Prof. Dr. Didimus Tanah Boleng, M.Kes.
Editor: Dr. Siti Ramdiah, M.Pd.

Pengantar
Biokimia

(Untuk Mahasiswa Program Sarjana Pendidikan Biologi)

Mulawarman University PRESS

PENGANTAR BIOKIMIA

(Untuk Mahasiswa Program Sarjana Pendidikan Biologi)

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

PENGANTAR BIOKIMIA

(Untuk Mahasiswa Program Sarjana Pendidikan Biologi)

Prof. Dr. Didimus Tanah Boleng, M.Kes.

Editor :
Dr. Siti Ramdiah, M.Pd.

Mulawarman University PRESS

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

PENGANTAR BIOKIMIA
(UNTUK MAHASISWA PROGRAM SARJANA PENDIDIKAN BIOLOGI)

Penulis : Didimus Tanah Boleng
Desain Cover : Ali Hasan Zein
Sumber : Vladimka production (shutterstock), pressfoto (freepik)
Tata Letak : G.D. Ayu
Proofreader : A. Timor Eldian

ISBN : 978-623-5262-42-0
Copyright © 2022. Mulawarman University Press
All Right Reserved

Cetakan Pertama : Desember 2022

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

Isi di luar tanggung jawab percetakan.

Didimus Tanah Boleng. 2022. *Pengantar Biokimia (Untuk Mahasiswa Program Sarjana Pendidikan Biologi)*. Mulawarman University Press, Samarinda.

Penerbit:
Mulawarman University PRESS
Member of IKAPI & APPTI
Gedung LP2M Universitas Mulawarman
Jl. Krayan, Kampus Gunung Kelua
Samarinda – Kalimantan Timur – Indonesia 75123
Telp/Faks: (0541) 747432, E-mail: mup@lppm.unmul.ac.id

Dicetak oleh:
PENERBIT DEEPUBLISH
(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)
Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman
Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581
Telp/Faks: (0274) 4533427, E-mail: cs@deepublish.co.id
Website: www.deepublish.co.id / www.penerbitdeepublish.com

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

KATA PENGANTAR

Kami mengucapkan syukur kepada Tuhan Yang Mahakuasa, atas berkat-Nya yang berlimpah dalam proses penyusunan buku ***Pengantar Biokimia (Untuk Mahasiswa Program Sarjana Pendidikan Biologi)***. Buku ini disusun untuk memenuhi kebutuhan materi ajar bagi mahasiswa Program Studi Sarjana Pendidikan Biologi.

Isi buku mencakup: Pendahuluan, Struktur Sel dan Fungsinya, Senyawa Organik, Enzimologi, Organisasi Biologis dan Produksi ATP, dan Metabolisme. Masing-masing materi disesuaikan dengan Rencana Pembelajaran Semester (RPS) mata kuliah Biokimia di Program Sarjana Pendidikan Biologi. Oleh karena itu, diharapkan dosen dan mahasiswa dapat memiliki buku ini dan menggunakannya dalam pembelajaran mata kuliah Biokimia.

Buku ini lebih diutamakan untuk digunakan oleh dosen dan mahasiswa di perguruan tinggi. Namun demikian, siswa di sekolah menengah atas dapat juga menggunakan buku ini, sejauh sesuai dengan tujuan pembelajaran dan materi yang dibahas. Oleh karena itu, untuk siswa, guru perlu mendampinginya dalam menggunakan buku.

Penulis memperoleh masukan dari berbagai pihak dalam proses penyusun buku. Oleh karena itu, dalam kesempatan yang baik ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak, terutama, untuk Katharina Devi Permata Tanahboleng, S,Pd., Nadya Arta; yang telah membantu dalam proses pengetikan. Semoga seluruh kebaikannya, memperoleh berkat yang melimpah dari Tuhan. Amin. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada ibu Dr. Siti Ramdiah, M.Pd., atas kesediaannya sebagai editor buku.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

Isi buku, masih belum sempurna seperti yang diharapkan oleh para pembaca, Oleh karena ini, dalam kesempatan yang baik ini, penulis memohon maaf. Selain itu, penulis juga memohon kritik, saran, dari para pembaca, agar isi buku akan menjadi semakin sempurna di masa yang akan datang. Akhirnya, penulis berharap agar, buku ini dapat diterima dengan baik, terutama oleh dosen dan mahasiswa, terutama di Program Studi Pendidikan Biologi.

Samarinda, November 2022
Penulis,

Didimus Tanah Boleng

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR TABEL ix
DAFTAR GAMBAR x

BAB I PENDAHULUAN 1
A. Tujuan Pembahasan 1
B. Pengertian Biokimia 1
C. Tujuan Pembahasan Biokimia 3
D. Manfaat Pembahasan Biokimia 4
E. Capaian Pembelajaran Biokimia 4
F. Deskripsi Mata Kuliah Biokimia 6
G. Ringkasan 6
H. Evaluasi 6

BAB II STRUKTUR SEL DAN FUNGSINYA 7
A. Tujuan Pembahasan 7
B. Sel Sebagai Tempat Reaksi Biokimiawi Tubuh Makhluk Hidup 7
C. Organel-Organel Sel dan Fungsinya 8
D. Ringkasan 12
E. Evalusi 13

BAB III SENYAWA ORGANIK 14
A. Tujuan Pembahasan 14
B. Pengertian Senyawa Organik 14
C. Macam-Macam Senyawa Organik 14
D. Ringkasan 36
E. Evaluasi 36

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

BAB IV ENZIM 37
A. Tujuan Pembahasan 37
B. Pengertian Enzim 37
C. Sifat-Sifat Enzim 38
D. Klasifikasi Enzim 40
E. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Aktivitas Enzim 41
F. Koenzim dan Kofaktor 46
G. Ringkasan 47
H. Evaluasi 47

BAB V OKSIDASI BIOLOGIS DAN PRODUKSI ATP 48
A. Tujuan Pembahasan 48
B. Reaksi Reduksi dan Oksidasi 48
C. Produksi Energi 50
D. Ringkasan 51
E. Evaluasi 51

BAB VI METABOLISME 52
A. Tujuan Pembahasan 52
B. Pengertian Metabolisme 52
C. Metabolisme Karbohidrat 53
D. Metabolisme Protein 65
E. Metabolisme Lemak 73
F. Kelainan-Kelainan dalam Metabolisme 77
G. Gangguan Metabolisme Protein 80
H. Gangguan Metabolisme Lemak 81
I. Ringkasan 82
J. Evaluasi 82

DAFTAR RUJUKAN 83

GLOSARIUM 85

INDEKS 87

TENTANG PENULIS 89

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seijin Mulawarman University Press

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Komponen utama penyusun biomolekul 12
Tabel 2. Variasi jumlah karbon pada monosakarida dan bentuk aldo dan keto 20
Tabel 3. Perbedaan *DNA* dengan *RNA* 35
Tabel 4. Asam-asam amino esensial dan nonesensial 68

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Struktur halus sel hewan 10
Gambar 2. Struktur halus sel tumbuhan..... 11
Gambar 3. Macam-macam gula monosakarida triosa, tetraosa, pentose, dan hexose 16
Gambar 4. Gula aldose (a) dan gula ketose (b)..... 17
Gambar 5. Struktur gula D-gliseraldehid (a) dan D-fruktose (b) 18
Gambar 6. (a) Piran, (b) Furan 19
Gambar 7. Struktur cincin pada D-glukosa..... 19
Gambar 7. Struktur bangun gula disakarida 21
Gambar 8. Struktur bangun polisakarida 22
Gambar 9. Struktur primer protein 24
Gambar 10. Struktur sekunder protein..... 25
Gambar 11. Struktur tersier protein 25
Gambar 12. Struktur kuarterner protein..... 26
Gambar 13. Mioglobin yang mendistribusikan oksigen ke otot 28
Gambar 14. Struktur bangun asam-asam amino 30
Gambar 15. Struktur umum protein..... 30
Gambar 16. Skema struktur *DNA*..... 33
Gambar 17. (a) Replikasi konservatif, (b) konservatif semikonservatif..... 34
Gambar 18. Model *lack and key*..... 39
Gambar 19. Model *Induced Fit* 40
Gambar 20. Pengaruh pH terhadap aktivitas enzim..... 41
Gambar 21. Pengaruh temperatur/suhu terhadap aktivitas enzim 43

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

Gambar 22. Pengaruh koonsentrasi enzim terhadap aktivitas enzim 44
Gambar 23. Pengaruh konsentrasi substrat terhadap aktivitas enzim 45
Gambar 24. (a): Hambatan kompetitif, (b) Hambatan nonkompetetif 46
Gambar 25. Sel elektrokimia 50
Gambar 26. Perubahan glikosa menjadi glukosa 6-phosphat 55
Gambar 27. Perubahan glukosa 6-phospat menjadi fruktosa 6-phospat 55
Gambar 28. Fruktosa-6-P + ATP → fruktosa-1,6-bisP + ADP 56
Gambar 29. Perubahan fruktosa 1,6-biphospat menjadi dihridroksiasetonfosfat 57
Gambar 30. Isomerasi triosafosfat 57
Gambar 31 Proses oksidasi gliserldehid-3-fosfat 58
Gambar 32. Struktur bangun senyawa yang mengandung energi tinggi 59
Gambar 33. Proses transfer fosfat untuk membentuk ATP 60
Gambar 34. Proses perpindahan gugus fosfat 60
Gambar 35. Proses pembentukan senyawa berenergi tinggi kedua 61
Gambar 36. Proses pembentukan piruvat yang melepaskan ATP 62
Gambar 37. Lintasan Siklus Krebs 63
Gambar 38. Nasib rangka karbon dari asam-asam manio 67
Gambar 39. Proses perubahan glutamat menjadi α-ketoglutarat 70
Gambar 40. Rumusa Bangun Urea 71
Gambar 41. Siklus Urea 72
Gambar 42. Tahapan-tahapan β-oksidasi 75
Gambar 43. Tahapan α-oksidasi 76

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

BAB I

PENDAHULUAN

A. Tujuan Pembahasan

Melalui menelaah isi BAB ini, diharapkan mahasiswa dapat:

1. Menjelaskan pengertian biokimia dengan benar.
2. Menjelaskan karakteristik sel dengan benar.

B. Pengertian Biokimia

Biokimia berasal dari bahasa Yunani, *bios* = hidup, dan *chemis* = kimia. Biokimia merupakan kajian (ilmu) yang menggabungkan ilmu kimia dengan biologi. Kajian ini melibatkan reaksi-reaksi kimia yang berlangsung di dalam sel-sel yang masih hidup, baik pada sel prokariotik maupun pada sel eukariotik. Oleh karena itu, biokimia tidak mengkaji reaksi-reaksi kimia yang berlangsung di luar sel atau di dalam sel yang sudah tidak hidup lagi.

Pemahaman ilmu biokimia dengan benar, membantu mahasiswa, dosen, dan masyarakat umum untuk memahami kebutuhan tubuh akan bahan-bahan kimia yang dibutuhkan sel hidup. Oleh karena itu, mahasiswa diharapkan dapat memahami konsep-konsep biokimia dengan benar melalui proses belajar baik di kelas maupun di laboratorium. Dengan demikian, mahasiswa dapat menerapkan pemahaman konsep-konsep biokimia itu dalam kehidupannya sehari-hari.

Terkait dengan proses biokimia, merupakan reaksi-reaksi kimia yang terjadi di dalam sel yang masih hidup. Sel-sel yang masih hidup menunjukkan karakteristik-karakteristik tertentu. Terkait dengan karakteristik-karakteristik sel, Azhar (2016) menjelaskan bahwa karakteristik sel hidup (makhluk hidup) adalah:

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

1. Makhluk hidup dapat berkembang biak (bereproduksi).
2. Makhluk hidup tersusun atas sel. Makhluk hidup yang paling sederhana terdiri atas satu sel, sedangkan yang lebih kompleks tersusun atas banyak sel. Setiap isi sel dilindungi oleh membran sitoplasma.
3. Makhluk hidup mengalami pertumbuhan dan perkembangan. Pertumbuhan menyebabkan ukuran sel menjadi semakin besar. Demikian juga volume sel nya pun semakin bertambah, dan jumlah sel semakin bertambah. Pertambahan tinggi atau pertambahan berat suatu organisme merupakan tanda makhluk hidup mengalami perkembangan. Perkembangan menunjukkan perubahan makhluk hidup menuju kedewasaan. Perkembangan meliputi perubahan sel menjadi bentuk yang berbeda sehingga dapat menjalankan fungsi tertentu.
4. Makhluk hidup melakukan metabolisme. Proses metabolisme mencakup proses metabolisme (penguraian senyawa organik menjadi unsur-unsur yang lebih kecil; dan dalam proses ini membebaskan energi yang terpaket dalam Adenosin Tri Phosphat yang disingkat dengan ATP). Selain itu metabolisme mencakup juga proses anabolisme (proses penyusunan senyawa-senyawa organik dari unsur-unsur anorganik; dan dalam proses ini membutuhkan ATP).
5. Makhluk hidup mempunyai kemampuan beradaptasi dengan lingkungan. Kemampuan adaptasi membuat makhluk hidup dapat bertahan hidup meskipun dalam keadaan lingkungan yang senantiasa berubah-ubah.

Proses pemahaman materi-materi biokimia, tidak hanya melalui perkuliahan di kelas, namun diperlukan penguasaan keterampilan melaksanakan praktikum terkait tema-tema biokimia di laboratorium. Oleh karena itu, mahasiswa diharapkan selain menguasai teori-teori biokimia, juga terampil dalam melaksanakan tema-tema praktikum di laboratorium. Oleh karena itu, teori-teori biokimia yang sudah diperoleh di kelas, perlu dibuktikan melalui kegiatan-kegiatan praktikum yang dilaksanakan di laboratorium.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

Namun demikian, terkait dengan penguasaan materi-materi biokimia dalam pembelajaran di kelas, mahasiswa masih belum maksimal mengikuti proses pembelajaran, dan menguasai materi-materi yang dibahas. Oleh karena itu, dalam evaluasi pembelajaran, masih terdapat mahasiswa yang belum maksimal menguasai materi-materi biokimia yang disajikan dan diharapkan. Mahasiswa masih belum menguasai materi-materi biokimia secara maksimal. Belum ada bahan ajar biokimia untuk membantu mahasiswa memahami materi-materi biokimia yang direncanakan untuk disajikan dalam proses pembelajaran untuk satu semester.

Penyusunan bahan ajar biokimia dapat membantu mahasiswa untuk memahami materi-materi biokimia yang direncanakan (sesuai dengan Rencana Pembelajaran Semester/RPS untuk mata kuliah biokimia). Mahasiswa dapat memiliki bahan ajar biokimia sesuai RPS, sehingga selain melalui pembelajaran di kelas, mahasiswa juga dapat membaca untuk mendalami materi-materi biokimia di luar jam perkuliahan biokimia.

Bahan ajar biokimia memuat seluruh materi biokimia yang direncanakan di dalam RPS mata kuliah biokimia. Dengan demikian, setiap kali tatap muka dalam pembelajaran dengan materi biokimia, mahasiswa dapat memahami dengan lebih jelas materi yang dibahas. Materi-materi biokimia yang disajikan di dalam bahan ajar biokimia, dibahas sesuai tujuan pembelajaran yang tersaji di dalam RPS; yang diharapkan dapat membantu mahasiswa memahami materi-materi dalam setiap perkuliahan dengan materi biokimia.

C. Tujuan Pembahasan Biokimia

1. Mahasiswa mampu melaksanakan pembelajaran dengan materi biokimia melalui proses interaksi dengan temannya serta dosen sehingga terbentuk sikap positif pada dirinya.
2. Mahasiswa mampu melaksanakan tugas-tugas baik di dalam perkuliahan maupun praktikum di laboratorium, agar terbentuk keterampilan yang diharapkan dalam pembelajaran dengan materi biokimia.
3. Mahasiswa mampu menjelaskan: struktur sel dan fungsinya; karbohidrat; Protein; lemak; asam nukleat; enzim; oksidasi biologis

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

dan produksi ATP; metabolisme: karbohidrat, protein, dan lemak; kelainan-kelainan dalam metabolisme.

