air.
2. Penggunaan premiks mineral secara seimbang dan sesuai spesies.
3. Evaluasi kebutuhan spesifik berdasarkan umur, jenis ternak, kondisi fisiologis (laktasi, bunting, tumbuh).
4. Pemeriksaan laboratorium darah dan jaringan untuk mendeteksi ketidakseimbangan mineral.

7.6 Interaksi Mineral dengan Senyawa Lain

Dalam tubuh hewan, mineral jarang bekerja secara mandiri. Mereka saling berinteraksi, baik secara sinergis maupun antagonis, serta terpengaruh oleh senyawa lain dalam pakan. Pemahaman interaksi ini sangat penting dalam formulasi ransum, karena keseimbangan yang tidak tepat bisa mengganggu metabolisme dan kesehatan ternak.

7.6.1 Interaksi Antara Mineral

Beberapa mineral dapat saling menghambat atau mendukung penyerapannya:

1. $\text{Ca} \leftrightarrow \text{P}$: Keseimbangan rasio $\text{Ca}:\text{P}$ sangat penting untuk kesehatan tulang. Rasio ideal umumnya 1.5–2:1.
2. $\text{Fe} \leftrightarrow \text{Cu} \leftrightarrow \text{Zn} \leftrightarrow \text{Mn}$: Mineral-mineral ini bersaing dalam jalur absorpsi yang sama. Kelebihan salah satu dapat menyebabkan defisiensi fungsional yang lain.
3. $\text{Cu} \leftrightarrow \text{Mo} \leftrightarrow \text{S}$: Molybdenum dan sulfur dapat membentuk kompleks thiomolybdate yang menghambat absorpsi tembaga, menyebabkan defisiensi sekunder Cu.
4. $\text{Na} \leftrightarrow \text{K}$: Interaksi penting dalam menjaga tekanan osmotik dan keseimbangan elektrolit.

7.6.2 Interaksi dengan Vitamin

1. Vitamin D $\leftrightarrow$ Ca & P: Vitamin D3 meningkatkan absorpsi kalsium dan fosfor di usus.
2. Vitamin E $\leftrightarrow$ Se: Keduanya berperan dalam pertahanan antioksidan sel. Kekurangan salah satu bisa memperburuk efek kekurangan yang lain.

3. Vitamin B12 $\leftrightarrow$ Kobalt: Kobalt diperlukan untuk sintesis vitamin B12 oleh mikroorganisme rumen.

7.6.3 Interaksi dengan Senyawa Antinutrisi

Makanan ternak tidak hanya mengandung zat gizi yang bermanfaat, tetapi juga senyawa alami tertentu yang dapat menghambat penyerapan atau pemanfaatan nutrisi oleh tubuh ternak. Senyawa-senyawa ini dikenal sebagai antinutrien, dan meskipun berasal dari bahan pangan alami, keberadaannya dapat memengaruhi efektivitas penyerapan zat gizi penting seperti zat besi, kalsium, dan protein.

1. Asam fitat: Terdapat dalam biji-bijian, mengikat mineral seperti Zn, Ca, dan Fe, membentuk kompleks tidak larut.
2. Oksalat: Mengganggu absorpsi kalsium dengan membentuk kalsium oksalat.
3. Tan dan serat kasar: Dapat mengikat mineral dan mengurangi ketersediaannya, terutama pada pakan berbasis tanaman tropis.

7.6.4 Peran Chelator dan Enzim Fitase

Untuk meningkatkan bioavailabilitas mineral, digunakan (Hidayat 2016; Sahara et al. 2012; Setiawati et al. 2016):

1. Chelator organik: Seperti mineral proteinat atau asam amino chelate, meningkatkan absorpsi dan stabilitas mineral.
2. Enzim fitase: Ditambahkan dalam ransum untuk memecah asam fitat, sehingga meningkatkan ketersediaan P, Zn, dan Fe.

7.7 Implikasi Biokimia Mineral terhadap Kesehatan dan Produktivitas Ternak

Mineral merupakan komponen kunci dalam menjaga fungsi fisiologis, performa produksi, dan reproduksi ternak. Ketidakseimbangan mineral, baik defisiensi maupun toksisitas, dapat menurunkan efisiensi usaha peternakan secara signifikan. Oleh karena itu, pemahaman biokimia mineral menjadi landasan penting dalam strategi manajemen nutrisi dan kesehatan ternak modern (Hamdi Mayulu 2023b; Mainassy et al. 2024; Chuzaemi et al. 2020; Sumbono 2021).

7.7.1 Dampak terhadap Kesehatan Ternak

Mineral merupakan mikronutrien esensial yang meskipun dibutuhkan dalam jumlah kecil, memiliki peran yang sangat vital dalam berbagai fungsi fisiologis dan biokimia tubuh ternak. Kekurangan atau ketidakseimbangan mineral dalam ransum dapat menimbulkan gangguan serius terhadap kesehatan, produktivitas, dan efisiensi reproduksi ternak. Setiap jenis mineral memiliki fungsi spesifik yang saling berkaitan dalam menjaga sistem kekebalan, pertumbuhan, metabolisme, serta fungsi reproduksi. Berikut ini adalah beberapa implikasi penting dari keberadaan mineral tertentu terhadap berbagai aspek kesehatan dan performa ternak (Pribadi et al. 2004; Chuzaemi et al. 2020; Armayanti et al. 2024; Widhyari 2012; Suprayitno et al. 2020; Sugiharto 2021; Hamdi Mayulu 2023a).

1. Sistem imun: Zn, Cu, dan Se berperan dalam respon imun. Kekurangannya menyebabkan hewan rentan terhadap infeksi.

2. Pertumbuhan dan perkembangan: Ca, P, dan Mg diperlukan untuk pembentukan tulang dan metabolisme energi. Defisiensi dapat menghambat pertumbuhan.
3. Reproduksi: Cu, Mn, dan Zn penting untuk kesuburan, siklus estrus normal, dan kualitas sperma.
4. Kesehatan metabolik: Elektrolit seperti Na, K, dan Cl menjaga keseimbangan asam-basa, osmotik, dan fungsi saraf-otot.
5. Antioksidan: Se dan Zn mendukung aktivitas enzim antioksidan seperti glutathione peroksidase dan superoksida dismutase.

7.7.2 Dampak terhadap Produktivitas Ternak

Selain berperan dalam fungsi dasar tubuh seperti imun, pertumbuhan, dan reproduksi, mineral juga memiliki kontribusi besar terhadap kualitas dan kuantitas produk ternak yang dihasilkan. Dalam industri peternakan, aspek seperti produksi susu, kualitas daging dan telur, serta efisiensi konversi pakan menjadi indikator utama keberhasilan usaha. Kecukupan dan keseimbangan mineral tidak hanya memengaruhi performa individu ternak, tetapi juga berdampak langsung pada keuntungan ekonomi dan keberlanjutan peternakan. Berikut adalah beberapa peran penting mineral dalam mendukung produktivitas dan kesehatan hasil ternak (Hamdi Mayulu 2023a; Pribadi et al. 2004; Armayanti et al. 2024; Widhyari 2012; Suprayitno et al. 2020; Sugiharto 2021; Chuzaemi et al. 2020; Gunawan et al. 2016; Nurcahyo et al. 2017; Kurnia et al. 2012; Widhyari, Esfandiari, Wijaya, et al. 2015a; Dwipartha et al. 2014).

1. Produksi susu: Kalsium dan fosfor dalam jumlah cukup sangat penting untuk sintesis susu. Defisiensi menyebabkan penurunan produksi.
2. Kualitas daging dan telur: Zn dan Fe mempengaruhi warna, tekstur, dan kualitas organoleptik produk hewani.
3. Konversi pakan: Mineral mendukung efisiensi metabolisme, sehingga penggunaan pakan lebih optimal.
4. Mortalitas dan morbiditas: Ketidakseimbangan mineral meningkatkan angka kematian dan kejadian penyakit.

7.7.3 Strategi Optimalisasi Biokimia Mineral

Untuk mengoptimalkan peran mineral dan mencegah dampak negatif dari ketidakseimbangannya, manajemen nutrisi yang tepat menjadi kunci utama. Pemberian pakan tidak boleh dilakukan secara seragam tanpa mempertimbangkan kebutuhan spesifik ternak yang bervariasi tergantung pada jenis, umur, fase produksi, serta kondisi lingkungan. Di samping itu, inovasi dalam formulasi pakan dan pengawasan kesehatan ternak secara rutin juga berperan penting dalam menjaga efisiensi dan keberlanjutan produksi. Berikut ini adalah beberapa strategi yang dapat diterapkan dalam pengelolaan mineral pada pakan ternak secara efektif (Dewi et al. 2024; Daud et al. 2020; Adelina et al. 2020; Budiarsana 2016; Listyowati et al. 2023).

1. Ransum berbasis kebutuhan spesifik: Menyesuaikan formulasi pakan berdasarkan jenis, umur, status fisiologis, dan lingkungan.

2. Penggunaan premiks berkualitas tinggi: Menjamin distribusi mineral yang seimbang dan tersedia hayati.
3. Pemantauan kesehatan ternak: Deteksi dini melalui pemeriksaan laboratorium dapat mencegah kerugian ekonomi.
4. Inovasi nutrisi: Penggunaan bentuk mineral organik (chelates), fitase, dan aditif lain untuk meningkatkan bioavailabilitas.

DAFTAR PUSTAKA

- Adelina, T., Mucra, D.A. & Harahap, A.E., 2020. Pengaruh pemberian wafer ransum komplit yang ditambahkan ampas sagu (Metroxylon Sp) terhadap penampilan produksi sapi bali. *Jambura Journal of Animal Science*, 3(1), pp.2655–4356.
- Ardiansyah, A., Harmayani, E. & Lestari, L.A., 2020. *Biokimia Pangan, Gizi dan Kesehatan*, Universitas Bakrie.
- Arifin, Z., 2007. Pentingnya mineral tembaga (Cu) dalam tubuh hewan dalam hubungannya dengan penyakit. *Wartazoa*, 17(2), pp.93–99.
- Armayanti, A.K. et al., 2024. *Nutrisi Ternak Dasar: Dinamika Teori dan Perkembangannya*, PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Atmaja, R.F.D. et al., 2022. *Teori Biokimia Dasar*, PT. Scifintech Andrew Wijaya.
- Budiarsana, I.G.M., 2016. Penggunaan Fungsi “Solver” dalam Formulasi Pakan Termurah untuk Peternak Sapi Perah Skala Kecil. *Informatika Pertanian*, 25(2), pp.231–240.
- Chuzaemi, I.S. et al., 2020. *Ilmu Gizi Ruminansia*, Media Nusa Creative MNC Publishing.
- Daud, M., Yaman, M.A. & Zulfan, Z., 2020. Potensi penggunaan limbah ikan leubiem (*Chanthidermis maculatus*) sebagai sumber protein dalam ransum terhadap produktivitas itik petelur. *Livestock and Animal Research*, 18(3), pp.217–228.
- Dewantari, N.M., 2013. Peranan gizi dalam kesehatan

- reproduksi. *Jurnal skala husada*, 10(2), pp.219–224.
- Dewi, S.B.L. et al., 2024. Inovasi Fermentasi Jerami Padi Sebagai Pakan Ternak guna Menciptakan Kesejahteraan Peternak di Desa Musir Lor. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Inovasi Indonesia*, 2(3), pp.375–382.
- Dwipartha, P.S., Suarsana, I.N. & Suwiti, N.K., 2014. Profil Mineral Kalium (K) Dan Kobalt (Co) pada Serum Sapi Bali yang Dipelihara Di Lahan Perkebunan. *Buletin Veteriner Udayana*, 6(2), pp.125–128.
- Ernawati, F., 2013. Peran beberapa zat gizi mikro dalam sistem imunitas. *Gizi Indonesia*, 36(1).
- Garrett, R.H. & Grisham, C.M., 2017. *Biochemistry* 6th ed., USA: University of Virginia.
- Gunawan, I.W., Suwiti, N.K. & Sampurna, P., 2016. Pengaruh pemberian mineral terhadap lingkar dada, panjang dan tinggi tubuh sapi Bali jantan. *Buletin Vet. Udayana*, 8(2), pp.128–134.
- Hamdi Mayulu, S.P., 2023a. *Teknologi Pakan Ruminansia*, Depok: PT. RajaGrafindo Persada-Rajawali Pers.
- Hamdi Mayulu, S.P., 2023b. *Teknologi Pakan Ruminansia*, PT. RajaGrafindo Persada-Rajawali Pers.
- Hidayat, C., 2016. Pemanfaatan fitase sebagai upaya penanggulangan asam fitat dalam ransum ayam pedaging. *Wartazoa*, 26(2), pp.57–68.
- Hidayati, S. et al., 2025. *Pengantar Ilmu Gizi*, CV. Gita Lentera.
- Kurnia, F.R.A.N.S., Suhardiman, M. & Stephani, L., & Purwadaria, T., 2012. Peranan nano-mineral sebagai

bahan imbuhan pakan untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas produk ternak. *Wartazoa*, 22(4), pp.187–193.

Listyowati, A.A., Pratama, A.W. & Nurdayati, N., 2023. Pengaruh Penambahan Tepung Indigofera (*Indigofera zollingeriana*) dalam Pakan Komplit Terhadap Kualitas Organoleptik dan Fisiologis Domba Lokal Jantan. *Jurnal Penelitian Peternakan Terpadu*, 5(2), pp.120–128.

Madigan, M.T. et al., 2019. *Brock Biology of Microorganisms* Fifteenth. S. Beauparlant, ed., Harlow: Pearson.

Mainassy, M.C. et al., 2024. *Fisiologi Hewan*, Makassar: Tohar Media.

Mariana, E., Allaily, A. & Latif, H., 2021. Environmental modifications and feed management to cope heat stress of dairy goat in Lamlumpu Village, Peukan Bada sub-district, Aceh Besar district. *Buletin Pengabdian/Bulletin of Community Services*, 1(3), pp.96–100.

Mose, W. et al., 2025. *Biologi Molekuler*, Mega Press Nusantara.

Nelson, D.L. & Cox, M.M., 2017. *Lehninger Principles of biochemistry* 4th ed., United States: W. H. Freeman.

Ningtias, P.I., Widhyari, S.D. & Wulansari, R., 2022. Konsentrasi mineral serum saat produksi embrio dan hubungannya dengan kualitas dan kuantitas embrio pada sapi peranakan Ongole. *Acta Veterinaria Indonesiana*, 10(2), pp.103–110.

Nurcahyo, H., Harjana, T. & Hasanah, H., 2017. Peningkatan Produktivitas Ternak Domba dengan Penerapan

- Mineral Komplit secara Terprogram di Keputren, Pleret, Bantul. *Jurnal Pengabdian Masyarakat MIPA dan Pendidikan MIPA*, 1(1), pp.6–11.
- Nurmin, N., Sabang, S.M. & Said, I., 2018. Penentuan Kadar Natrium (Na) dan Kalium (K) dalam Buah Pisang Kepok (*Musa paradisiaca* L.) Berdasarkan Tingkat Kematangannya. *Jurnal Akademika Kimia*, 7(3), p.115.
- Pribadi, M. et al., 2004. *Peranan Mineral Seng (Zn) dalam Tubuh Ternak*,
- Putra, I.E., 2024. Pengendalian Mutu Dalam Produksi Pakan. In *Teknologi Pengolahan Pakan Ternak: Teori dan Praktek*. p. 73.
- Rahardjo, D.Y., 2023. *Beternak ayam petelur*, Bandung: Nuansa Cendekia.
- Rahayu, L.S. & Maulida, N.R., 2022. *Gizi Klinik Komprehensif*, Yogyakarta: Gramasurya.
- Runtuboi, D.Y. & Sujarta, P., 2023. *Buku Ajar Pengantar Bioremediasi*, Deepublish.
- Sahara, E., Raudhaty, E. & Maharany, F., 2012. Performa ayam broiler dengan penambahan enzim fitase dalam ransum. *Jurnal Peternakan Sriwijaya (JPS)*, 1(1), pp.34–40.
- Setiawati, D., Sukamto, B. & Wahyuni, H.I., 2016. Pengimbuhan enzim fitase dalam ransum ayam pedaging meningkatkan pemanfaatan kalsium untuk pertumbuhan tulang dan bobot badan. *Jurnal Veteriner*, 17(3), pp.468–476.