D. Manfaat Pembahasan Biokimia

1. Membantu membentuk sikap positif pada diri mahasiswa terutama dalam hal toleransi, dan bertanggung jawab dalam melaksanakan tugas-tugas terkait dengan mata kuliah biokimia
2. Membantu membentuk keterampilan pada diri mahasiswa melalui penyelesaian tugas-tugas perkuliahan dan praktikum biokimia di laboratorium.
3. Membantu mahasiswa dalam menguasai teori, konsep sesuai yang terkait dengan materi-materi biokimia yang direncanakan untuk dibahas dalam perkuliahan

E. Capaian Pembelajaran Biokimia

1. Sikap

a. Memiliki sikap toleransi, serta merasa setara dengan teman lain yang beragam latar belakang budaya, agama, etnis, dan tingkat ekonomi, melalui proses pembelajaran inovatif yang sesuai dengan materi biokimia.
b. Memiliki sikap tanggung jawab dalam mengemban tugasnya melalui proses pembelajaran yang memberikan tugas-tugas kepadanya terkait dengan biokimia.

2. Keterampilan Umum

a. Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, inovatif, bermutu, dan terukur dalam melakukan pekerjaan yang spesifik di bidang keahliannya serta sesuai dengan standar kompetensi kerja yang bersangkutan.
b. Mampu mengambil keputusan secara tepat berdasarkan prosedur baku, spesifikasi desain, persyaratan keselamatan dan keamanan kerja dalam melakukan supervise dan evaluasi pada pekerjaannya.
c. Mampu bertanggungjawab atas pencapaian hasil kerja kelompok dan melakukan supervise dan evaluasi terhadap penyelesaian

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seijin Mulawarman University Press

pekerjaan yang ditugaskan kepada pekerja yang berada di bawah tanggung jawabnya.

3. Keterampilan Khusus

a. Mampu mengambil keputusan dalam pembelajaran berdasarkan data yang relevan di sekolah yang diperoleh dari lingkungan hutan hujan tropis, terkait dengan materi biokimia.
b. Menguasai keterampilan pengelolaan laboratorium di sekolah berbasis pemanfaatan perkembangan IPTEK yang terkait dengan pengadaan, penyimpanan, transportasi sampel untuk pemeriksaan biokimia.
c. Mampu merancang penelitian tentang biokimia, terutama terkait dengan sampel yang diperoleh dari lingkungan hutan hujan tropis, serta implementasinya dalam pembelajaran di sekolah; membuat laporan hasil penelitian; serta mampu melakukan seminar pada pertemuan ilmiah dan publikasi pada jurnal ilmiah terkait dengan hasil temuannya.

4. Pengetahuan

a. Menguasai teori, konsep, prinsip, dan prosedur terkait dengan biokimia, terutama terkait dengan objek kajian yang diperoleh dari lingkungan hutan tropis lembap (*Tropical Rain Forest*).
b. Menguasai prinsip pembelajaran di sekolah dengan materi biokimia, terutama terkait objek kajian yang diperoleh dari lingkungan hutan hujan tropis.
c. Menguasai konsep dasar penelitian dengan materi biokimia, terutama terkait dengan objek kajian yang diperoleh dari lingkungan hutan hujan tropis, serta mengimplementasikan hasil-hasil penelitiannya di sekolah.
d. Mampu melakukan kegiatan praktikum dan uji coba dengan materi biokimia, terutama terkait dengan objek kajian yang diperoleh dari lingkungan hujan tropis.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

F. Deskripsi Mata Kuliah Biokimia

Kajian yang dilakukan dalam mata kuliah meliputi: struktur halus sel dan fungsinya, karbohidrat, protein, lemak, asam nukleat, enzimologi, oksidasi biologis dan energi biokimia; metabolisme (katabolisme dan anabolisme): karbohidrat, protein, lemak; kelainan-kelainan dalam metabolisme: karbohidrat, protein, dan lemak. Teknis perkuliahan dalam mata kuliah adalah pertemuan tatap muka di kelas, dan kegiatan praktikum di laboratorium. Acara praktikum dilakukan dengan kajian tentang faktor yang mempengaruhi aktivitas enzim, oksidasi biologis, analisis darah, analisis urine. Mata kuliah ini berhubungan erat dengan mata kuliah: Biologi Sel, Fisiologi Manusia, Fisiologi Hewan, Fisiologi Tumbuhan, dan Genetika.

G. Ringkasan

Biokimia adalah proses reaksi kimia yang berjalan di dalam sel hidup. Belajar biokimia dapat dilaksanakan baik di dalam kelas maupun kegiatan praktikum di laboratorium. Terkait dengan karakteristik sel hidup (makhluk hidup) adalah: berkembang biak, tumbuh dan berkembang, bermetabolisme, dan beradaptasi. Mahasiswa cenderung masih belum memahami dengan baik materi-materi biokimia. Oleh karena itu, perlu disusun buku biokimia untuk memperkuat pemahaman mahasiswa tentang materi-materi biokimia.

H. Evaluasi

1. Jelaskan pengertian biokimia!
2. Jelaskan karakteristik-karakteristik sel hidup!

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

BAB II

STRUKTUR SEL DAN FUNGSINYA

A. Tujuan Pembahasan

Melalui menelaah isi BAB ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan keterkaitan antara ilmu kimia dengan biologi dengan benar.
2. Menguraikan organ sel-organel sel dengan benar.
3. Menjelaskan komponen-komponen utama penyusun biomolekul dengan benar.

B. Sel Sebagai Tempat Reaksi Biokimiawi Tubuh Makhluk Hidup

Biokimia merupakan kajian reaksi kimia yang berlangsung di dalam tubuh makhluk hidup. Kajian tersebut melibatkan dua bidang ilmu, yaitu biologi, dan kimia. Aspek biologi mengkaji tentang sel, sebagai wadah terjadinya reaksi-reaksi kimia di dalam tubuh. Selanjutnya, aspek kimia mengkaji tentang reaksi-reaksi kimia serta produk-produk yang menyertainya.

Arbianto (1993) menjelaskan bahwa biokimia merupakan salah satu ilmu yang mempelajari reaksi-reaksi kimia atau interaksi molekul dalam sel hidup. Sel merupakan bagian terkecil dari makhluk hidup yang dapat melakukan aktivitas biologis.

Terkait dengan sel, seluruh reaksi biokimiawi berlangsung di dalam sel. Oleh karena itu, seluruh bahan-bahan yang akan melaksanakan reaksi kimia, harus masuk di dalam sel, agar dapat terjadi reaksi-reaksi kimia.

Biokimia, mempelajari reaksi-reaksi kimia yang berlangsung di dalam sel yang masih hidup. Reaksi-reaksi kimia tersebut berbeda dengan reaksi-reaksi kimia yang berlangsung di luar sel.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

C. Organel-Organel Sel dan Fungsinya

Struktur sel pada prokariotik berbeda dengan eukariotik. Perbedaan pokoknya adalah bahwa pada sel prokariotik, bahan inti belum memiliki membran inti. Sedangkan pada sel eukariotik, bahan inti sudah memiliki membran ini.

Struktur-struktur halus (ultrastruktur) sel baik pada prokariotik maupun pada eukariotik, memiliki fungsi yang khas. Namun demikian, karena terdapat perbedaan kelengkapan struktur sel baik pada prokariotik dan eukariotik, maka untuk fungsi tertentu, diperankan oleh struktur halus yang berbeda antara sel prokariotik dan eukariotik. Gambar 1 berikut, menunjukkan struktur halus (*ulstrastructure*) dalam sel.

Terkait dengan struktur-struktur halus sel dan fungsinya, Arbianto (1993) menguraikan sebagai berikut.

1. Membran Plasma, menjaga integritas sel, dan bertanggung jawab dalam pengeluaran dan pemasukan zat-zat ke dalam dan keluar sel.
2. Inti, berperan dalam pembelahan sel, pengendalian ekspresi fenotipik dari informasi genetik, bertanggung jawab dalam melakukan reaksi biokimia yang terlibat dalam replikasi DNA selama proses mitosis dan perbaikan kerusakan DNA. Campbell et al,. (2008) menambahkan bahwa dalam sel eukariotik (*eukaryotic cell*), sebagian besar DNA berada dalam organel yang disebut nukleus yang dibatasi oleh membran ganda. Dalam sel prokariotik (*prokariotic cell*) DNA terkonsentrasi di wilayah yang tidak diselubungi oleh membran, disebut nukeoid. Interior sel prokariotik disebut sitoplasma (*cytoplasm*). Istilah ini juga digunakan untuk menyebut wilayah di antara nukleus dan membran plasma pada sel eukariotik. Dalam sitoplasma sel eukariotik, terdapat berbagai macam organel dengan bentuk dan fungsinya yang terspesialisasi, yang tersuspensi dalam sitosol. Struktur yang dibatasi membran ini tidak ditemukan pada sel prokariotik. Dengan demikian, ada atau tidak adanya nukeus sejati hanya salah satu contoh perbedaan kompleksitas struktural antara kedua tipe sel. Nukleus mengandung sebagian besar gen dalam sel eukariotik (sebagian gen terletak dalam mitokondria dan kloroplas). Nukeus umumnya merupakan organel yang paling menonjol dalam sel eukariotik, dengan diameter

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

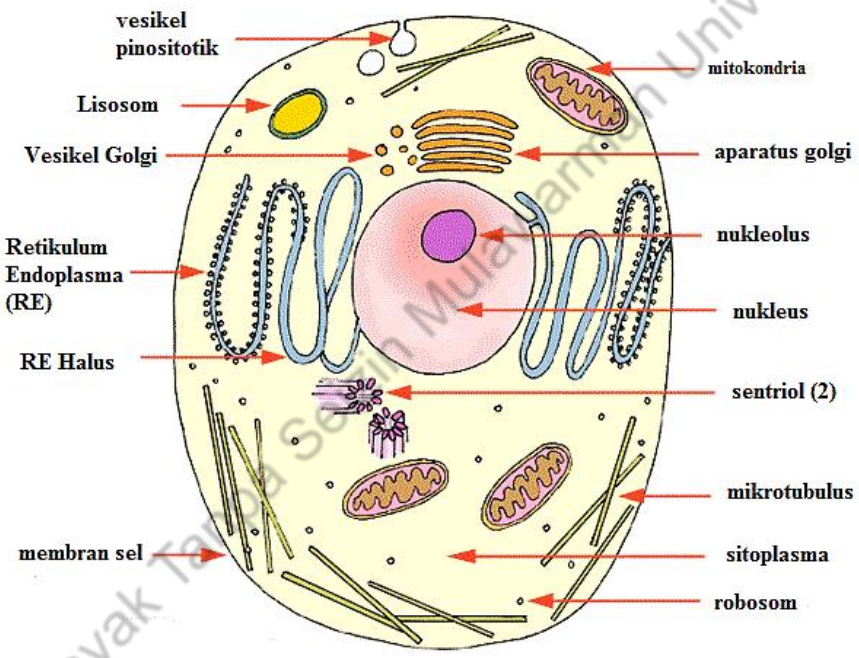
sekitar 5µm. Dalam nukleus, DNA terorganisasi menjadi unit-unit diskret yang disebut kromosom. Campbell et al. (2010), menjelaskan bahwa nukleus mengandung sebagian besar gen dalam sel eukariot (sebagian gen terletak dalam mitokondria dan kloroplas). Nukleus umumnya merupakan organel yang paling menonjol dalam sel eukariotik, dengan diameter sekitar 5 µm. Selaput nukleus (*nuclear envelope*) menyelubungi nukleus, memisahkan isinya dari sitoplasma. Selaput nukleus merupakan selaput ganda. Kedua membran masing-masing merupakan lapisan ganda lipid beserta protein-protein terkait, dipisahkan oleh ruang selebar 20-40 nm.

3. Retikulum Endoplasma (ER), RE kasar, yang ditempeli ribosom, dimana ribosom bertanggungjawab dalam sintesis protein. RE juga mengandung enzim yang terlibat dalam biosintesis hormone-hormon steroid dan trasferase yang diperlukan untuk menghilangkan sifat racun dari suatu senyawa. ER juga mempunyai peranan bersama-sama dengan badan Golgi dalam pembentukan organel-organel seluler lainnya seperti lisosom dan peroksisom.
4. Kompleks Golgi, membran Golgi mengatalisis pemindahan gugus ke protein. Selain itu, badan Golgi merupakan tempat untuk pembentukan membran, beberapa protein dan enzim dibungkus yang kemudian dikeluarkan dari sel dengan adanya isyarat-isyarat tertentu.
5. Mitokondria, mitokondria merupakan tempat terjadinya oksidasi biologis untuk menghasilkan ATP.
6. Lisosom, mengandung enzim lizozim sehingga lisosom menjadi tempat terjadi degradasi senyawa di dalam sel.
7. Proksisom, mengandung enzim yang mengatalisis D-asam amino, asam urat dan beberapa asam 2-hidrosil.Pada setiap reaksi akan menghasilkan hidrogen peroksida. Enzim katalase yang mengatalisis konversi hidrogen peroksida menjadi air dan oksigen juga terdapat dalam organel ini.
8. Mikrotubul dan Mikrofilamen, berpartisipasi dalam pembelahan sel, menjaga morfologi sel, transport intraseluler, dan motiliti sel.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

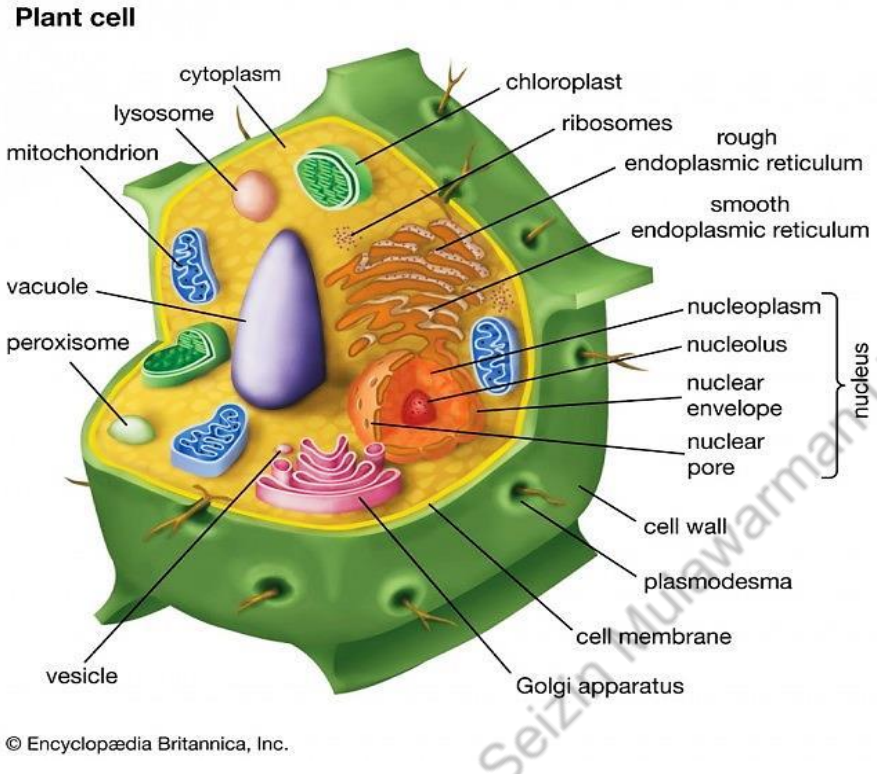
9. Sitosol, merupakan tempat dimana substrat dan kofaktor dari berbagai macam enzim berinteraksi.

Organel-ornael tersebut di atas, terdapat baik pada sel hewan maupun pada sel tumbuhan. Namun demikian, struktur halus atau organel-organel berikut, hanya terdapat pada sel tumbuhan, seperti kloroplas dan dinding sel. Gambar 1 berikut menunjukkan struktur halus sebuah sel hewan, dan .gambar 2 menunjukkan struktur halus sebuah sel tumbuhan.