- Setyawati, V.A. V. & Hartini, E., 2018. *Buku ajar dasar ilmu gizi kesehatan masyarakat*, Deepublish.
- Siregar, M.S. & Desi Ardilla, S.P., 2024. *Biokimia Pangan*, Sugiharto, S., 2021. *Diklat Fisiologi Lingkungan Peternakan*, Semarang: UNDIP Press Semarang.
- Sulaiman, Y. et al., 2022. *Dasar-dasar ilmu gizi*, Yayasan Penerbit Muhammad Zaini.
- Sumbono, A., 2021. *Mineral Seri Biokimia Pangan Dasar*, Deepublish.
- Suprayitno, I., Humaidah, N. & Suryanto, D., 2020. Efektivitas penambahan mineral pada pakan terhadap produksi ternak ruminansia (article review). *Dinamika Rekasatwa: Jurnal Ilmiah*, 3(2).
- Susanti, R. & Fibriana, F., 2018. *Teknologi enzim*, Penerbit Andi.
- Talaro, Kathleen P. dan Talaro, A., 2002. *Foundations in Microbiology IV*, ed., New York: McGraw-Hill.
- Wahidah, B.F. & Achmad, C.A., 2020. *Ilmu Hara*, Alinea Media Dipantara.
- Wibowo, R., 2013. *Pengaruh penggunaan onggok kering terfermentasi probiotik dalam ransum terhadap konsumsi pakan, pertambahan bobot badan dan konversi pakan ayam pedaging*. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Widhyari, S.D., 2012. Peran dan dampak defisiensi zinc (Zn) terhadap sistem tanggap kebal. *Wartazoa*, 22(3), pp.141–148.

- Widhyari, S.D., Esfandiari, A., Wijaya, A., et al., 2015a. Tinjauan penambahan mineral Zn dalam pakan terhadap kualitas spermatozoa pada sapi Frisian Holstein jantan. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 20(1), pp.72–77.
- Widhyari, S.D., Esfandiari, A., Wijaya, A., et al., 2015b. Tinjauan penambahan mineral Zn dalam pakan terhadap kualitas spermatozoa pada sapi Frisian Holstein jantan. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 20(1), pp.72–77.
- Widhyari, S.D., Esfandiari, A. & Cahyono, A.D., 2015. Profil kreatinin dan nitrogen urea darah pada anak sapi Friesian Holstein yang disuplementasi Zn. *Acta Veterinaria Indonesiana*, 3(2), pp.45–50.
- Yanuartono, Y. et al., 2016. Peran makromineral pada reproduksi ruminansia. *Jurnal Sain Veteriner*, 34(2), pp.155–165.

BAB 8

ENZIM

Oleh Dara Juliana

8.1 Pengertian Enzim

Protoplasma sel mengandung seribu atau lebih protein, yang masing-masing menghasilkan salah satu dari sekian banyak pengubah kimia yang dibutuhkan untuk mempertahankan kehidupan. Protein-protein ini disebut enzim. Enzim adalah katalis organik koloid dan larut yang disintesis dalam sel tubuh. Kata enzim pertama kali diperkenalkan oleh Khune pada tahun 1878 dan berasal dari kata Yunani asli 'enzim', yang berarti "di dalam ragi". Kata enzim diberikan berdasarkan spekulasi bahwa peran sel ragi dalam fermentasi sebenarnya disebabkan oleh protein yang ada di dalam sel dan bertindak sebagai katalis. "Enzim dapat didefinisikan sebagai katalis biologis kompleks yang diproduksi oleh organisme hidup di dalam selnya untuk mengatur berbagai proses fisiologis tubuh". Dipercayai bahwa untuk setiap enzim dalam sel hidup, ada gen terpisah yang bertanggung jawab atas sintesis enzim tersebut. Karena gen adalah unit yang menggandakan diri yang komposisinya tetap tidak berubah saat diwariskan dari satu generasi ke generasi berikutnya, tidak akan ada perubahan pada enzim dan dengan demikian metabolisme, perilaku, dan karakteristik fisik spesies tertentu tetap sama dari

generasi ke generasi. Hanya jika terjadi kehilangan atau perubahan pada satu atau lebih gen, akan ada perubahan pada enzim yang diproduksi oleh gen tersebut. Enzim dapat dengan mudah diklasifikasikan ke dalam beberapa kelompok utama menurut reaksi kimia yang dikatalisisnya. Klasifikasi enzim tersebut yaitu Oksidoreduktase, transferase, hydrolase, liase, isomerase, dan ligase (Kapoor, 2020)

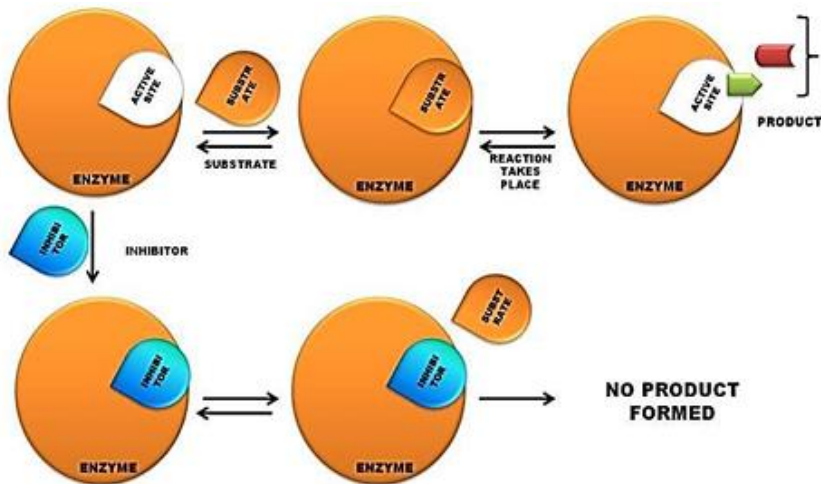
Enzim merupakan sebuah molekul protein yang memiliki peranan penting dalam organisme hidup sebagai biokatalisator. Enzim dikenal sebagai katalisator dari 5000 jenis reaksi biokimia. Dalam tubuh manusia enzim mengkatalisis semua jenis reaksi kimia yang terlibat dalam pertumbuhan tubuh, seperti dalam proses pembekuan darah, proses penyembuhan, pencernaan makanan, mekanisme reproduksi, proses replikasi DNA, proses transkripsi, sintesis protein dari asam amino, dan proses transduksi sinyal. Dalam kondisi normal semua enzim pertama-tama terikat dengan substrat dan membentuk kompleks enzim-substrat, kemudian diubah menjadi produk akhir. Dengan menghambat enzim tertentu, kita dapat menyembuhkan banyak kondisi patologis pada manusia seperti menghambat HMG CoA reduktase, kita dapat menurunkan sintesis kolesterol yang sangat berguna dalam aterosklerosis dan juga digunakan untuk penyakit jantung. Inhibitor ACE dapat mengurangi konsentrasi Angiotensin II dan digunakan untuk mengurangi tekanan darah. Enzim terbagi menjadi mekanisme inhibisi enzim dan inhibitor enzim. Inhibisi ini merupakan penghambatan enzim yang dibantu oleh suatu inhibitor sebagai kontrol mekanisme untuk berbagai sistem biologis yang mekanismenya

dimanfaatkan untuk banyak program penemuan obat. Dalam proses penghambatan enzim, kita menghambat laju reaksi enzim secara keseluruhan atau sebagian. Kita dapat menyembuhkan sejumlah kondisi patologis dengan menggunakan penghambat enzim (Patadiya, N; Panchal, N; Vaghela, V, 2021).

Jenis-jenis inhibisi enzim yaitu terdiri dari penghambatan enzim reversibel, inhibitor kompetitif, inhibitor non-kompetitif dan inhibitor alosterik.

1. Penghambatan enzim reversibel, yaitu menunjukkan bahwa molekul yang menghambat enzim tidak terikat hiperlipidemia. Allopurinol adalah penghambat xantin oksidase. secara kovalen dengan enzim dan setelah beberapa waktu molekul tersebut meninggalkan enzim, dan kita memperoleh enzim bebas setelah waktu yang terbatas. Inhibitor enzim reversibel mengikat enzim melalui interaksi yang lemah seperti ikatan hidrogen, interaksi hidrofobik, dan ikatan ionik yang dapat putus setelah waktu terbatas.
2. Inhibitor kompetitif, yaitu inhibitor yang hanya berikatan dengan enzim, bukan dengan kompleks enzim-substrat karena afinitas substrat dan enzim tidak memiliki perbedaan yang besar. Inhibitor di sini hanya memiliki afinitas untuk sisi aktif, bukan dengan sisi alosterik. Setelah kompleks enzim-substrat berhasil diproduksi, inhibitor tidak dapat menghasilkan efeknya. Jenis penghambatan ini dapat diatasi dengan menambahkan konsentrasi substrat yang tinggi. Dalam inhibisi kompetitif, hanya ada satu situs pengikatan aktif

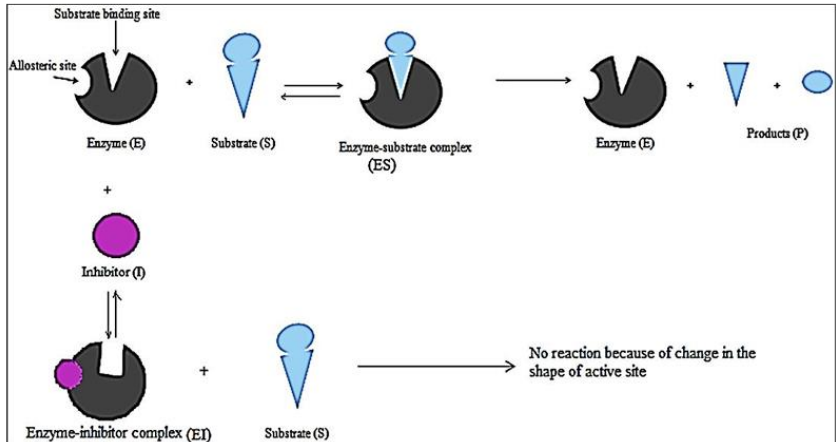
(situs pengikatan substrat) tempat substrat dan inhibitor kompetitif bersaing untuk mengikat. Jika konsentrasi substrat tinggi, substrat mengikat situs pengikatan aktif dan membentuk kompleks enzim-substrat (ES) diikuti oleh pembentukan produk (P).



Gambar 8. 1. Mekanisme Inhibitor Kompetitif (Singla, 2020)

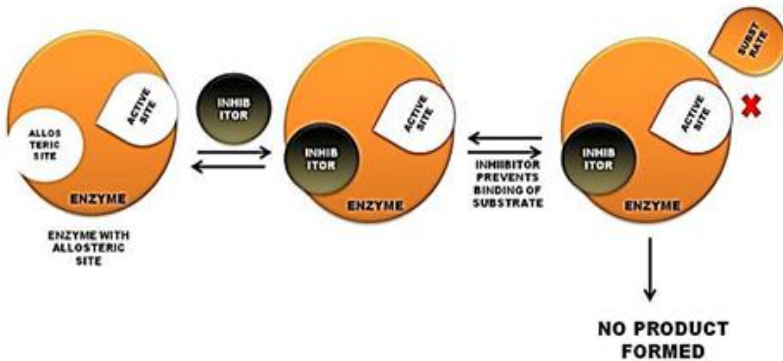
3. Inhibitor non-kompetitif, yaitu mengikat enzim tetapi tidak pada tempat pengikatan aktif. Laju penghambatan secara langsung bergantung pada konsentrasi inhibitor. Dalam mekanisme ini, pembentukan kompleks enzim-inhibitor dan enzim-inhibitorsubstrat dimungkinkan. Inhibisi non-kompetitif dapat didefinisikan sebagai fenomena suatu inhibitor yang berinteraksi dengan sekelompok enzim, secara reversibel, sehingga menyebabkan penghambatan terhadap aksi normal

enzim, yang sebenarnya penting bagi aktivitas enzim tersebut



Gambar 8. 2. Mekanisme Inhibitor Non-Kompetitif (Singla, 2020)

4. Inhibitor alosterik, yaitu jenis penghambatan enzim di mana reaksi dalam suatu jalur dikatalisis oleh enzim yang berbeda secara berurutan dan produk akhir yang dihasilkan mungkin bertanggung jawab untuk menghambat aktivitas enzim pertama dari rangkaian tersebut. Jenis penghambatan enzim di mana reaksi dalam suatu jalur dikatalisis oleh enzim yang berbeda secara berurutan dan produk akhir yang dihasilkan mungkin bertanggung jawab untuk menghambat aktivitas enzim pertama dalam rangkaian tersebut. Ada perubahan lengkap dalam fitur struktural penghambatan yang disebabkan oleh produk akhir dari molekul substrat (Singla, 2020).

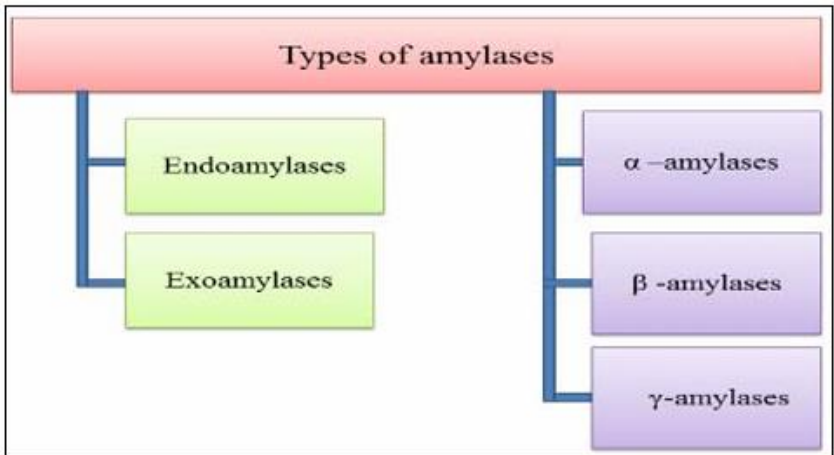


Gambar 8. 3. Mekanisme Inhibitor Alosterik (Singla, 2020)

8.2 Klasifikasi Enzim

Beberapa contoh enzim yang berperan dalam kehidupan salah satu nya adalah amilase. **Amilase** merupakan enzim pendegradasi pati yang mengkatalisis hidrolisis ikatan glikosidik alfa 1-4 internal dalam polisakarida dengan retensi konfigurasi alfa anomerik dalam produk. Enzim amilase banyak ditemukan dalam semua bentuk organisme terlepas dari kingdomnya. Amilase dari tumbuhan dan mikroba telah digunakan selama berabad-abad dalam industri pembuatan bir. Amilase jamur banyak digunakan untuk persiapan makanan oriental. Amilase dari buah apel menunjukkan efisiensi tinggi untuk menghilangkan noda coklat dalam kombinasi dengan deterjen komersial. Analisis kinerja pencucian noda coklat pada kain katun menunjukkan peningkatan reflektansi dengan deterjen dan enzim dibandingkan dengan deterjen saja. Berikut adalah gambar dari tipe amilase. Enzim amilase ini merupakan salah satu enzim tertua yang ditemukan. Pada tahun 1815,

penemuan amilase ini ditemukan oleh Kirchhoff pada saat ketika pati pertama kali terdegradasi (Saini, et al., 2017).