Gambar 1. Struktur halus sel hewan (https://2.bp.blogspot.com/-NNTQhk3om6A/VFiHPUWWTsI/AAAAAAAAAC9Y/UH-NfOWc95A/w400-h300/sel.gif)

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seijin Mulawarman University Press



Gambar 2. Struktur halus sel tumbuhan
Sumber: https://www.google.com/search?q=gambar+sel+tumbuhan&oq=gambar+sel+tumbuhan&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIHCAEQABiABDIHCAIQABiABDIHCAMQABiABDIHCAQQABiABDIHCAUQABiABDIHCAYQABiABDIHCAcQABiABDIHCAgQABiABDIHCAkQABiABNIBCTExNjQ2ajBqN6gCALACAA&sourceid=chrome&ie=UTF-8#imgrc=t3Ua1t8y5o-VHM

Dilarang Memperbanyak Sebagian Atau Seluruh Isi Buku Tanpa Seizin Muhawarman University Press

Wahyudiati (2017) menjelaskan bahwa komponen utama penyusun biomolekul adalah seperti terdapat dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Komponen utama penyusun biomolekul

No.	Biomolekul	Fungsi utama	Contoh
1	Karbohidrat	• Sumber energi • Cadangan energi • Pembentuk struktur	• Glukosa • Glikogen, tepung • Selulosa
2	Lipid	• Penyusun membran sel • Penahan panas dan benturan • Cadangan energi	• Fosfolipid • Lemak tubuh
3	Protein	• Pembentuk struktur, biokatalis/enzim	• Daging, buluh, kulit • Semua enzim
4	Asam Nukleat	• Penyimpan dan pembawa informasi genetik • Penyusun ribosom	• DNA, mRNA, tRNA • rRNA

D. Ringkasan

Keterkaitan antara ilmu kimia dengan biologi dalam biokimia adalah ilmu kimia mengkaji tentang reaksi-reaksi kimia; sedangkan biologi mengkaji tentang sel yang merupakan wadah berlangsungnya reaksi-reaksi kimia. Organel-organel yang terdapat di dalam suatu sel yaitu: membran sel (menjaga integritas sel, bertanggung jawab keluar masuknya ke dalam dan keluar sel), inti (pembelahan sel, pengendalian ekspresi fenotipik, dan informasi genetik), retikulum endoplasma kasar (ribosom, bertanggung jawab dalam sintesis protein; mengandung enzim yang bertanggung jawab dalam biosintesis hormone-hormon steroid), kompleks golgi (mengatalisis pemindahan gugus ke protein), mitokondria (tempat terjadinya oksidasi biologis), lisosom (mengandung enzim lizosim sehingga lisosom menjadi tempat terjadi degradasi senyawa di dalam sel), peroksisom (mengandung enzim yang mengkatalsis asam amino), mikrotubul dan mikrofilamen (pembelahan sel, menjaga morfologi sel, motiliti sel), sitosol (tempat substrat dan kofaktor dari berbagai enzim berinteraksi). Komponen-komponen utama penyusun biomolekul yaitu: karbohidrat, protein, lemak, asam nukleat.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

E. Evalusi

1. Jelaskan keterkaitan antara ilmu kimia dengan biologi!
2. Uraikan organel-organel sel!
3. Jelaskan komponen-komponen utama penyusun biomolekul!

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

BAB III

SENYAWA ORGANIK

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seijin Mulawarman University Press

A. Tujuan Pembahasan

Melalui menelaah isi BAB ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan tentang karbohidrat dengan benar.
2. Menjelaskan tentang protein dengan benar.
3. Menjelaskan tentang lemak dengan benar.
4. Menjelaskan tentang asam nukleat dengan benar.

B. Pengertian Senyawa Organik

Senyawa organik adalah ikatan antar unsur-unsur kimia yang berupa: Hidrogen (H), Oksigen (O), Carbon (C), Nitrogen (N). Unsur-unsur tersebut saling mengikat (bersenyawa), dan membentuk senyawa yang disebut senyawa organik. Contoh senyawa-senyawa organik antara lain: glukosa ($C_6H_{12}O_6$) yang merupakan molekul karbohidrat yang mudah larut dalam air dan terasa manis. Selanjutnya, terkait dengan senyawa anorganik, merupakan ikatan yang tidak terjadi secara bersama-sama antara unsur-unsur C,H,O,N. Contoh senyawa anorganik adalah air (H_2O).

C. Macam-Macam Senyawa Organik

1. Karbohidrat

a. Pengertian

Arbianto (1993) menjelaskan bahwa karbohidrat merupakan jenis biomolekul yang paling banyak ditemukan di alam. Karbohidrat sering disebut sakar, terbentuk pada proses fotosintesis sehingga merupakan senyawa perantara awal dalam penyatuan CO_2, hidrogen, oksigen, dan energi matahari ke dalam bentuk hayati. Karbohidrat

mengandung unsur-unsur: C, H, O. Selanjutnya, Ngili (2019) menambahkan bahwa karbohidrat (juga disebut sakarida) adalah pada dasar merupakan kelas molekul biologis paling melimpah di bumi. Tumpukan karbohidrat planet, dihasilkan oleh fotosintesis, proses di mana organisme tertentu, termasuk tumbuhan, alga, dan sebagian bakteri, mengasimilasi karbondioksida atmosfer dan mengubah energi surya menjadi energi kimia. Pada hewan dan tumbuhan, polimer karbohidrat bukan sebagai molekul simpanan energi. Karbohidrat polimer juga ditemukan dalam dinding sel dan dalam lapisan pelindung banyak organisme; polimer karbohidrat lain adalah molekul marker yang memungkinkan satu tipe sel untuk mengenali dan berinteraksi dengan tipe lain.

Schumm (1993) menjelaskan bahwa karbohidrat adalah senyawa-senyawa polihidraksi yang juga mengandung gugus lain, yang dapat berupa aldehid atau keton. Meskipun karbohidrat merupakan senyawa biologis yang paling banyak jumlahnya di muka bumi ini, karbohidrat tubuh manusia hanyalah 1% saja dari keseluruhan tubuh manusia.

b. Klasifikasi

Karbohidrat dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu: monosakarida, oligosakarida, dan polisakarida. Setiap kelompok karbohidrat memiliki kekhasan dalam hal daya kelarutannya, jumlah monosakarida penyusunnya.

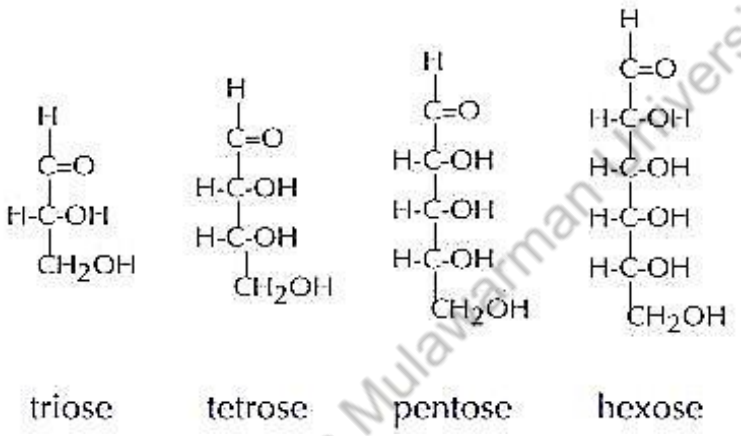
1) Monosakarida

Arbianto (1993) menjelaskan bahwa monosakarida yang paling sederhana adalah gliseraldehida, suatu aldose atau isomernya ialah dihridroksiaseton suatu ketosa. Kedua senyawa tersebut merupakan suatu triosa karena mengandung tiga atom C. Jadi suatu monosakarida tidak hanya dapat dibedakan berdasarkan gugus fugsionalnya tetapi juga dengan jumlah atom karbonnya.

Terkait dengan penamaan jenis-jenis monosakarinda berdasarkan jumlah atom C, maka ditemukan penamaan khusus untuk jenis-jenis monosakarida tersebut. Penamaan jenis-jenis monosakarida berdasarkan jumlah atom C sebagai berikut: triosa

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

(jumlah ataom C = 3), tetrosa (jumlah atom C = 4), pentose (jumlah atom C = 5), heksosa (jumlah atom C = 6), dan heptulosa (jumlah atom C = 7). Contoh gula monsakarida antara lain glukosa (gula heksosa). Gambar 3 berikut menunjukkan macam-macam gula monosakarida.

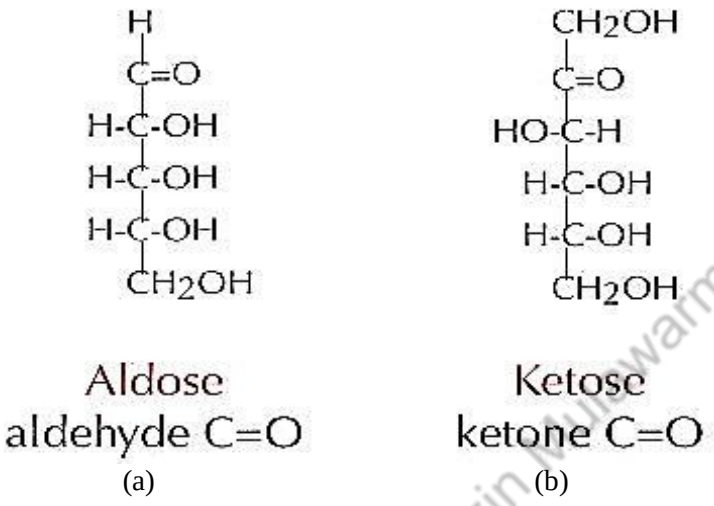


Gambar 3. Macam-macam gula monosakarida triosa, tetraosa, pentose, dan hexose
(https://oktavianipratama.files.wordpress.com/2013/04/untitled.png)

Sifat-sifat monosakarida, berbeda dengan kelompok karbohidrat lain. Sifat-sifat monosakarida antara lain: mudah larut dalam air, rasanya manis. Purba dkk. (2021) menjelaskan bahwa monosakarida tidak berwarna, padatan kristalin yang larut bebas dalam air tetapi tidak larut dalam pelarut nonpolar. Kebanyakan memiliki rasa manis. Tulang punggung monosakarida adalah rantai karbon tidak bercabang dimana semua atom karbon dihubungkan oleh ikatan tunggal. Salah satu atom karbon terikat ganda ke atom oksigen untuk membentuk gugus karbonik; masing-masing atom karbon memiliki gugus karboksil. Jika gugus karbonil berada di ujung rantai karbon monosakarida adalah aldehid dan disebut aldose, jika gugus karbonil berada di ujung rantai karbon monosakarida adalah keton, disebut ketose.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

Ngili (2009) menjelaskan bahwa terdapat dua jenis monosakarida, yaitu aldose dan ketosa. Aldosa mengandung gugus aldehid, sedangkan keton mengandung gugus keton. Gambar 4 berikut menunjukkan gula aldose dan gula ketose.

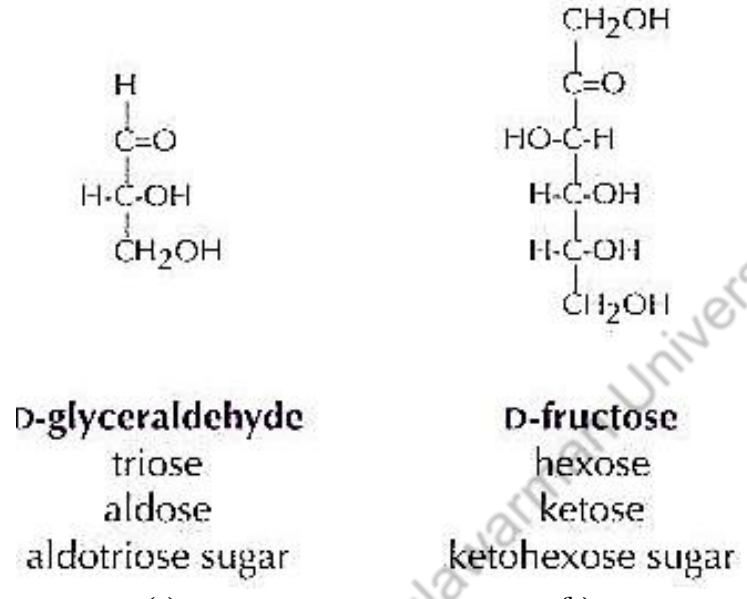


(a) (b)

Gambar 4. Gula aldose (a) dan gula ketose (b) (https://simdos.unud.ac.id/uploads/file_pendidikan_1_dir/845984c4d6c9af2c0e4754d75f5a82a4.pdf)

Ada dua kelompok aldosa, yaitu kelompok D (gula dekstro) dan kelompok L (gula levo). Untuk menentukan di kelompok mana suatu aldose tergabung, adalah dengan memperhatikan atom karbon kiral yang paling dekat dengan gugus pereduksi kemudian membandingkannya dengan gliseraldehid. Konfigurasi karbohidrat ditentukan sesuai dengan kedudukan atom C kedua dari ujung. Jadi semua karbohidrat yang diturunkan dari bentuk D-gliserida dengan penambahan rantai karbon, dinamakan D-sakarida. Gambar 5 berikut menunjukkan struktur gula D-gliseraldehid (a) dan D-fruktose (b).

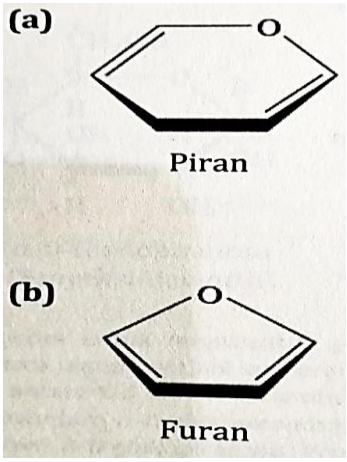
Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press



Gambar 5. Struktur gula D-gliseraldehid (a) dan D-fruktose (b) (https://simdos.unud.ac.id/uploads/file_pendidikan_1_dir/845984c4d6c9af2c0e4754d75f5a82a4.pdf)

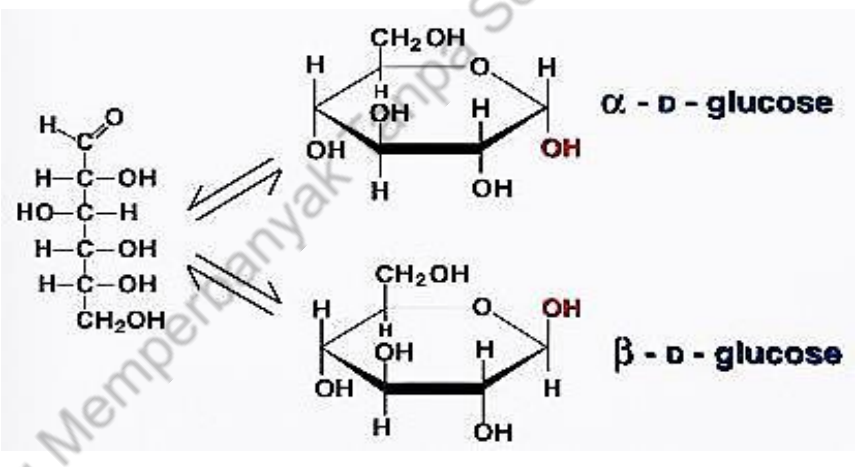
Ngili (2019) menjelaskan bahwa karena menyerupai senyawa heterosilkik enam anggota piran, cincin enam anggota monosakarida disebut piranosa. Serupa, karena cincin lima anggota monosakarida menyerupai furan, ia disebut furanosa. Perhatikan bahwa tidak seperti piran dan furan, cincin karbohidrat tidak mengandung ikatan rangkap. Gambar 6 berikut menunjukkan struktur piran (a) dan struktur furan (b).

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seijin Mulawarman University Press



Gambar 6. (a) Piran, (b) Furan
Sumber: Ngili, 2019.

D-glukosa bentuk cincin (perhatikan bahwa glukosa mengalami siklisasi membentuk struktur cincin) dibentuk dengan atom O mengikat C_2 dengan C_5. Gambar 7 menunjukkan struktur cincin pada D-glukosa.



Gambar 7. Struktur cincin pada D-glukosa
(https://simdos.unud.ac.id/uploads/file_pendidikan_1_dir/845984c4d6c9af2c0e4754d75f5a82a4.pdf)

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

D-fruktosa (perhatikan bahwa fruktosa mengalami siklisasi membentuk struktur cincin) (Lihat Gambar 6b).

Jumlah karbon pada monosakarida bervariasi. Gula monosakarida yang paling sederhana adalah yang berkarbon 3 (triosa), dan yang paling kompleks adalah yang berkarbon delapan (oktosa). Tabel berikut memuat gula monosakarida mulai dari yang paling sederhana sampai dengan yang paling kompleks.

Tabel 2. Variasi jumlah karbon pada monosakarida dan bentuk aldo dan keto

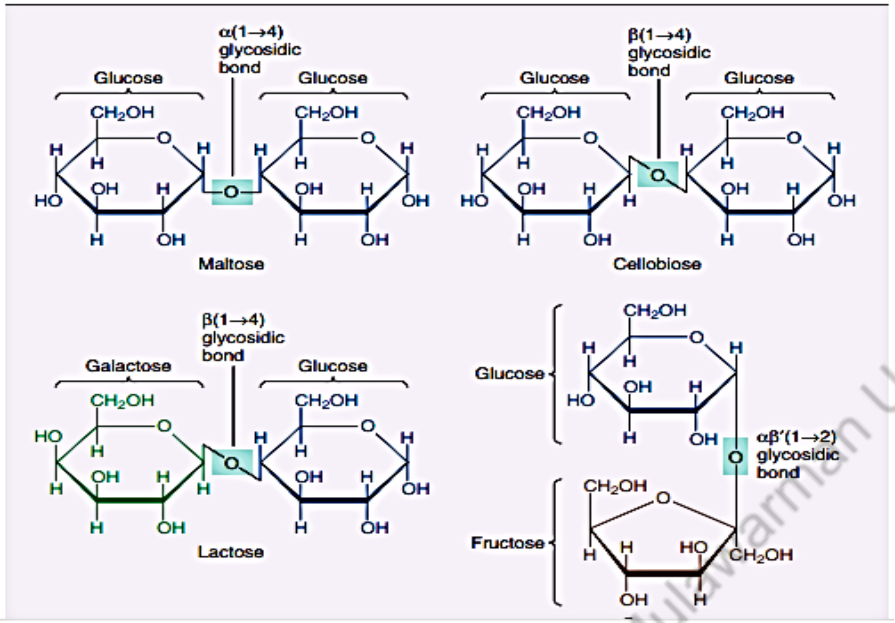
Monosakarida	Bentuk Aldo	Bentuk Keto
Triosa	Glyceraldehydes	Dihydroxyacetone
Tetrosa	Erythrose and Threose	Erythrulose
Pentosa	Arabinose, Lyxose, Ribose and Xylose	Ribulose and Xylulose
Heksosa	Allose, Altrose, Galactose, Glucose, Gulose, Idose, Mannose and Talose	Fructose, Psicose, Sorbose and Tagatose
Heptosa	NA	Mannoheptulose, Sedoheptulose
Oktosa	NA	2-Keto-3-deoxy-manno-octonate

Sumber: Purba dkk. 2021

2) Disakarida/Oligosakarida

Disakarida terdiri atas dua lingkar monosakarida. Ikatan yang menghubungkan monosakarida tersebut disebut ikatan glikosidik dan terbentuk dengan kondensasi gugus hidroksil atom karbon nomor 1 dari satu monosakarida dengan gugus hidroksil dari salah satu nomor 2, 4, 6 atau karbon monosakarida lainnya. Gambar 7 berikut menunjukkan struktur bangun gula disakarida/oligosakarida.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press



Gambar 7. Struktur bangun gula disakarida
Sumber: Meisenberg & Simmons, 2016

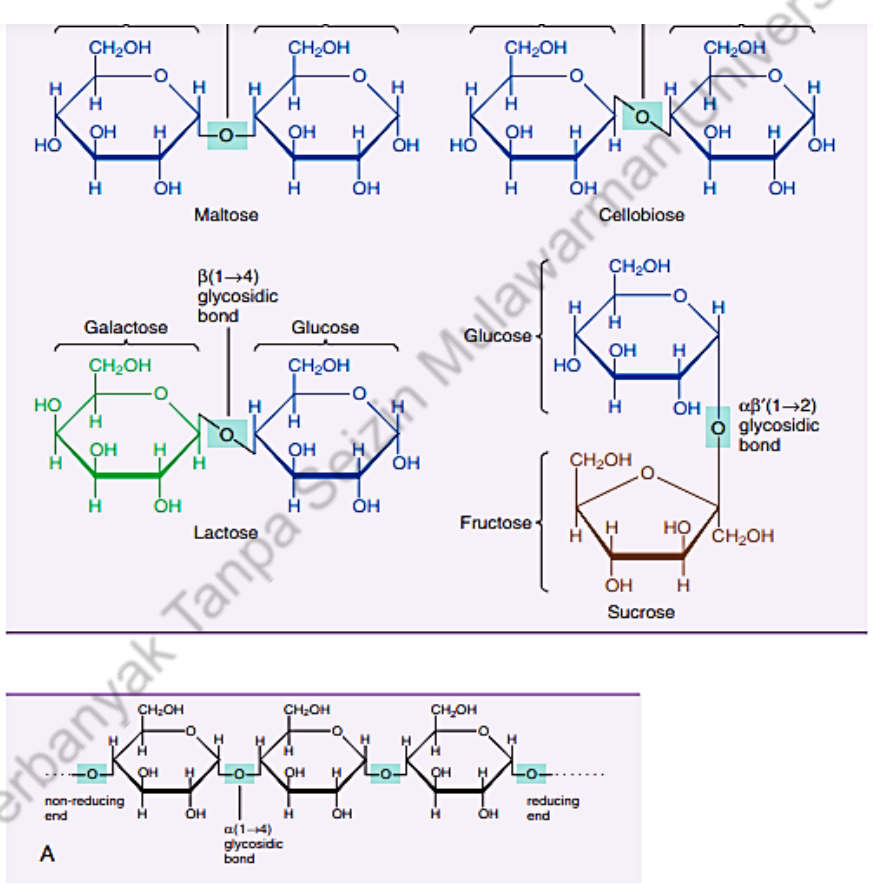
3) Polisakarida

Arbianto (1993) menjelaskan bahwa polisakarida terdiri atas rantai dari monosakarida. Struktural polisakarida berlaku sebagai pembangun komponen dari organel sel dan juga sebagai unsur penyokong intraseluler. Gula yang termasuk ke dalam golongan ini adalah selulosa (dalam dinding sel tumbuhan), mannan (dalam dinding sel ragi), chitin, chondroitin, dan asam hialuronat (cairan synovial).

Secara kimiawi polisakarida dapat dibagi dalam dua kelas secara garis besarr; homopolisakarida dan heteropilisakarida. Dalam homopolisakarida, gula pembangun pilisakarida adalah sama. Termasuk dalam kelas ini adalah selulosa, paraamilum, glikogen, dan pati. Dalam heteropolisakarida, rantai terdiri atas bermacam-macam gula; termasuk dalam kelas ini adalah asam hialuronat dan chondroitin sulfat

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

Ngili (2009) menjelaskan bahwa polisakarida memiliki fungsi utama sebagai pembentuk struktur atau untuk penyimpanan energi. Tepung dan glikogen merupakan polimer glukosa yang berfungsi sebagai penyimpan gula di dalam tumbuhan dan hewan. Tepung terdapat sebagai amilosa dan amilopektin. Gambar 8 berikut, menunjukkan struktur bangun gula polisakarida.



Gambar 8. Struktur bangun polisakarida
Sumber: Meisenberg & Simmons, 2016

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

c. Manfaat Karbohidrat

Schumm (1987) menjelaskan bahwa meskipun karbohidrat merupakan senyawa biologis yang paling banyak jumlahnya di muka bumi, karbohidrat tubuh manusia hanyalah 1% saja dari keseluruhan tubuh manusia. Senyawa ini diolah oleh tubuh sebagai makanan, disimpan dalam bentuk glikogen dan digunakan sebagai bahan bakar sel yang utama. Karbohidrat juga penting dalam membentuk rawan dan tulang.

2. Protein

a. Pengertian

Schumm (1993) menjelaskan bahwa asam amino dapat berikatan satu sama lain dengan mengeluarkan molekul air dan membentuk polipeptida atau protein. Protein tersusun atas asam-asam amino. Asam amino terdiri atas dua jenis, yaitu asam amino esensial dan asam amino non esensial. .Terkait dengan asam amino esensial dan non esensial, Ngili (2009) menjelaskan bahwa asam amnio yang termasuk ke dalam esensial adalah Isoleusin, Leusin, Lisin, Metionin, fenilalanin, Treonin, Triptofan, Valin, Arginin, dan Histidin. Asam-asam amino yang termasuk non esensial adalah Glutamat, Glutamin, Prolin, Aspartat, Asparagin, Alanin, Glisin, Serin, Tirosin, dan Sistein.

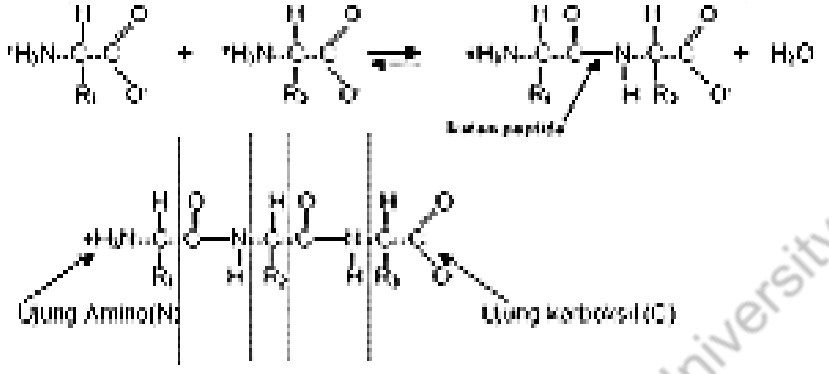
b. Sifat-sifat Protein

Terkait dengan struktur protein, terdapat empat struktur protein (Schumm, 1993). Keempat struktur protein tersebut adalah: struktur primer, struktur sekunder, struktur tersier, dan struktur kuarter.

1) Struktur primer

Struktur primer dari suatu protein adalah urutan asam-asam amino yang membentuknya. Ikatan peptide mempunyai sifat yang sebagian mirip dengan ikatan rangkap antara C dengan N. Dengan demikian ikatan ini tegar dan membentuk bidang datar. Gambar 9 berikut menunjukkan struktur primer protein.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press



Gambar 9. Struktur primer protein
Sumber: Ischak dkk., 2017.

2) Struktur sekunder

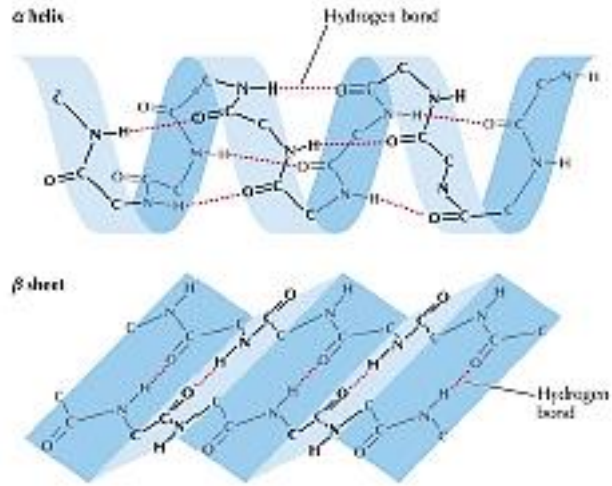
Struktur sekunder dari protein ditentukan oleh struktur primer. Struktur ini dibentuk dan dipertahankan oleh ikatan hidrogen antara C=O dengan ikatan NH pada ikatan peptida.

Ada banyak kemungkinan untuk struktur sekunder, akan tetapi dua di antaranya yaitu: heliks α, dan struktur sekunder adalah lembaran β atau lembaran bergelombang.

Struktur sekunder heliks α, seperti halnya juga heliks α DNA, maka di sini pun berupa heliks yang berputar ke kanan. Heliks dengan putaran ke kiri mungkin saja, akan tetapi heliks berputar ke kanan lebih mantap bagi peptida yang tersusun dari asam-asam amino yang lazim dijumpai di alam, yaitu asam-asam amino L.

Struktur sekunder β atau lembaran bergelombang, rantai meluas dengan gugus r berganti-ganti berada di atas dan di bawah tulang punggung. Ikatan hidrogen terbentuk antara ikatan-ikatan peptida yang berjalan secara antiparalel. Gambar 10 berikut menunjukkan struktur sekunder protein.

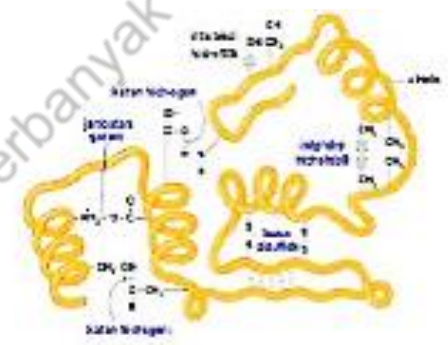
Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press



Gambar 10. Struktur sekunder protein
Sumber: Ischhak (2017)

3) Struktur Tersier

Struktur tersier adalah konfigurasi yang ditampilkan protein dalam ruang. Seperti struktur sekunder, struktur tersier pertama-tama juga ditentukan oleh urutan asam amino. Interaksi ion antara gugus-gugus R yang bermuatan, interaksi hidrofobik dan ikatan sulfida semuanya penting untuk memantapkan struktur tersier. Gambar 11 menunjukkan struktur tersier protein.

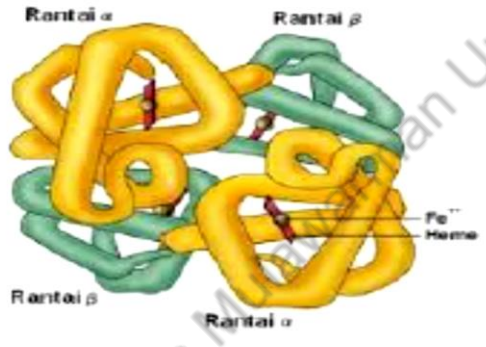


Gambar 11. Struktur tersier protein
Sumber: Ischak, 2017

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seijin Mulawarman University Press

4) Struktur Kuarterner

Struktur kuarterner adalah penataan suatu rantai protein dengan rantai protein yang lain dan dengan koenzim yang tidak terikat secara kovalen. Rantai protein secara individu dapat berikatan dengan rantai protein yang lain (identik atau berbeda) sebagai subunit dari struktur yang lebih besar. Gambar 12 menunjukkan struktur kuartener protein.



Gambar 12. Struktur kuarterner protein
Sumber: Ischak, 2017.

c. Klasifikasi

Almatsier (2004) menjelaskan bahwa protein terdapat dalam bentuk serabut (fibrous), globular, dan konjugasi.

1) Protein bentuk serabut

Protein bentuk serabut terdiri atas beberapa rantai peptide berbentuk spiral yang terjalin satu sama lain sehingga menyerupai batang yang kaku. Karakteristik protein bentuk serabut adalah rendahnya daya larut, mempunyai kekuatan mekanis yang tinggi, dan tahan terhadap enzim pencernaan.

2) Protein globular

Protein globular berbentuk bola, terdapat dalam cairan jaringan tubuh. Protein ini larut dalam larutan garam dan asam encer, mudah berubah di bawah pengaruh suhu, keonsentrasi garam serta mudah mengamali denaturasi.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seijin Muhammadiyah University Press

Contoh protein globular adalah: albumin yang terdapat dalam telur, susu, plasma, dan hemoglobin; globulin, terdpat dalam otot, serum, dan biji tumbuh-tumbuhan; histon, terdapat dalam jaringan-jaringan kelenjar tertentu seperti timus dan pancreas; protamin, dihubungkan dengan asam laktat.

3) Protein konjugasi

Protein konjugasi adalah protein sederhana yang terikat dengan bahan-bahan nonasam amino. Gugus non asam amino ini dinamakan gugus prostetik. Contoh-contoh protein konjugasi antara lain sebagai berikut.

a) Nukleoprotein, adalah kominasi protein dengan asam nukleat dan menga dung 9-10% fosfat. Hidrolisis asam nukleat menghasilkan purin, pirimidin, gula (ribose atau deoksiribosa) dan asam fosfat.
b) Liporpotein, adalah protein larut air yang berkonjugasi dengan lipida, seperti lesitin dan kolesterol. Lipoprotein terdapat dalam plasma dan berfungsi sebagai pengangkut lipida dalam tubuh.
c) Fofoprotein, adalah protein yang terikat melalui ikatan ester dengan asam fosfat seperti pada kaseind an susu.
d) Metaloprotein, adalah protein yang terikat dengan mineral, seperti ferritin dan hemosiderin dimana mineralnya adalah zat besi. Tembaga, dan seng.