Gambar 8. 4. Berbagai Jenis Amilase (Saini, et al., 2017).

Selanjutnya terdapat **enzim lipase**, enzim lipase merupakan enzim yang ada di mana-mana dan tersebar luas di alam. Lipase pertama kali diisolasi dari bakteri pada awal abad ke-19. Lipase secara alami mengkatalisis hidrolisis ikatan ester tri-, di-, dan monogliserida menjadi asam lemak dan gliserol. Lipase, dalam kondisi termodinamika yang menguntungkan (yaitu, aktivitas air rendah), juga mengkatalisis berbagai macam reaksi sintesis yang dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis reaksi utama, yaitu esterifikasi dan transesterifikasi. Esterifikasi adalah reaksi di mana asam lemak dihubungkan, melalui aksi enzim, ke alkohol melalui ikatan kovalen, menghasilkan ester dan melepaskan molekul air. Tioesterifikasi dan amidasi adalah reaksi serupa tetapi dengan tiol atau amina sebagai substrat. Kelompok transesterifikasi meliputi reaksi alkoholisis, asidolisis, aminolisis, dan inter-esterifikasi. enzim lipase,

yaitu bentuk aktif dari prolaps. Setelah diaktifkan, enzim yang larut dalam air bertindak sebagai katalis yang memecah ikatan ester dalam substrat lipid yang tidak larut dalam air. Ia memecah lemak menjadi monogliserida, asam lemak, dan gliserol. Enzim ini penting dalam proses pencernaan, serta pemindahan dan pemrosesan lipid makanan dalam organisme. (Casas-Godoy, et al., 2018)

Selanjutnya yaitu **enzim proteolitik**. Enzim ini akan mengkatalisis proses hidrolisis ikatan peptida antara residu asam amino protein. Enzim ini sering disebut sebagai protease atau peptidase. Sebagian besar protease diproduksi sebagai zimogen, bentuk yang tidak aktif. Zimogen diaktifkan oleh isyarat lingkungan atau setelah bertemu dengan substrat spesifiknya, yang dapat menyebabkan perubahan konformasi. Enzim proteolitik terlibat dalam reaksi biologis penting yang terjadi pada tingkat seluler hingga organisme. Pada tingkat seluler, enzim proteolitik terlibat dalam beberapa reaksi biologis penting yang terkait tetapi tidak terbatas pada siklus sel, degradasi protein yang salah lipat, apoptosis, dan mediasi respons imun. Enzim proteolitik juga memiliki peran ekologis penting dalam menjaga siklus nitrogen. Protease yang diproduksi oleh mikroorganisme mendegradasi organisme yang mati dan melepaskan nitrogen yang diasimilasi dalam bentuk protein. Secara umum, protease dapat dikelompokkan sebagai eksopeptidase atau endopeptidase tergantung pada lokasi kerjanya. Eksopeptidase memecah ikatan peptida di dekat ujung rantai polipeptida. Eksopeptidase yang memecah ikatan dari ujung N dan menghasilkan residu asam amino tunggal atau dipeptida atau tripeptida disebut sebagai aminopeptidase. Eksopeptidase yang bekerja pada ujung C

dan menghasilkan residu asam amino tunggal atau dipeptida disebut sebagai karboksipeptidase. Endopeptidase memecah ikatan dari ujung. Enzim proteolitik diklasifikasikan menurut mekanisme kerja berdasarkan residu asam amino katalitik yang terlibat, dalam empat kategori: (1) protease serin, (2) protease aspartat, (3) protease sistein, dan (4) metaloprotease (Dhillon, et al., 2018).

Selanjutnya adalah **enzim amilase pankreas** mengubah gula kompleks seperti pati dan polisakarida karbohidrat menjadi gula yang lebih sederhana selama pencernaan. Amilase menghidrolisis pati, glikogen, dan dekstrin untuk membentuk glukosa, maltosa, dan dekstrin. Amilase dilepaskan oleh kelenjar ludah, tetapi beberapa juga dapat ditemukan di pankreas yang juga membantu pencernaan. Selanjutnya adalah **enzim proelastase** yaitu bentuk tidak aktif dari enzim elastase. Aktivasi proelastase dilakukan dengan memecah beberapa residu sub-unit yang mengikat struktur inti protein. Terdapat juga enzim enteropeptidase yaitu enzim yang diproduksi di dalam dinding usus halus dan dilepaskan oleh kelenjar duodenum. Enzim ini secara proteolitik mengubah tripsinogen menjadi tripsin yang selanjutnya mengaktifkan enzim pencernaan lainnya. Enteropeptidase memecah di ujung C-terminal tripsinogen dan memperkuat enzim, mengubah tripsinogen menjadi tripsin. Selanjutnya enzim kaspase yaitu enzim yang berperan penting dalam apoptosis, nekrosis, dan peradangan. Ia berperan penting dalam sel untuk apoptosis (kematian terprogram) selama tahap perkembangan dan tahap lain dalam kehidupan dewasa. Kemudian terdapat **enzim protrombin** merupakan bentuk enzim trombin yang tidak aktif yang mengubah fibrinogen menjadi fibrin. Selama

ruptur jaringan, fibrin berperan dalam pembekuan darah dan pemulihan jaringan. Fibrinogen memiliki struktur simetris linier, yang mengandung lokasi pembelahan sentral. Selanjutnya adalah **enzim angiotensin**, yaitu oligopeptide yang berperan dalam menyempitkan pembuluh darah sehingga meningkatkan tekanan darah. Angiotensin juga mempercepat sekresi aldosteron dari korteks adrenal. Angiotensin adalah hormon yang juga merupakan dipsogen yang kuat (Singla, 2020).

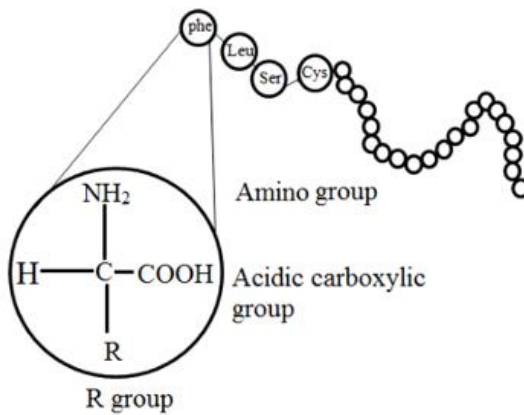
8.3 Sifat Enzim

Sifat-sifat enzim sebagai molekul protein kompleks yang sering disebut sebagai biokatalis yaitu spesifik baik dalam reaksi yang dikatalisisnya maupun dalam pemilihan reaktannya, yang dikenal sebagai substrat. Enzim biasanya mengkatalisis satu reaksi kimia atau serangkaian reaksi yang saling berkaitan. Reaksi sampingan yang mengakibatkan pembentukan produk sampingan yang sia-sia jarang terjadi pada reaksi yang dikatalisis oleh enzim, dibandingkan dengan reaksi yang tidak dikatalisis. Enzim juga dapat didefinisikan sebagai katalis koloid dan organik yang larut yang diproduksi oleh sel hidup, tetapi mampu bekerja secara independen dari sel. Untuk aksi katalitik, enzim dalam jumlah kecil sudah cukup, di mana jumlah enzim ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan substratnya. Konsentrasi keseluruhan substrat yang ditransformasikan per massa enzim seringkali sangat besar. Tanpa kecuali, semua enzim bersifat protein dan menunjukkan semua sifat protein. Perlakuan enzim dengan suhu ekstrem atau pH ekstrem, atau dengan perlakuan dengan agen denaturasi

lainnya, mengakibatkan hilangnya aktivitas katalitik secara total. Konfigurasi struktural seperti struktur primer, sekunder, tersier, dan kuarterner protein enzim sangat penting untuk aktivitas katalitiknya. Tingkat aktivitas katalitik terutama bergantung pada integritas struktur enzim sebagai protein. Menurut laporan, enzim memiliki berat molekul berkisar antara sekitar 12.000 hingga lebih dari 1 juta Da. Sejumlah enzim hanya terdiri dari polipeptida dan tidak mengandung gugus kimia selain residu asam amino, misalnya ribonuklease pankreas. Banyak enzim memerlukan enzim dengan berat molekul rendah, stabil terhadap panas, dan spesifik (Desti, et al., 2018).

8.4 Struktur Enzim

Enzim selalu bertindak sebagai katalis dan jumlahnya sedikit dibandingkan dengan substratnya. Ciri-ciri struktural enzim ditunjukkan pada Gambar 8.2. Berbeda dengan katalis kimia tradisional, misalnya ion hidrogen, logam berat atau oksida logam, yang paling efektif dalam pelarut organik, pada suhu yang sangat tinggi atau pada nilai pH yang ekstrem, enzim beroperasi paling efisien dalam kondisi yang sangat ringan (Desti, et al., 2018).



Primary protein structure is sequence of a chain of amino acids

Gambar 8. 5. Struktural Enzim (Desti, et al., 2018)

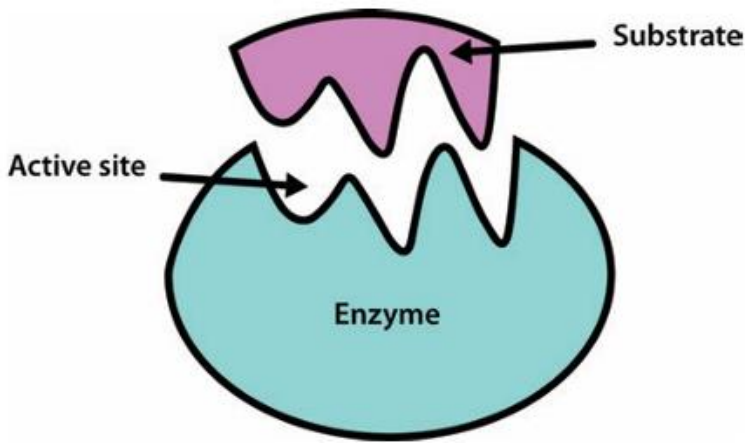
Spesifisitas enzim ditentukan oleh situs aktif, domain tertentu dari peptida molekul. Ada dua teori utama yang berusaha menjelaskan interaksi enzim-substrat. Satu yang diusulkan oleh Fischer pada awal abad ke-20 menyatakan bahwa substrat Interaksi enzim akan menyerupai mekanisme kunci-gembok, dimana kuncinya (substrat) cocok ke dalam kunci (situs aktif), karena dua kondisi terpenuhi: substrat dan situs aktif memiliki struktur yang saling melengkapi dan polaritas serta ukuran yang kompatibel. Kemudian satunya diusulkan oleh Koshland pada tahun 1960, yang menyatakan bahwa substrat yang dekat dengan molekul enzim menginduksi beberapa modifikasi struktural yang mendukung kecocokan enzim-substrat (Vitolo, 2020).

Aktivitas katalitik enzim yang sangat besar mungkin paling baik diungkapkan dengan suatu konstanta yang secara beragam disebut sebagai laju pergantian, frekuensi

pergantian, atau angka pergantian. Konstanta ini menunjukkan jumlah molekul substrat yang dapat diubah menjadi produk oleh satu molekul enzim per satuan waktu (biasanya per menit atau per detik). Misalnya, satu molekul karbonik anhidrase dapat mengkatalisis konversi lebih dari setengah juta molekul substratnya, karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O), menjadi produk, bikarbonat (HCO_3). Beberapa enzim menunjukkan spesifisitas kelompok. Misalnya, alkali fosfatase (enzim yang umum ditemui dalam sesi laboratorium tahun pertama tentang kinetika enzim) dapat menghilangkan gugus fosfat dari berbagai substrat (Robinson, 2015).

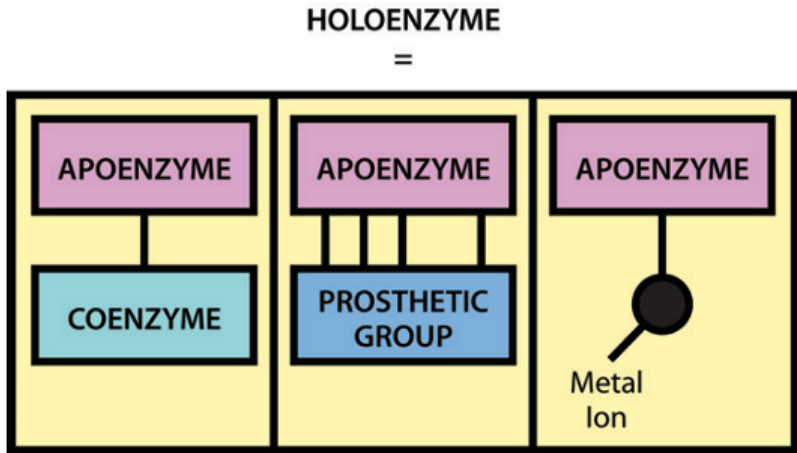
8.5 Struktur Enzim dan Pengikatan Substrat

Enzim berbasis asam amino adalah protein globular yang ukurannya berkisar antara kurang dari 100 hingga lebih dari 2.000 residu asam amino. Asam amino ini dapat disusun sebagai satu atau lebih rantai polipeptida yang dilipat dan dibengkokkan untuk membentuk struktur tiga dimensi tertentu, yang mencakup area kecil yang dikenal sebagai situs aktif. tempat substrat benar-benar terikat. Situs aktif mungkin hanya melibatkan sejumlah kecil (kurang dari 10) asam amino penyusunnya (Robinson, 2015).



Gambar 8. 6. Representasi Pengikatan Substrat Ke Situs Aktif Molekul Enzim (Robinson, 2015)

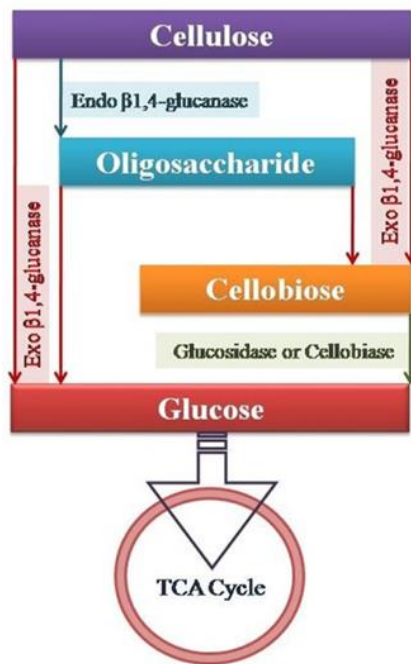
Meskipun banyak enzim umumnya terdiri dari protein, namun banyak juga enzim yang mengandung komponen non-enzim yang disebut sebagai kofaktor. Kofaktor dapat berupa molekul organik lain, yang dalam hal ini disebut koenzim, atau dapat berupa molekul anorganik, biasanya ion logam seperti besi, mangan, kobalt, tembaga, atau seng. Koenzim yang mengikat erat dan permanen pada protein umumnya disebut sebagai gugus prostetik enzim. Ketika suatu enzim memerlukan suatu kofaktor untuk aktivitasnya, komponen protein yang tidak aktif secara umum disebut sebagai apoenzim, dan apoenzim ditambah kofaktor (yaitu enzim yang aktif) disebut holoenzim (Robinson, 2015).



Gambar 8. 7. Komponen Haloenzim (Robinson, 2015)

8.6 Biodegradasi Enzim

Enzim memiliki peranan dalam degradasi selulosa. Selulosa merupakan polimer organik yang paling melimpah di dunia dan merupakan komponen utama biomassa tanaman.