Bentuk protein konjugasi lain adalah: hemoprotein, dan flavoprotein.

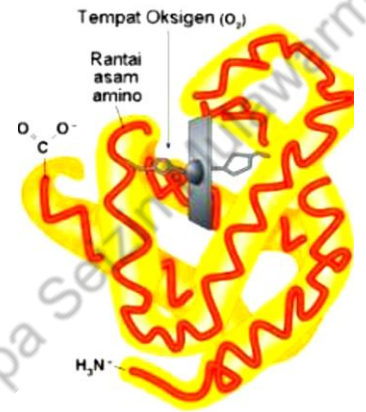
Wahyudati (2017) menjelaskan bahwa protein sebagai makromolekuler (molekul besar) mampu menunjukkan berbagai fungsi biologis. Atas dasar peran ini maka protein dapat diklasifikasi sebagai berikut: enzim, protein *transport*, protein nutrient dan penyimpan, protein kontraktil atau motil, protein struktural, protein pertahanan, dan protein pengatur.

1) Protein sebagai enzim; merupakan protein yang dapat berfungsi sebagai katalisator. Hampir dari seluruh reaksi kimia yang terjadi di tingkat sel dikatalisis oleh enzim. Beberapa contoh enzim yang

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

banyak dimanfaatkan saat ini seperti glukosa oksidase yang mengkatalisis glukusa menjadi asam glukonat, urikase yaituenzim yang dapat membongkar asam urat menjadi alantoin. Saat ini sudah ditemukan lebih dari 2000 jenis enzim yang mengatalisis reaksi kimia yang spesifik dan ditemukan dalam berbagai bentuk kehidupan.

2) Protein *transport*; adalah protein yang dapat mengikat dan membawa molekul atau ion yang khas dari satu organ ke organ lainnya. Contoh protein *transport* yang mudah adalah myoglobin yang menyimpan dan mendistribusikan oksigen ke dalam otot. Gambar 13 menunjukkan mioglogin.



Gambar 13. Mioglobin yang mendistribusikan oksigen ke otot
Sumber: Wahyudiati, 2017

Hemoglobin adalah protein yang membawa oksigen melalui aliran darah dari jantung ke jaringan yang memerlukannya untuk menghasilkan energi. Hemoglobin juga merupakan protein *transport* yang terdapat dalam sel darah merah. Hemoglobin dapat mengikat oksigen ketika darah melalui paru-paru. Oksigen dibawa dan dilepaskan pada jaringan periferi yang dapat dipergunakan untuk mengoksidasi nutrien (makanan) menjadi energi.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Universitas Negeri Malang Press

3) Protein nutrien; sering disebut juga protein penyimpanan. Protein ini merupakan cadangan makanan yang dibutuhkan untuk pertumbuhan dan perkembangan. Contoh protein ini sering kita temukan dalam kehidupan sehari-hari seperti ovalbumin merupakan protein utama putih telur, kasein sebagai protein utama dalam susu.
4) Protein kontraktil; juga dikenal sebagai protein motil. Protein ini, di dalam sel organisme, berperan untuk bergerak seperti aktin dan myosin. Kedua protein ini merupakan filament yang berfungsi untuk bergerak di dalam sistem kontraktil dan otot kerangka.
5) Protein struktural; jenis protein ini berperan untuk menyangga atau membangun struktur biologi makhluk hidup. Misalnya kolagen adalah protein utama dalam urat dan tulang rawan yang memiliki kekuatan dan liat.

d. Asam Amino

Murray (2002) menjelaskan bahwa asam amino amino adalah unit menomerik yang membentuk protein. Bila protein yang dipanaskan dalam suasana asam atau basa kuat maka ikatan kovalen yang menghubungkan asam amino yang satu dengan lainnya akan terputus, alhasil kita akan memperoleh molekul-molekul yang relatif lebih kecil, yaitu asam amino. Asam amino yang pertama kali diisolasi adalah asparagine yang ditemukan pada tahun 1806.

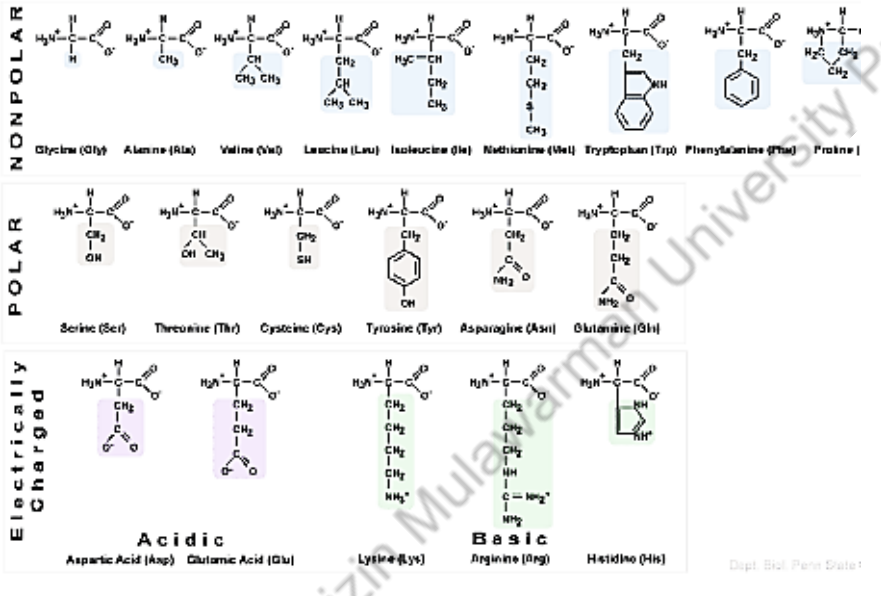
Selanutnya, dijelaskan bahwa asam amino dapat diklasifikasikan berdasarkan gugur R-nya, terutama yang menyangkut polaritas dari gugus tersebut. Berdasarkan polaritas dari gugus R, asam amino dapat dikelompokkan menjadi 4, yaitu:

1) Asam amino dengan gugus R non polar.
2) Asam amino dengan gugus R polar tak bermuatan.
3) Asam amino dengan gugus R polar dan bermuatan positif.
4) Asam amino dengan gugus R polar bermuatan negatif.

Setiap jenis asam amino memiliki struktur bangun yang berbeda-beda. Namun demikian, ada satu gugus yang selalu ada dalam setiap struktur bangun asam-asam amino tersebut adalah $–NH_2$. Gambar

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

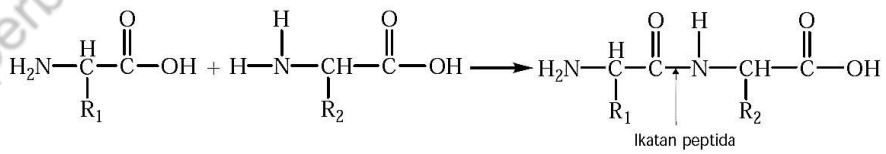
berikut menunjukkan rumus-rumus bangun asam-asam amino. Gambar 14 menunjukkan struktur bangun asam-asam amino.



Gambar 14. Struktur bangun asam-asam amino
Sumber: Ischak dkk., 2017.

e. Manfaat Protein

Protein berperan sebagai zat penyokong, zat pengenal, dan sebagai katalis untuk beraneka macam reaksi kimia yang terjadi di dalam sel. Schumm (1993) menjelaskan bahwa struktur umum protein adalah seperti terlihat pada Gambar 15 berikut.



Gambar 15. Struktur umum protein
(Mhttps://2.bp.blogspot.com/-iQy5494zDCM/Uk1IrUQkcfI/AAAAAAAAAV30/MsMYoi5Wr6s/s400/ikatan-peptida-asam-amino-3102013.jpg:, diakses tanggal: 16 Juni 2018).

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

3. Lemak

Schumm (1993) menjelaskan bahwa lipida atau lemak merupakan 15% dari tubuh. Senyawa ini terutama terdiri atas hidrokarbon dan mempunyai afinitas yang kecil saja dengan air.

Menurut Arbianto (1993) bahwa lipida adalah komponen sel atau jaringan yang terdiri atas beraneka ragam senyawa yang sebagian besar hanya larut dalam pelarut organik seperti eter, kloroform, bensen.

a. Sifat-sifat Lemak

Sifat-sifat lemak adalah sebagai berikut.

- Lemak tidak larut dalam air
- Lemak dapat larut dalam satu atau lebih pelarut organik (misalnya eter, aseton, kloroform, benzena)

b. Klasifikasi

Terkait dengan klasifikasi lemak, Arbianto (1993) menjelaskan bahwa secara tradisional, lipida digolongkan dalam:

1) Asil gliserol
2) Fosfolipida
3) Sfingolipida
4) Glikolipida
5) Lipida terpen, termasuk karotenoid dan steroid

Almatsier (2004) menjelaskan bahwa klasifikasi lipida (lemak) adalah.

1) Lipida sederhana
2) Lemak netral, monogliserida, digliserida, dan trigliserida.
3) Ester asam lemak dengan alcohol berberat molekul tinggi.
4) Lipida majemuk (*compound lipids*)
   a) Fosfolipida
   b) Lipoprotein
5) Lipida turunan (derived lipid)
   a) asam lemak
   b) sterol: kolesterol dan ergosterol, hormone steroidda, vitamin D, garam empedu
6) Lain-lain
   a) Karotenoid dan vitamin A

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

b) Vitamin E
c) Vitamin K

c. Manfaat Lemak

Almatsier (2004) menjelaskan bahwa, manfaat atau fungsi dari lemak adalah.

1) Sumber energi, lemak dan minyak merupakan sumber energi paling padat, yang menghasilkan 9 kalori untuk tiap gram, yaitu 21/2 kali besar energi yang dihasilkan oleh karbohidrat dan protein dalam jumlah yang sama.
2) Sumber asam lemak esensial, lemak merupakan sumber asam lemak esensial asam linoleat dan linolenat.
3) Alat angkut vitamin larut lemak, lemak mengandung vitamin larut lemak tertentu. Lemak susu dan minyak ikan laut tertentu mengandung vitamin A dan D dala jumlah berarti. Hampir semua minyak nabati merupakan sumber vitamin E.
4) Menghemat protein, lemak menghemat penggunaan protein untuk sintesis protein, sehingga protein tidak digunakan sebagai sumber energi.
5) Sebagai pelumas, lemak merupakan pelumas dan membantu pengeluaran sisa pencernaan.
6) Memelihara suhu tubuh, lapisan lemak di bawah kulit mengisolasi tubuh dan mencegah kehilangan panas tubuh secara cepat, dengan demikian lemak berfungsi juga dalam memelihara suhu tubuh.

4. Asam Nukleat

a. Pengertian

Schumm (1993) menjelaskan bahwa nukleotida adalah subunit yang membentuk *Deoxyribonucleic acid* (*DNA*), bahan genetik permanen dalam sel, serta *Ribonucleic acid* (*RNA*). Nukleotida juga berperan zat pengemban berenergi dari unsur-unsur individual dalam biosintesis karbohidrat, asam-asam amino, dan lemak.

Yanti (2022) menjelaskan bahwa nukleotida merupakan monomer asam nukleat, memiliki banyak fungsi dalam metabolisme selular. Sebagai konstituen asan nukleat, *DNA* dan *RNA*, nukleotida

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

berfungsi sebagai gudang informasi genetik. Struktur protein dan dan metabolism biomolekul dan komponen seluler lainnya merupakan produk informasi yang sudah terprogram dalam nukleotida.

Nukleotida terdiri atas suatu basa nitrogen, suatu gula, dan suatu asam fosfat. Lima basa nitrogen yang utama adalah adenine (A) dan guanine (G) yang termasuk basa purin; dan timin (T) dan sitosin (C), serta urasil (U); ketiganya adalah pirimidin.

DNA mengandung basa A, G, C, dan T. *RNA* mempunyai susunan yang sama, kecuali T diganti oleh U. Ikatan kovalen terdapat antara C-1 gula dengan N-9 suatu purin atau N-1 suatu pirimidin.

Penambahan asam fosfat ke dalam suatu molekul nukleosida menghasilkan suatu nukleotida atau nukleosida monofosfat. Agar tidak kacau dengan angka pada kedudukan basa, kedudukan pada molekul gula diberi tanda aksen (‘). Gambar 16 menunjukkan skemas struktur *DNA.*

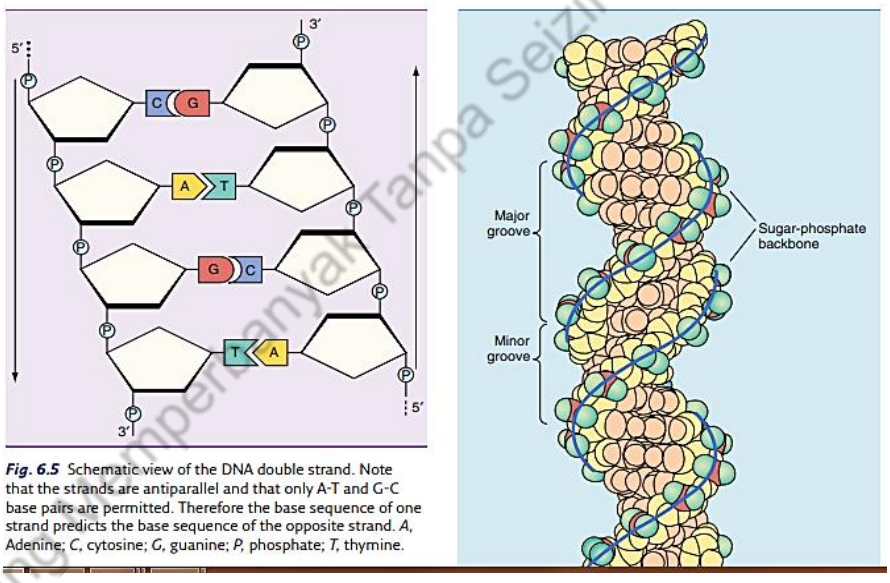
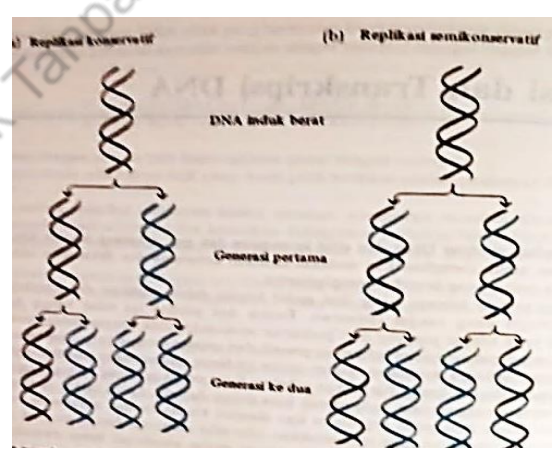


Fig. 6.5 Schematic view of the DNA double strand. Note that the strands are antiparallel and that only A-T and G-C base pairs are permitted. Therefore the base sequence of one strand predicts the base sequence of the opposite strand. *A*, Adenine; *C*, cytosine; *G*, guanine; *P*, phosphate; *T*, thymine.

Gambar 16. Skema struktur *DNA*
Sumber. (Sumber: Meisenberg & Simmons (2016)

Dilarang memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

Terkait dengan replikasi *DNA* secara semikonservatif, Lehninger (1994) menjelaskan bahwa hipotesis Waston-Crick mengusulkan bahwa tiap untaian sulut ganda *DNA*, digunakan sebagai suatu cetakan bagi replikasi *DNA* keturunan/anak yang bersifat komplementer, Dengan cara ini, dua dupleks keturunan molekul-molekul *DNA* yang sama dengan *DNA* induk akan terbentuk, masing-masing mengandung satu untaian utuh dari *DNA* induk. Percobaan Meselson dan Stahl yang dilakukan, menyimpulkan bahwa tiap dupleks *DNA* keturunan pada dua generasi sel-sel mengandung satu untaian induk dan satu untaian yang baru dibuat, tepat dengan pernyataan hipotesis Waston-Crick. Jenis replikasi ini disebut semikonservatif, karena hanya satu untaian induk dipertahankan pada tiap *DNA* keturunan. Pengamatan mereka dengan jelas meniadakan replikasi konservatif, dimana satu dupleks *DNA* keturunan mempunyai dua untaian baru. Hal ini juga meniadakan suatu mekanisme penyebaran dimana tiap untaian keturunan *DNA* mengandung potongan pendek dari kedua induk dan *DNA* baru yang bergabung bersama secara acak. Gambar berikut menunjukkan replikasi *DNA* secara konservatif dan secara semikonservatif. Gambar 17 menunjukkan replikasi keonservatif (a) dan semikonservatif (b).