Gambar 8. 8. Hidrolisis Selulosa Oleh Glukanase dan Glukosidase (Chatterjee, et al., 2016)

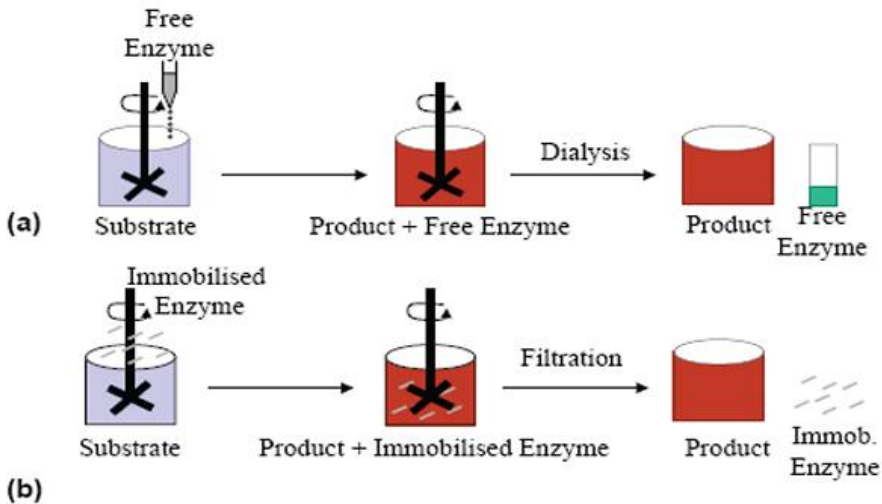
Selulosa adalah polimer hidrofilik yang tidak berasa, tidak berbau, tidak larut dalam air (dan sebagian besar pelarut organik), yang juga dapat terurai secara hayati. Lisis atau degradasi selulosa secara biologis (selulolisis) merupakan proses sinergis yang dikontrol secara enzimatik. Selulase yang berbeda memiliki strategi yang berbeda untuk bekerja pada substrat. Dalam beberapa kasus, domain pengikat karbohidrat hadir selain domain katalitik. Untuk mendegradasi selulosa, mikroorganisme anaerobik biasanya membentuk selulosom (kompleks multienzim) yang biasanya memiliki perancah untuk mengikat seluruh

kompleks enzim ke substrat. Perhatikan Gambar 8 (Chatterjee, et al., 2016).

8.7 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Aktivitas Enzim

Enzim bekerja pada reaktan yang disebut substrat. Enzim menempel pada substrat dan kemudian enzim mengubah substrat menjadi produk, sementara enzim tetap tidak akan mengalami perubahan. Aktivitas enzim dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, suhu, dan pH. Fleksibilitas enzim dapat dipengaruhi oleh pengaruh suhu pada ikatan kovalen dan hidrogen. Ikatan kimia membentuk bentuk protein dan fungsi protein terkait dengan bentuknya dan karena itu aktivitasnya akan menurun atau memengaruhi enzim yang mengkatalisis suatu reaksi. Ketika suhu tinggi, laju aktivitas enzim tinggi karena substrat bertabrakan dengan situs aktif pada enzim lebih sering saat molekul bergerak cepat. Kemudian pH juga memengaruhi ikatan ionik dan hidrogen yang penting bagi aktivitas kerja enzim (Eed, 2013).

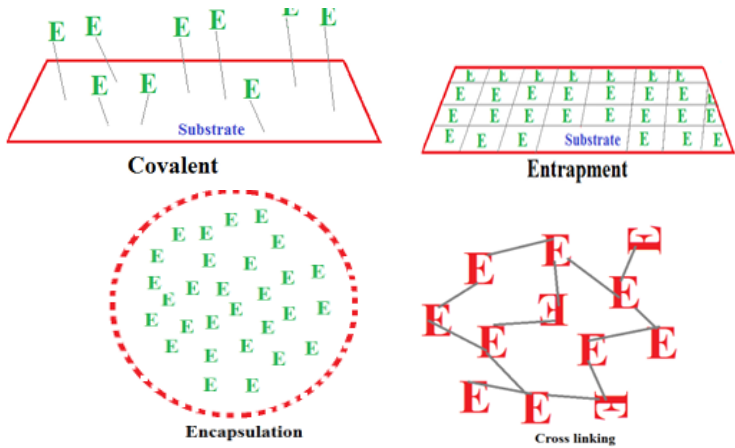
8.8 Imobilisasi Enzim



Gambar 8. 9. Reaksi Enzim Bebas dan Enzim Terimmobilisasi (Mohamed, et al, 2019)

Imobilisasi enzim adalah teknik yang dirancang khusus untuk membatasi kebebasan bergerak suatu enzim. Imobilisasi enzim merupakan praktik umum, terutama untuk meminimalkan biaya enzim pada saat digunakan sebagai salah satu katalis dalam industri dengan memungkinkan penggunaan kembali enzim berkali-kali dan juga meminimalkan biaya operasi karena teknik imobilisasi dapat mengubah perilaku enzim, sehingga mengurangi biaya enzim dan produk secara signifikan. Banyak teknik yang telah digunakan sebelumnya untuk imobilisasi enzim, seperti pengebakan, penyerapan, pengikatan kovalen, enkapsulasi, dan ikatan silang (Gambar 10). Bentuk enzim yang diimobilisasi lebih disukai daripada bentuk enzim bebas karena menawarkan kemungkinan pemrosesan aliran

dan pemulihan enzim yang diimmobilisasi dengan mudah dengan biaya yang sedikit (Mohamed, et al., 2019).



Gambar 8. 10. Metode Immobilisasi Enzim (Mohamed, et al., 2019)

DAFTAR PUSTAKA

- Casas-Godoy, L., Gasteazoro, F. & Duquesne, S., 2018. Lipase. *Nature*, p. 1835.
- Chatterjee, S. et al., 2016. Cellulase Enzyme based Biodegradation of Cellulosic Materials: An Overview. *South Asian J Exp Biol*, 5(6), pp. 271-282.
- Desti, Fitmawati & Yulis, P. A. R., 2018. *Introduction to enzymes and their applications*. Saurabh Bhatia, IOP .
- Dhillon, A., Sharma, K., Rajulapati, V. & Goyal, A., 2018. Proteolytic EnzymeS. In: V. Rajulapati, ed. *Current Developments In Biotechnology And Bioengineering*. India: Researchgate Publication, p. 151.
- Eed, J., 2013. Factors Affecting Enzyme Activity. *College of DuPage* , Volume 10, p. 19.
- Kapoor, N., 2020. Enzymes: Their Activity and Role in Metabolism. *Biomedical*, 24(4), pp. 2574-1241.
- Mohamed, H. E., Tameer, T. M. & Ahmed, O. M., 2019. Methods of Enzyme Immobilization. *International Journal of Current Pharmaceutical Review and Research*, 7(6), pp. 385-392.
- Patadiya, N; Panchal, N; Vaghela, V, 2021. A Review On Enzyme Inhibitors. *International Research Journal of Pharmacy*, 12(6), pp. 2230-8407.
- Robinson, P. K., 2015. Enzymes: Principles and Biotechnological Applications. *Essays Biochem*, Volume 59, pp. 1-41.

- Saini, R., Saini, H. S. & A, D., 2017. Amylases: Characteristics and industrial applications. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(4), pp. 1865-1871.
- Singla, C., 2020. *Pharmaceutical Sciences*. 3rd ed. New Delhi: AkiNik Publications.
- Vitolo, M., 2020. Brief Review On Enzyme Activity. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 9(2), pp. 2277-7105.

BIODATA PENULIS



Ali Makmur, S.Pt., M.Si

Dosen Fakultas Kedokteran Hewan Universitas Syiah Kuala

Penulis lahir di Rikit Gaib, Kabupaten Gayo Lues, Provinsi Aceh, pada 29 April 1992. Pendidikan dasar dan menengah diselesaikan di SD Negeri 1 Seneren, SMP Negeri 1 Rikit Gaib, dan SMK Negeri 1 Gayo Lues. Pada tahun 2010, penulis melanjutkan studi ke Program Diploma III Budidaya Peternakan dan kemudian ke jenjang Sarjana (S1) di Fakultas Pertanian, Universitas Syiah Kuala.