Gambar 17. (a) Replikasi konservatif, (b) konservatif semikonservatif
Sumber. Lehninger, 1994.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

Terkait dengan komponen yang ada dalam nukleotida, Lehninger (1982) menjelaskan bahwa nukleotida mengandung tiga komponen yang khas: (1) basa nitrogen, (2) pentose, dan (3) asam fosfat basanya bergabung seperti pada gambar di bawah, sehingga basanya bergabung secara kovalen dalam ikatan N-gliserol dengan atom karbon 1' pada pentose dan asam fofat berikatan ester atom karbon 5'.

b. Klasifikasi

Asam nukleat pada sel organisme terdiri atas dua jenis. Jenis-jenis assm nukleat tersebut adalah asam deoksiribonukleat (ADN) atau disingkat dengan *DNA*, dan asam ribonukleat (ARN) atau *Ribonucleic acid* aatau disingkat dengan *RNA*. Kedua jenis jenis asam nukleat tersebut, pada organisme hidup, berada secara bersama-sama di dalam sel tersebut. Namun untuk virus, kedua jenis asam nuleat tersebut (*DNA* dan *RNA*) tidak secara bersama-sama berada dalam satu partikel virus. Oleh karena itu, partikel virus yang mengandung asam nukleat dari jenis *DNA*, dinamakan virus *DNA*; sedangkan partikel virus yang mengandung asam nukleat dari jenis *RNA*, dinamakan virus *RNA*.

Terkait dengan perbedaan *DNA* dengan *RNA*, Lehninger (1982) menjelaskan bahwa perbedaan *DNA* dengan *RNA*, dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 3. Perbedaan *DNA* dengan *RNA*

DNA		*RNA*
Purin	Adenin	Adenin
	Guanin	Guanin
Pirimidin	Sitosin	Sitosin
	Timin	Urasil

Sumber: Lehninger, 1982.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

D. Ringkasan

Karbohidrat merupakan produk fotosintesis yang terjadi pada makhluk hidup yang memiliki klorofi. Karbohidrat dikalsifikasikan menjadi: monosakarida, disakarida/oligosakarida, dan polisakarida. Protein terbentuk dari rantai asam-asam amino. Protein terdapat dalam struktur primer, sekunder, tersier, dan kuarterner. Ada 3 bentuk protein yaitu: bentuk serabut, bentuk globular, dan bentuk konjugasi. Ada 20 macam asam amino yaitu: glisin (Gly), alanin (Ala), valin (Val), leusin (Leu), isoleusin (Ile), metionin (Met), triptofan Trp), phenilalanin (Phe), prolin (Pro), serin (Ser), treonin (Thr), cistein (Cys), tirosin (Tyr), asparagin (Asp), glutamin (Glu), asam aspartat (Asp), asam glutamin (Glu), lisin (Lys), arginin (Arg), histidin (His). Lemak dapat diklasifikasi menjadi: lipida sederhana, ester asam lemak, lipida majemuk, dan lain-lain. Nukleotida merupakan monomer asam nukleat. Asam nukleat terdiri atas: basa nitrogen, asam fosfat, dan gula.

E. Evaluasi

1. Apa yang Anda ketahui tentang karbohidrat? Jelaskan!
2. Apa yang Anda ketahui tentang protein? Jelaskan!
3. Apa yang Anda ketahui tentang lemak? Jelaskan!
4. Apa yang Anda ketahui tentang asam nukleat? Jelaskan!

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

BAB IV

ENZIM

A. Tujuan Pembahasan

Melalui menelaah isi BAB ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan tentang pengertian enzim dengan benar.
2. Menguraikan sifat-sifat enzim dengan benar.
3. Menjelaskan tentang model sisi aktif dengan benar.
4. Menjelaskan tentang klasifikasi enzim dengan benar.
5. Menguraikan faktor-faktor yang mempengaruhi aktivitas enzim dengan benar.
6. Menjelaskan pengertian tentang koenzim dan kofaktor dengan benar.

B. Pengertian Enzim

Enzim adalah suatu protein yang mempunyai struktur tiga dimensi tertentu yang mampu mengatalisis reaksi biologik (aktivitas biokatalitik). Wahyuni (2014) menambahkan bahwa aktivitas biokatalisis yaitu mempercepat reaksi biokimia, tidak mengalami perubahan selama reaksi, tetapi berubah kembali setelah reaksi selesai. Lebih dari 2000 jenis enzim, masing-masing dapat mengatalisis reaksi kimia yang berbeda, telah ditemukan di dalam berbagai bentuk kehidupan. Adugna et al. (2014) menambahkan bahwa enzim adalah katalis protein untuk reaksi kimia dalam sistem biologis.

Enzim menaikkan laju reaksi karena dengan adanya enzim maka reaksi yang terjadi akan mempunyai energi aktivasi lebih rendah dari reaksi biasanya. Kondisi ini dapat disebabkan oleh energi bebas dari satu atau lebih reaksi antara yang tidak stabil dan lebih rendah. Campbell et al.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

(2008) menjelaskan bahwa enzim adalah makromolekul yang bekerja sebagai katalis (*catalyst*), agen kimia yang mempercepat reaksi tanpa ikut terkonsumsi oleh reaksi.

Keseluruhan enzim (holoenzim) mempunyai dua bagian utama, yaitu bagian protein (apoenzim) dan bagian nonprotein (koenzim). Apoenzim merupakan suatu polipeptida yang mempunyai struktur kuartener atau struktur tersier dengan urutan dan komposisi asam amino tertentu dan rantai polipeptida tersebut distabilkan oleh ikatan kimia yang terjadi yang dari gugus samping yang terdapat dalam asam aminonya. Ikatan kimia yang terjadi ialah ikatan sulfide, ikatan hidrogen, dan ikatan Van der Waals.

C. Sifat-Sifat Enzim

Sifat-sifat enzim adalah sebagai berikut:

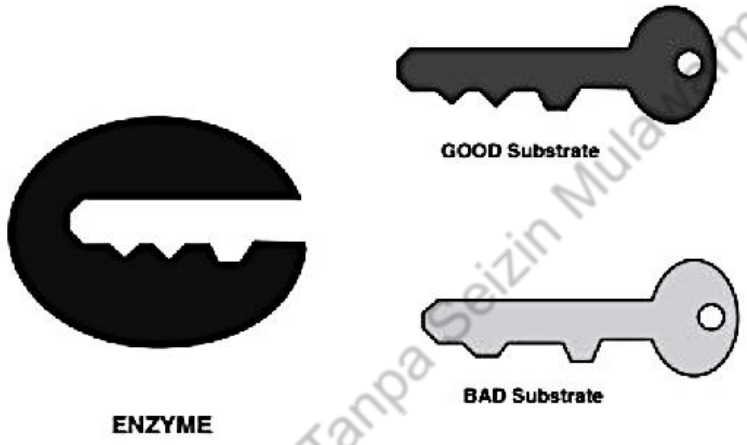
1. Enzim merupakan biokatalisator yang mempercepat jalannya reaksi tanpa ikut bereaksi.
2. Enzim bersifat termolabil (tidak tahan panas).
3. Enzim merupakan senyawa protein, sehingga sifat protein masih melekat pada enzim.
4. Enzim dibutuhkan dalam jumlah sedikit, sebagai biokatalisator, reaksinya menjadi sangat cepat dan berulang
5. Umumnya enzim bekerja mengatalisis reaksi satu arah, meskipun ada yang mengatalisis reaksi dua arah
6. Umumnya enzim tidak dapat bekerja tampa adanya suatu zat nonprotein tambahan yang disebut kofaktor.
7. Terkait dengan spesifikasi reaksi enzimatis dan substrat, Wayhuni (2017) menjelaskan bahwa mekanisme kerja enzim bersifat sangat spesifik. Hal ini berlaku tidak hanya tipe reaksi yang dikatalisis (spesifitas reaksi), tetapi juga sifat reaktan (substrat) yang terlibat. Enzim A mengatalisis pemutusan 1 jenis ikatan dan hanya terjadi apabila struktur substrat tepat. Enzim B memiliki spesifitas reaksi yang rendah, namun spesifitas substrat yang tinggi. Sedangkan enzim C, dengan spesifitas reaksi dan substrat yang rendah jarang dijumpai.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

8. Pembentukan kompleks enzim-substrat (E-S); kemampuan katalisis enzim diawali dengan pembentukan *transition state* dalam kompleks enzim-ubstrat. Substrat akan terikat pada region spesifik dari enzim yang disebut sisi aktif (*active site*). Model sisi aktif pada interaksi/komples enzim-substrat dibagi 2, yaitu.

a. Model Lock and Key
   - Model ini diajukan oleh Emil Fisher
   - Sisi aktif pada enzim yang belum terikat komplementer dengan bentuk dari substrat

Gambar 18 menunjukkan *model lack and key*.

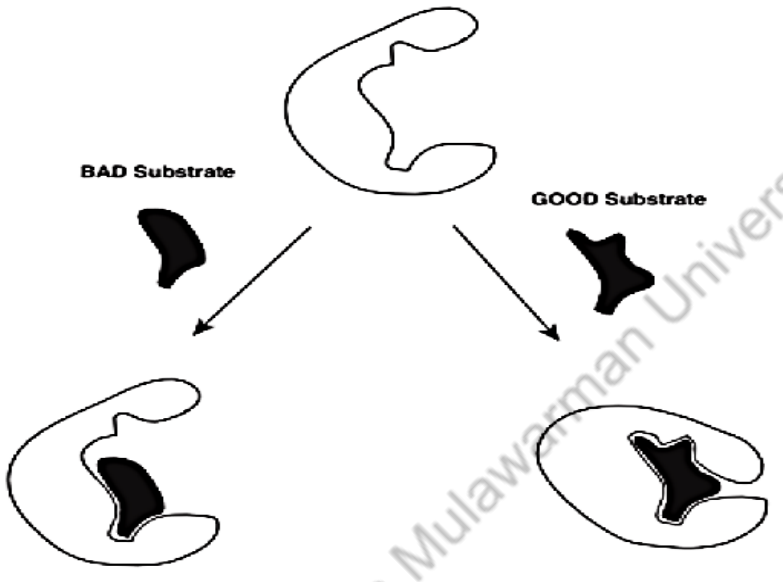


Gambar 18. Model *lack and key*
Sumber: Wahyuni (2017)

b. Model *Induced Fit*
   - Model ini diajukan oleh Daniel Koshland.
   - Ketika substrat terikat pad enzim, maka susbstrat akan memicu perubahan konformasi dari enzim.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

Gambar 19 menunjukkan model *induced fit.*



Gambar 19. Model *Induced Fit*
Sumber: Wahyuni (2017)

D. Klasifikasi Enzim

Murray et al. (2002) menjelaskan bahwa nama-nama yang sering digunakan untuk kebanyakan enzim, menjelaskan tipe reaksi yang dikatalisis diikuti oleh akhiran –ase. Contohnya: dehidrogense (mengeluarkan atom-atom hidrogen), proteinase (menghidrolisis protein), dan isomers (mengatalisis tata ulang dalam konfigurasi). Jika diperlukan ditambahkan penanda alfanumerik untuk menunjukkan berbagai bentuk suatu enzim (Misalnya *RNA* polymerase, protein kinase). Arbianto (1993), Murray et al. (2002) menjelaskan bahwa, enzim dapat dikelompokkan berdasarkan tipe reaksinya, yaitu.

1. Oksidoreduktase, katalis reaksi redoks, substrat yang satu tereduksi sedangkan substrat yang lain teroksidasi.
2. Transferase, katalis pemindahan sebuah gugus dari substrat ke substrat lainnya.
3. Hidrolase, katalis reaksi hidrolisis suatu substrat.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

4. Liase, katalis reaksi eliminasi sebuah gugus dari substrat sehingga terbentuk ikatan rangkap.
5. Usinerase, katalis reaksi isomerasi.
6. Ligase, katalis reaksi penggabungan dua molekul dengan bantuan ATP atau sumber energi lainnya.

E. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Aktivitas Enzim

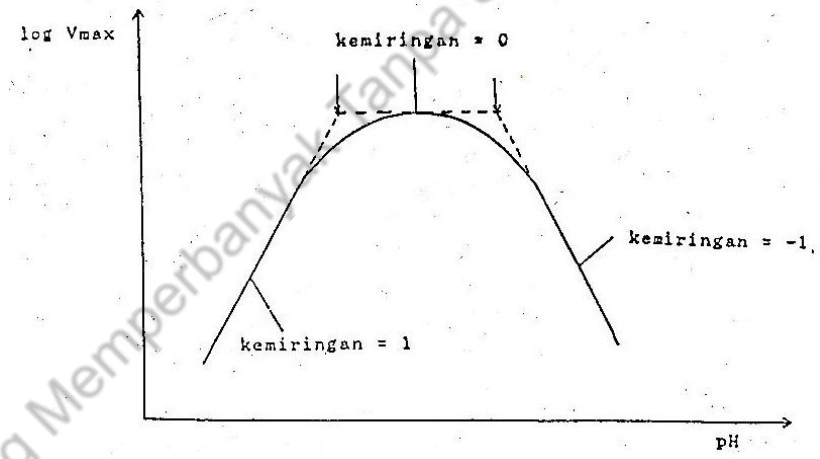
Aktivitas enzim dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor antara lain sebagai berikut.

1. Kadar Asam (pH)

Arbianto (1993) menjelaskan bahwa pengaruh pH terhadap aktivitas enzim adalah.

a. Mengaktifkan protein di luar daerah pH tertentu.
b. Perubahan posisi kesetimbangan reaksi, jika H^+ berperan sebagai reaktan atau produk dalam persamaan dalam keseluruhan.
c. Ionisasi gugus dalam substrat.
d. Perubahan keadaan ionisasi rantai samping asam amino dalam enzim.

Gambar 20 berikut, menunjukkan pengaruh pH terhadap aktivitas enzim



Gambar 20. Pengaruh pH terhadap aktivitas enzim
(Sumber: Arbianto, 1993)

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

Wahyudiati (2017) menjelaskan bahwa seperti protein, enzim juga bekerja dipengaruhi oleh derajat keasaman lingkungan. Enzim bekerja pada pH tertentu yang disebut pH optimum. Derajat keasaman optimal bagi kerja enzim umumnya mendekati pH netral, sekitar 6 -8. Di luar rentang tersebut, kerja enzim dapat terganggu bahkan dapat terdenaturasi.

2. Temperatur

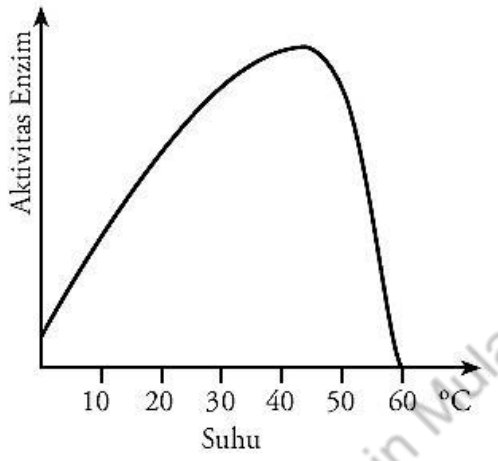
Arbianto (1993) menjelaskan bahwa banyak reaksi katalis enzim mengikuti persamaan Arrhenius normal untuk ketergantungan laju reaksi terhadap temperatur. Suatu energi aktivasi yang pasti untuk reaksi dapat diperoleh. Energi aktivasi tersebut diharapkan lebih rendah daripada energi aktivasi untuk reaksi nonkatalis. Wahyudiati (2017) menambahkan bahwa enzim terbuat dari protein, sehingga enzim dipengaruhi oleh suhu. Suhu mempengaruhi gerak molekul. Setiap enzim memiliki suhu optimal, dimana enzim memiliki aktivitas maksimal. Pada suhu jauh di atas suhu optimal menyebabkan enzim terdenaturasi, mengubah bentuk, struktur, dan fungsinya. Pad suhu jauh di bawah suhu optimal, misalnya pada 0^oC, enzim tidak aktif. Enzim pada manusia, bekerja optimal pada 35 - 40^oC. Mendekati suhu normal tubuh. Adapun bakteri yang hidup di air panas memiliki enzim yang bekerja optimal pada 70^oC.