Penulis pernah bekerja sebagai karyawan pembantu di Laboratorium Bahan Pakan dan Nutrisi Ternak (2015–2017), serta di PT Pakan Ternak Matahari Sakti di Provinsi Riau (2018–2020). Pada tahun 2016, penulis menyelesaikan pendidikan Magister (S2) di Program Kesehatan Masyarakat Veteriner, Fakultas Kedokteran Hewan, Universitas Syiah Kuala.

Sejak 2020, penulis mengabdikan sebagai dosen di PSDKU Gayo Lues, dan pada tahun 2023 diangkat sebagai Aparatur Sipil Negara (ASN) di Fakultas Kedokteran Hewan, Universitas Syiah Kuala. Penulis telah menerbitkan beberapa buku, antara lain: Ternak Potong (Teori dan Praktik), Manajemen Kesehatan Ternak, Parameter Laboran Lingkungan, dan Sistematika Tumbuhan.

BIODATA PENULIS**Risky Nurul Fadlila RN, S.Si., M.Si**

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

Penulis lahir di Makassar tanggal 26 Juni 1989. Penulis adalah dosen tetap pada program studi DIV Teknologi Laboratorium Medis Fakultas Teknologi Kesehatan, Universitas Megarezky. Menyelesaikan Pendidikan S1 pada Jurusan Kimia di Universitas Islam Negri (UIN) Alauddin Makassar dan melanjutkan S2 pada Jurusan Kimia di Universitas Hasanuddin. Penulis menekuni bidang kimia dan saat ini aktif mengajar dan membimbing mahasiswa dalam pengajaran dan penelitian.

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**Elva Stiawan, M.Si.**

Dosen Program Studi Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
Universitas Pertahanan RI

Penulis lahir di Sukoharjo pada tahun 1990. Penulis menyelesaikan pendidikan pada Program Studi Pendidikan Kimia, FPMIPA, Universitas Pendidikan Indonesia pada tahun 2014 serta Magister Kimia, Institut Teknologi Bandung tahun 2016. Setelah beberapa tahun menjadi praktisi di industri biofarmasi, pada 2022 penulis mulai berdinasi sebagai dosen di Program Studi Kimia, Fakultas MIPA Militer, Universitas Pertahanan RI.

BIODATA PENULIS



Ira Oktavia, S.Si., M.Si

Dosen Fakultas Farmasi

Institut Ilmu Kesehatan Bhakti Wiyata Kediri

Penulis memiliki nama lengkap Ira Oktavia merupakan asal Kediri – Jawa Timur. Pada tahun 2010 penulis menempuh pendidikan S1 di Universitas Negeri Malang (UM) dengan program studi Kimia dan berhasil menyelesaikannya pada tahun 2014 dengan judul skripsi “Identification Bioactive Compunds in Ethanol Extract *Annona squamosa* L. as Xanthine Oxidase Inhibitors”. Selanjutnya pada tahun 2015 penulis melanjutkan pendidikan S2 program studi kimia dengan kelompok keahlian biokimia di Institut Teknologi Bandung (ITB) dan berhasil mendapatkan gelar pada tahun 2017 dengan judul tesis “Characterization of Levan Produced by Halophilic Bacteria *Bacillus licheniformis* BK1 and Its Application for Protein Carrier Nanoparticles”.

Penulis memulai karirnya sebagai dosen pada tahun 2018 di salah satu perguruan tinggi swasta yang ada di Kediri, Jawa Timur yaitu Institut Ilmu Kesehatan Bhakti Wiyata Kediri (IIK Bhakta Kediri). Saat ini penulis aktif mengajar di Fakultas Farmasi. Pada tahun 2019 penulis dipercaya sebagai Kepala Laboratorium Kimia Analis Makanan dan Minuman, berikutnya pada tahun 2023 dipercaya sebagai Co Deputy Bidang Publikasi di Deputy Penelitian dan *Academic Social Responsibility* (DPASR) serta pada tahun 2025 dipercaya sebagai Wakil Pusat Pengembang Penelitian di Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM). Salah satu artikel penulis pernah dipublikasikan dalam jurnal internasional terindeks scopus Q3 pada tahun 2021 yaitu Indonesian Journal Chemistry (IJC) yang diterbitkan oleh Universitas Gadjah Mada dengan judul “Levan Produced by the Halophilic Bacterium *Bacillus licheniformis* BK1 as a Nanoparticle for Protein Immobilization”. Selanjutnya “Bioteknologi Kesehatan” merupakan *book chapter* hasil karya penulis yang pertama telah berhasil diterbitkan pada tahun 2024 serta *book chapter* yang kedua berjudul “Farmakognosi” diterbitkan pada tahun 2025.

BIODATA PENULIS



Dr. Waode Rustiah, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Teknologi Laboratorium Medis
Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar

Penulis lahir di Pangkep pada tanggal 30 Januari 1979. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis, Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 tahun 2002 pada Jurusan Kimia di Universitas Hasanuddin, dan melanjutkan S2 pada tahun 2005 di Institut Teknologi Bandung (ITB) pada bidang konsentrasi Kimia Analitik. Pada tahun 2019 telah menyelesaikan pendidikan S3 pada Program Doktor Ilmu Kimia di Universitas Hasanuddin.

BIODATA PENULIS

Amalyah Febryanti, S.Si., M.Si.

Dosen Jurusan Kimia

Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri

Alauddin Makassar

Amalyah Febryanti, S.Si., M.Si. adalah dosen Bidang Biokimia di Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Alauddin Makassar. Beliau lahir di Pangkajene, Sidrap, Sulawesi Selatan, 19 Februari 1993. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada 2010-2015 di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Hasanuddin dan S2 pada 2016-2018 di Jurusan Kimia FMIPA Institut Pertanian Bogor. Penulis aktif mengajar di UIN Alauddin Makassar sejak 2019-Sekarang. Penulis telah melakukan penelitian dalam bidang biokimia dan menerbitkannya dalam bentuk laporan penelitian yang mendapatkan hibah dari perguruan tinggi tersebut, laporan penelitian ini dipublikasikan pada 2021, laporan penelitian ini telah terdaftar sebagai HaKI pada tahun yang sama. Selain laporan penelitian, penulis juga pernah menjadi pembicara pada seminar internasional secara online yang diselenggarakan oleh LIPI pada 2020 dan telah terbit dalam bentuk prosiding internasional pada 2021. Tidak hanya itu, berbagai jurnal yang penulis telah terbitkan di jurnal terakreditasi SINTA maupun jurnal internasional. Penulis tidak hanya aktif mengajar dan meneliti, tetapi juga melaksanakan pengabdian kepada masyarakat sesuai berdasarkan hasil riset yang telah dilakukan. Selain itu,

penulis juga aktif mengikuti berbagai pelatihan pengembangan kompetensi. Penulis merupakan anggota Himpunan Kimiawan Indonesia (HKI) Pusat dan termasuk pengurus HKI Cabang Sulsel. Tidak hanya itu, penulis juga terlibat sebagai pengurus Alauddin Halal Center, divisi Pendamping Proses Produk Halal (PPH) pada periode 2022-2024, serta menjadi auditor Lembaga Penjaminan Halal (LPH) UIN Alauddin Makassar dari 2024-sekarang.

BIODATA PENULIS**Dara Juliana, S.Pd., M.Si.**

Dosen Program Studi Kedokteran UPN Veteran Jakarta.

Penulis lahir di Kerinci, pada tanggal 05 Juli 1999. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi S1 Kedokteran UPN Veteran Jakarta. Menyelesaikan pendidikan S1 tahun 2020 pada Jurusan Pendidikan Kimia di Universitas Jambi, dan melanjutkan S2 pada tahun 2020 di Institut Pertanian Bogor (IPB) pada bidang konsentrasi Biokimia.