Ada beberapa komplikasi dalam studi reaksi katalisis enzim, antara lain.

a. Pada kondisi di atas temperatur tertentu, molekul enzim menjadi terurai. Dengan demikian bentuk tiga dimensi dari sisa katalitik akan hilang. Laju pada saat proses ini, terjadi umumnya bergantung pada pH, konsentrasi substrat, kekuatan ionik, dan sebagainya. Untuk banyak enzim, inkubasi pada temperatur di atas sekitar 323^oK (50^o) dapat menyebabkan denaturasi; akan tetapi beberapa enzim (misalnya yang berasal dari bakteri termofilik) stabil pada temperatur yang jauh lebih tinggi. Umumnya substrat sedikit melindungi enzim terhadap inaktivasi oleh panas.
b. Dalam serangkaian reaksi-reaksi (seperti reaksi-reaksi katalis enzim multitahap) dengan energi aktivasi yang berbeda, dapat terjadi adanya perubahan kenaikan laju reaksi terhadap kenaikan temperatur. Laju reaksi dengan energi aktivasi lebih rendah, sensitif terhadap temperatur, dan pada temperatur cukup tinggi akan menjadi

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

tahap reaksi yang lambat. Situasi ini akan menghasilkan perubahan kemiringan dari grafik Arrhenius pada temperatur tertentu. Gambar 10 menunjukkan pengaruh temperatur/suhu terhadap aktivitas enzim. Gambar 21 menunjukkan pengaruh suhu terhadap aktivitas enzim,



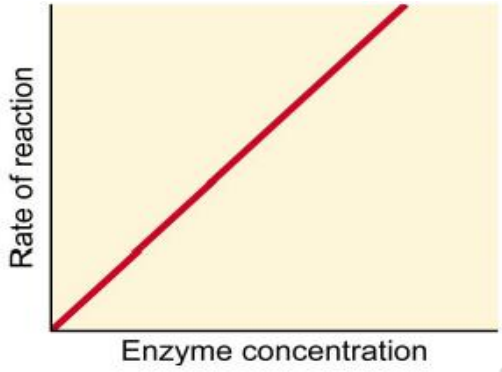
Gambar 21. Pengaruh temperatur/suhu terhadap aktivitas enzim (https://2.bp.blogspot.com/-KQKSkqiU--g/UKxV7k4kG7I/AAAAAAAAA9k/RJpFSvxRT7w/s1600/Grafik+pengaruh+suhu+terhadap+aktivitas+enzim.jpg)

c. Enzim mungkin berada dalam dua intercorvertible, bentuk aktif yang mempunyai energi aktivasi berbeda.

3. Konsentrasi enzim

Penambahan jumlah enzim yang terus-menerus meningkatkan produktivitas enzim. Sebaliknya, pengurangan enzim dalam suatu jalur metabolisme, menurunkan produktivitas enzim. Pada konsentrasi enzim yang meningkat maka jumlah absorbsi enzim terhadap substrat akan berjalan lebih baik dan naik hingga keadaan optimumnya (Ganda & Hafidawati, 2014). Gambar 22 menunjukkan pengaruh konsentrasi enzim terhadap aktivitas enzim.

Dilarang memperbanyak tanpa izin Mulawarman University Press



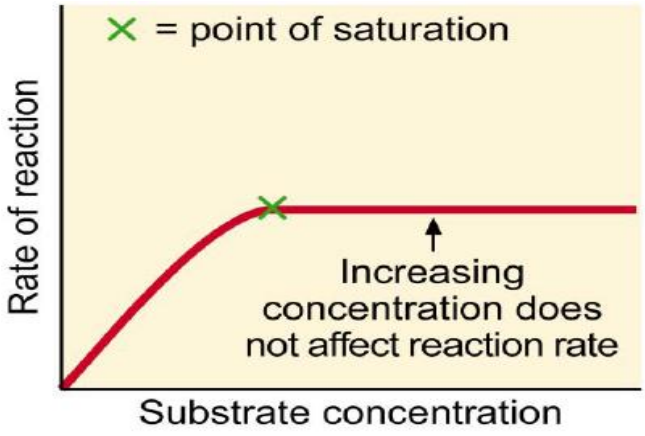
Gambar 22. Pengaruh koonsentrasi enzim terhadap aktivitas enzim
Sumber: Ischak dkk 2017

Wahyudiati (2017) menjelaskan bahwa pada reaksi dengan konsentrasi enzim yang jauh lebih sedikit daripada substrat, penambahn enzim akan meningkatkan laju reaksi. Peningkatan laju reaksi ini terjadi secara linier. Dengan kata lain, kecepatan reaksi enzimatis berbanding lurus dengan konsentrasi enzim. Akan tetapi, jika konsentrasi enzim dan substrat sudah seimbang, laju reaksi akan konstan.

4. Konsentrasi substrat

Pada awal-awal reaksi, penambahan jumlah substrat, meningkatkan produktivitas enzim. Namun, jika penambahan substrat yang terus-menerus, menimbulkan kejenuhan pada enzim sebagai biokaralisator, sehingga produktivitasnya juga menurun. Perubahan konsentrasi substrat atau pH lingkungan akan mengakibatkan aktivitas enzim ikut mengalami perubahan (Ganda & Hafidawati, 2014). Gambar 23 menunjukkan pengaruh konsentrasi substrat terhadap aktivitas enzim.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press



Gambar 23. Pengaruh konsentrasi substrat terhadap aktivitas enzim
Sumber: Ischak dkk., 2017

5. Inhibitor enzim

Banyak inhibitor enzim berikatan dengan enzim melalui interaksi lemah yang berarti inhibisi ini bersifat dapat balik. Beberapa inhibitor dapat balik menyerupai molekul substrat dan berkompetisi untuk bisa memasuki situs aktif. Peniru-peniru ini disebut inhibitor kompetitif, menurunkan produktivitas enzim dengan cara menghalangi substrat memasuki situs aktif. Jenis penghambatan ini dapat diatasi dengan meningkatkan konsentrasi substrat sehingga begitu situs aktif kosong, ada lebih banyak molekul substrat daripada molekul inhibitor. Sebaliknya, inhibitor nonkompetitif, tidak berkompetitif secara langsung dengan substrat untuk berikatan dengan situs aktif enzim. Sebagai gantinya, inhibitor jenis ini reaksi enzimatik dengan cara berikatan dengan bagian lain dari enzim. Enzim berikatan dengan substrat, membentuk kompleks enzim-substrat (*enzime-substrat compleks*). Ketika enzim dan substrat bergabung, kerja kalalitik enzim mengubah substrat menjadi produk reaksi. Gambar 24 menunjukkan hambatan kompetitif dan nonkompetitif.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

(a) (b)

Gambar 24. (a): Hambatan kompetitif, (b) Hambatan nonkompetetif
Sumber: Ischak dkk., 2017

F. Koenzim dan Kofaktor

Ada enzim membutuhkan suatu komponen lain untuk dapat berfungsi sebagai katalis. Komponen ini secara umum disebut kofaktor. Kofaktor dapat berupa satu atau lebih ion inorganik seperti Zn^{2+} atau Fe^{2+}. Kofaktor ini dapat dibagi dalam tiga kelompok, yaitu: (a) gugus prostetik, (b) koenzim, (3) aktivator. Yang dimaksud dengan gugus prostetik ialah kelompok kofaktor yang terikat pada enzim dan tidak mudah terlepas dari enzimnya. Suatu koenzim adalah molekul organik terkecil, tahan terhadap panas, yang mudah terdisosiasi dan dapat dipisahkan dari enzimnya, dengan cara dialisis. Contoh koenzim adalah NAD, NADP, asam tetrahidrofsofat, tiamin pirofosfat (TPP), dan ATP. Enzim bersama dengan koenzimnya atau ion-ion logam (kofaktor) disebut holoenzim. Bagian protein dari enzim sendiri tanpa kofaktornya disebut apoenzim. Aktivator ialah ion-ion logam yang dapat terikat atau mudah terlepas dari enzim. Contoh aktivator logam adalah K^{+}, Mn^{2+}, Mg^{2+}, CU^{2+}, Zn^{2+} (Ischak dkk., 2017).

Wahyuni (2017) menjelaskan bahwa kofaktor dapat dibedakan menjadi dua kelompok: molekul organik kecil dan logam. Kofaktor dapat berupa satu atau lebih ion inorganic seperti Zn^{2+} atau Fe^{2+} atau suatu

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

molekul organik kompleks yang disebut koenzim. Enzim bersama dengan koenzimnya atau ion-ion logam (kofaktor) disebut holoenzim. Bagian protein dari enzim sendiri tanpa kofaktornya disebut apoenzim.

Terkait denegan isoenzim, Wahyuni (2017) menjelaskan bahwa isoenzim (isozim) adalah bentuk berbeda dari suatu enzim yang mengatalisis reaksi yang sama, tetapi memiliki sifat-sifat fisik dan kinetik berbeda. Contoh dari isoenzim adalah lactase dehydrogenase (LDH) yang mengatalisis perubahan reversible piruvat menjadi laktat dengan adanya koenzim NADPH. Enzim LDH merupakan suatu tetramer dari 2 tipe subunit berbeda yaitu H dan M yang berbeda urutan asam aminonya.

G. Ringkasan

Enzim merupakan sebuah biokatalisator. Sifat-sifat enzim adalah: merupakan biokatalisator, bersifat termolabil, merupakan senyawa protein, dibutuhkan dalam jumlah sedikit, bekerja mengatalisis satu arah tetapi ada juga yang bekerja dua arah, umumnya tidak bekerja tanpa adanya suatu zat nonprotein. Enzim diklasifikasi menjadi: oksidoreduktase, transferase, hidrolase, liase, usinerase, ligase. Faktor-faktor konsentrasi substrat, konsentrasi enzim, dan inhibitor. Kofaktor adalah komponen yang umumnya senyawa anorganik yang bekerja bersama-sama enzim. Jika kofaktor itu berupa senyawa organik, maka dinamakan koenzim.

H. Evaluasi

1. Jelaskan tentang pengertian enzim!
2. Uraikan sifat-sifat enzim!
3. Jelaskan tentang model sisi aktif enzim!
4. Jelaskan tentang klasifikasi enzim!
5. Uraikan faktor-faktor yang mempengaruhi aktivitas enzim!
6. Jelaskan pengertian tentang koenzim dan kofaktor!

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

BAB V

OKSIDASI BIOLOGIS DAN PRODUKSI ATP

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

A. Tujuan Pembahasan

Melalui menelaah isi BAB ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan pengertian oksidasi dengan benar.
2. Menjelaskan pengertian reduksi dengan benar.
3. Menjelaskan komponen penyusun ATP dengan benar.

B. Reaksi Reduksi dan Oksidasi

Ngili (2009) menjelaskan bahwa reaksi kimia yang melibatkan proses oksidasi dan reduksi (redoks) merupakan inti dari metabolisme. Energi yang berasal dari oksidasi karbohidrat digabungkan untuk sintesis Adenosin Tri-Phosphat (ATP) melalui serangkaian reaksi redoks, yakni rantai transpor electron mitokondria. Lebih dari itu, sebagian besar kehidupan di bumi tergantung pada serangkaian reaksi redoks dalam fotosintesis, yakni proses penggunaan energi matahari untuk menghasilkan ATP dan O_2, serta menyintesis karbohidrat dari CO_2.

a. Reaksi oksidasi: reaksi suatu zat kehilangan elektronnya.
b. Reaksi reduksi: reaksi suatu zat menerima ekelstron.
c. Setengah reaksi: langkah oksidasi arau reduksi dalam reaksi redoks.

Reaksi redoks bisa dipelajari dengan menggunakan sel elektrokimia. Sel elektrokimia untuk reaksi kimia diperlihatkan pada Gambar 14. Elektroda CU dan Zn dicelupkan ke dalam larutan ion yang sesuai, dengan jembatan garam (mengandung KCl pekat) mempertahankan kontak lisntrik antara kedua larutan. Elektro akan mengalir dari bagian setengah sel Zn menuju ke bagian setengah sel Cu jika Zn dioksidasi menjadi Zn^{2+},

serentak dengan redukasi Cu^{2+}menjadi Cu pada bagian setengah sel Cu. Nilai E untuk reaksi ini bisa ditentukan dengan mengukur beda potensial (dalam volt) yang harus diberikan pada sel untuk mencegah aliran elektron.

Reaksi oksidasi, reaksi suatu zat kehilangan elektronnya. Reaksi reduksi, reaksi suatu zat menerima elsktron. Setengah reaksi, langkah oksidasi atau reduksi dalam reaksi redoks. Selain melalui pertukaran energi antar substrat dalam suatu reaksi, energi dapat pula dipertukarkan melalui perpindahan (transfer) antara pengoksida dan pereduksi atau reaksi redoks. Pereduksi adalah senyawa yang akan memberikan electron pada senyawa yang pengoksida, dengan demikian senyawa pengoksida akan menyerap electron dari pereduksi. Kemampuan (potensial) untuk menarik atau melepaskan electron suatu senyawa berbeda-beda. Hidrogen mampu berdisosiasi sebagai berikut.

$$H_2 ================ 2H^+ + e^-$$

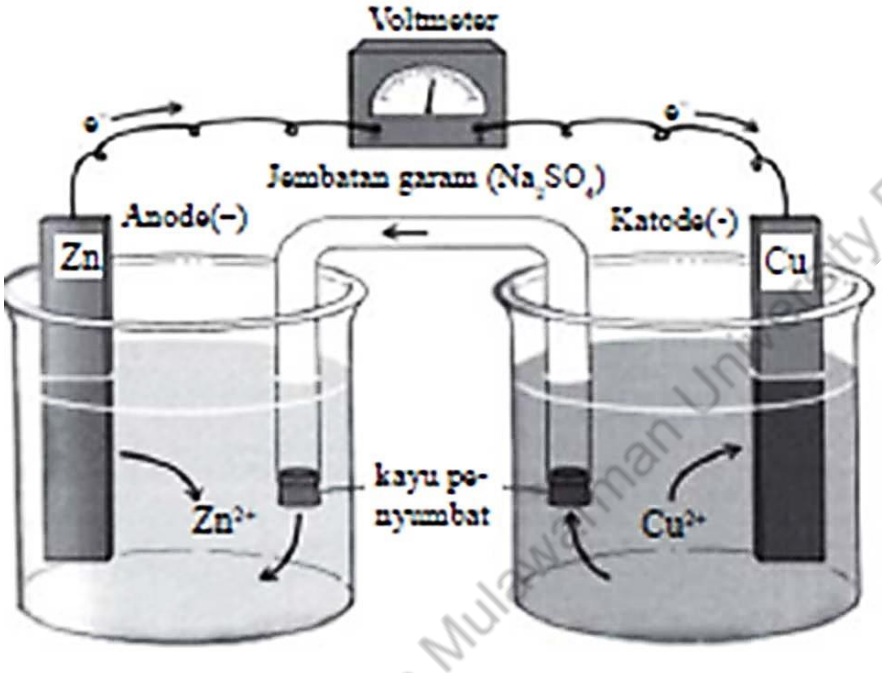
Perubahan energi bebas baku (ΔG^o) ada hubungannya dengan potensial baku (ΔE^o), seperti dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$\Delta G^o = -F.\Delta E^o$$

n = jumlah electron yang dipindahkan
F = tetapan Faraday (23,063 kkal/volt)

Reaksi redoks dapat dipelajari dengan menggunakan sel elektromia. Sel elekrokimia untuk reaksi kimia, dapat dilihat pada Gambar 25 berikut.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seijin Mulawarman University Press



Gambar 25. Sel elektrokimia
(https://noviakimiapasca.files.wordpress.com/2011/06/sel-volta.jpg?w=300&h=181:, diakses tanggal: 16 Juni 2018)

C. Produksi Energi

Energi dalam bentuk Adenosin Tri-Phosphat (ATP) terdapat dalam semua sel hidup dengan konsentrasi 10^{-3} ml L^{-1} dari cairan sel. Molekul ATP terdiri atas tiga bagian, yakni: adenin, D-ribosa, dan tiga gugus fosfat dalam ikatan ester. Senyawa analog yang mengadung satu atau dua gugus fosfat, dinamakan AMP dan ADP. ATP mempunyai kecenderungan yang kuat untuk terhidrolisis menjadi ADP dan fosfat, hal ini diramalkan dari termodinamika.

$$ATP^{+} + H_2O \rightarrow ADP^{3-} + HPO4^{2-} + H^{+}$$

Perubahan entalpi untuk reaksi hidrolisis ATP adalah disukai karena 3 hal, yaitu.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

a. Tolakan elektrosatik antara muatan-muatan negatif dalam ATP melebihi tolakan yang sama dalam produk reaksi.
b. Produk reaksi distabilkan oleh resonansi.
c. Entalpi pelaruna produk lebih daripada besar daripada pelarutan ATP. Perubahan entropi untuk reaksi ini disukai, karena adanya pelepasan gugus fosfat. Hal ini menyiratkan bahwa hidrolosis ATP tergantung pada suhu. ATP sering dinyatakan kaya energi atau mengadung ikatan fosfat ester berenergi tinggi.

Terkait dengan mekanisme sintesis ATP, Ngili (2019) menjelaskan bahwa pelajaran yang utama dari hipotesis kemiosmotik adalah bahwa gradien elektrokimia transmembran berperan sebagai intermediet dalam transfer energi pada ATP. Energi ini tersedia dari perbedaan potensial redoks antara pasangan NAD^+/NADH dan pasangan $O_2/2H_2O$ dalam rantai respirasi. Oksidasi NADH menghasilkan rpoduksi seitar 3 molekul ATP per atom O yang terduksi menjadi air (rasio P/O sebesar 3). Pada sisi lain, oksidasi suksinat hanya menghasilkan dua molekul ATP, yakni rasio P/O sebesar 2.

D. Ringkasan

Reaksi oksidasi adalah reaksi yang kehilangan elektronnya. Reaksi reduksi adalah reaksi yang menerima electron. Komponen penyusun ATP adalah adenine, D-ribosa, dan tiga gugus fosfat dalam ikatan ester.

E. Evaluasi

1. Jelaskan pengertian oksidasi!
2. Jelaskan pengertian reduksi!
3. Jelaskan komponen penyusun ATP!

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

BAB VI

METABOLISME

A. Tujuan Pembahasan

Melalui menelaah isi BAB ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menjelaskan pengertian metabolisme dengan benar.
2. Menguraikan proses metabolisme karbohidrat dengan benar.
3. Menguraikan proses metabolisme protein dengan benar.
4. Menguraikan proses metabolisme lemak dengan benar.
5. Menjelaskan kelainan-kelainan metabolisme dengan benar.

B. Pengertian Metabolisme

Semua organisme hidup mentransformasikan energi yang diambil dari sekelilingnya. Energi ini dibutuhkan untuk sintesis makromolekul yang akan digunakan untuk pertumbuhan dan diferensiasi organisme tersebut. Transformasi ini dicapai melalui reaksi sejumlah besar enzim yang mengatalisis jaringan kompleks kumpulan reaksi kimia yang dikenal sebagai metabolisme.

Ngili (2019) menjelaskan bahwa metabolisme adalah seluruh rangkaian reaksi kimia yang dilakukan oleh sel hidup. Metabolit merupakan molekul terkecil yang merupakan intermediet dalam degradasi atau biosintesis biopolimer. Reaksi katabolik mendegradasi molekul untuk melepaskan molekul lebih kecil seperti juga energi. Makhluk hidup menggunakan energi untuk mendorong reaksi kimia, yang menyintesis molekul yang diperlukan untuk menjaga sel, pertumbuhan, dan reproduksi. Organisme juga memerlukan energi untuk melakukan kerja sel lain, seperti *transport* lintas membran, sel atau pergerakan jaringan, dan bahkan regulasi proses metabolit tertentu.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

C. Metabolisme Karbohidrat

Karbohidrat adalah kelompok senyawa yang mengandung unsur C, H, dan O. Senyawa-senyawa karbohidrat memiliki sifat peresduksi, karena adanya gusus karbionil dalam aldehid atau keton. Senyawa karbohidrat memiliki tiga sampai tujuh atom karbon disebut monosakarida. Gabungan senyawa-senyawa monosakarida akan membentuk senyawa karbohidrat yang lebih besar. Ikatan penghubung antara dua buah monosakarida disebut ikatan glikosida.

Proses Katabolisme (Penguraian)

Wahyuni (2013) menjelaskan bahwa katabolisme dari masing-masing nutrien untuk menghasilkan energi utama (karbohidrat, lipid, dan protein) berlangsung secara bertahap. Proses katabolisme karbohidrat, diawali melalui proses glikolisis (penguraian satu mol glukosa menjadi dua molekul asam piruvat). Selanjutnya, setelah dihasilkan dua mol asam piruvat, reaksi selanjutnya dapat terjadi secara aerob maupun melalui jalur anaerob.

1. Glikolisis

Glikolisis merupakan suatu proses yang menyebabkan terjadinya konversi satu molekul glukosa menjadi dua molekul piruvat. Glikolisis merupakan yang tidak mensyaratkan adanya oksigen. Wayhuni (2017) menjelaskan bahwa reaksi ini dijabarkan oleh Embden Meyerhof dan Parnas sehingga disebut juga dengan jalur Embden-Meyerhof.

Glikolisis merupakan salah satu jalur utama untuk menghasilkan ATP dalam sitoplasma sel dan terjadi pada semua jenis sel. Peran setral glokolisis dalam metabolism energi berkaitan dengan kemampuannya menghasilkan ATP dengan dan tanpa oksigen. Oksidasi glukosa menjadi asam piruvat menghasilkan ATP dari fosforilasi tingkat substrat dan NADH. Kemudian piruvat dioksidasi menjadi CO_2 dalam siklus Crebs dan TP dihasilkan dari transfer electron ke oksigen dalam fosforilasi oksidatif. Meskipun begitu, apabila piruvat dan NADH dari glikolisis dikonversikan menjadi laktat (glikolisis anaerobik), ATP dapat dihasilkan tanpa adanya oksigen via fosforilasi tingkat substrat. Ngili (2009) menjelaskan bahwa glikolisis merupakan suatu proses yang menyebabkan terjadinya konversi satu molekul glukosa menjadi dua molekul piruvat. Gliklolisis merupakan

Dilarang memperbanyak Tanpa Seijin Muawanah University Press

jalur metabolisme primitive karena bekerja pada sel yang paling sederhana sekalipun dan tidak memerlukan oksigen.

Ngili (2009) menjelaskan bahwa jalur glikolisis memiliki lima fungsi utama dalam sel, yakni.

a) Glukosa diubah menjadi asam piruvat yang bisa dioksidari dalam siklus asam sitrat.
b) Banyak senyawa selain glukosa yang dapat memasuki jalur pada tahap intermediet.
c) Dalam beberapa sel, jalur ini dimodifikasi untuk memungkinkan sintesis glukosa.
d) Jalur ini mengandung intermediet-intermediet yang terlihat dalam reaksi metabolism alternatif.
e) Untuk setiap molekul glukosa yang dikonsumsi, dua molekul ADP difosforilasi oleh fosforilasi tingkat substrat untuk menghasilkan dua molekul ATP.

Persamaan reaksi kimia lengkap untuk glikolisis adalah.

$C_6H_{12}O_6$ (glukosa) + 2ADP + 2NAD^+ + 2P_i → 2$C_3H_4O_3$ (piruvat) + 2ATP + 2NADH + 2H^+ + 2H_2O

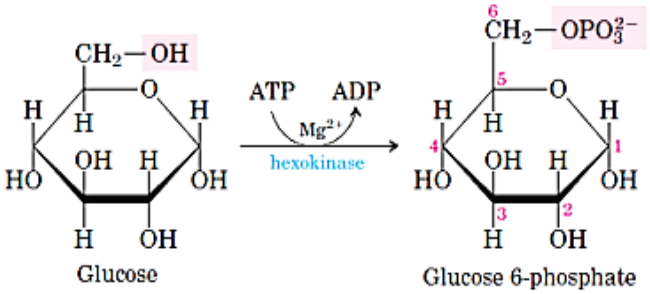
Tahap-tahap glikolisis adalah sebagai berikut.

Tahap I: Investasi energi

a) Glikolisis diawali dengan reaksi pembentukan senyawa glukosa 6-fosfat dari glukosa. Reaksi tersebut merupakan reaksi yang membutuhkan energi yang diambil dari pemutusan ikatan fosfat dari ATP.

   Reaksi ini dikatalisis oleh enzim heksokinase atau glukokinase. Gambar 26 menunjukkan reaksi perubahan glukosa menjadi glukosa 6-phosphat.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Malawarman University Press

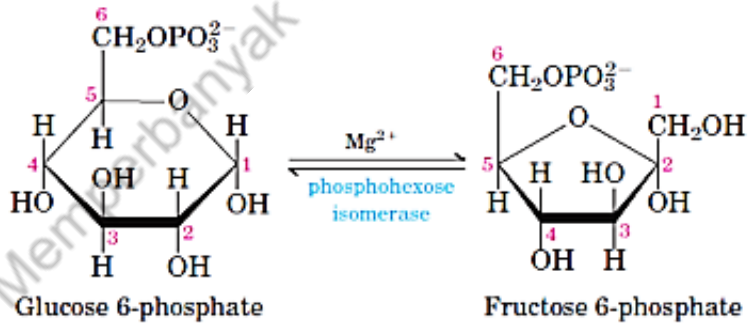


Gambar 26. Perubahan glikosa menjadi glukosa 6-phosphat (https://apayangdimaksud.com/wp-content/uploads/2020/05/glikolisis_langkah_1-400x161.png)

Heksokinase dapat ditemukan dalam semua sel organisme. Enzim ini memiliki spesifitas katalitik yang rendah. Hampir semua monosakarida dapat difosforilasi. Aktivitasnya dapat dihambat oleh produknya, yaitu glukosa-6-fosfat.

Glukokinase ditemukan di lever, memiliki spesifitas katalitik yang tinggi dan tidak dapat dihambat oleh glukosa-6-fosfat. Enzim ini aktif bila kadar glukosa tinggi di dalam darah.

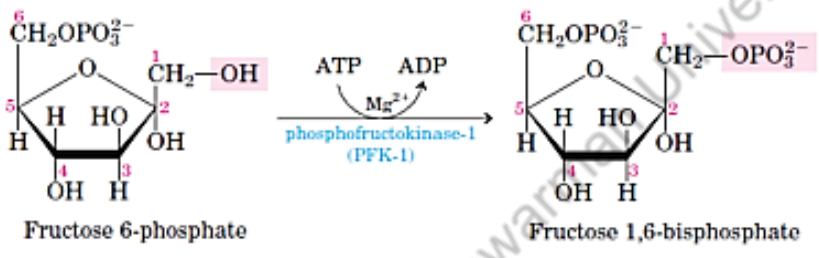
b) Isomerisasi glukosa 6-fosfat. Reaksi yang kedua adalah pembentukan isomer fruktosa 6-fosfat dari glukosa 6-fosfat. Reaksi ini dikatalisis oleh fosfoglukoisomerase. Gambar 27 menujukkan perubahan glukosa 6-phosphat menjadi fruktosa 6-phosphat.



Gambar 27. Perubahan glukosa 6-phospat menjadi fruktosa 6-phospat (https://apayangdimaksud.com/wp-content/uploads/2020/05/glikolisis_langkah_2-400x153.png)

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seijin Mulawarman University Press

c) Fosforilasi kedua. Reaksi fosforilasi fruktosa-6-fosfat menjadi fruktosa-1,6-bisfosfat oleh enzim fosfofruktokinase. Reaksi ini berjalan spontan dan merupakan *rate limiting step* pada proses glikolisis. Pada reaksi ini dibutuhkan 1 mol ATP dan diregulasi secara ketat. Fosfofruktokinase dapat dihambat oleh ATP. Gambar 28 berikut menunjukkan perubahan fructose-6-P + ATP → fructose-1,6-bi-P + ADP.

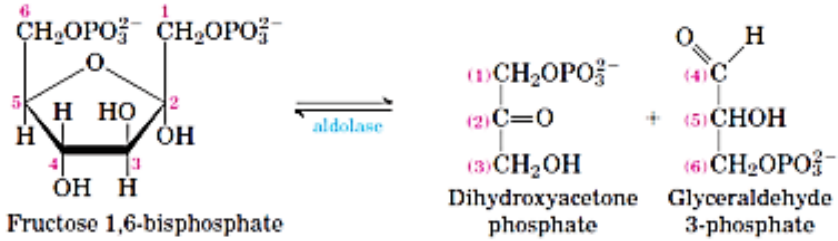


Gambar 28. Fruktosa-6-P + ATP → fruktosa-1,6-bisP + ADP (https://apayangdimaksud.com/wp-content/uploads/2020/05/glikolisis_langkah_3-400x115.png)

d) Reaksi pemutusan menjadi 2 triosafosfat
Reaksi ini dikatalisis oleh enzim aldolase dan terjadi pemutusan aldol yang merupakan kebalikan dari reaksi kondensasi aldol membentuk 2 molekul gliseraldehid 3-fosfat yang selanjutnya mengalami isomerisasi membentuk dihidroksiasetonfosfat. Reaksi isomerisasi ini dikatalisis oleh enzim triosefosfat isomerase.

e) Reaksi pemutusan menjadi 2 triosafosfat.
Reaksi ini dikatalisis oleh enzim aldolase dan terjadi pemutusan aldol yang merupakan kebalikan dari reaksi kondensasi aldol membentuk 2 molekul gliseraldehid 3-fosfat yang selanjutnya mengalami isomerisasi membentuk dihidroksiasetonfosfat. Reaksi isomerisasi ini dikatalisis oleh enzim triosefosfat isomerase. Gambar 29 berikut menunjukkan perubahan fruktosa 1,6-biphosphat menjadi dihidroksiasetonfosfat.

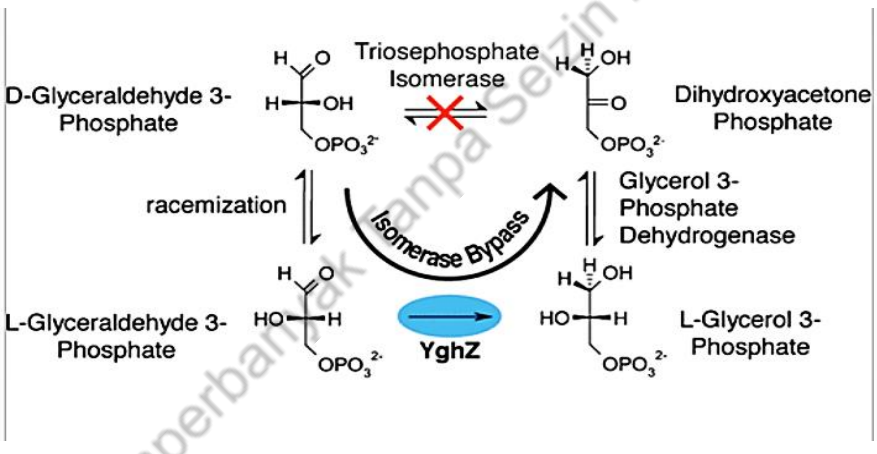
Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muawanah University Press



Gambar 29. Perubahan fruktosa 1,6-biphospat menjadi dihridroksiasetonfosfat (https://apayangdimaksud.com/wp-content/uploads/2020/05/glikolisis_langkah_4-400x116.png)

f) Isomerisasi triosafosfat

Isomerasi adalah molekul-molekul yang memiliki rumus kimia sama tetapi struktur atomnya berbeda. Isomerasi dapat terjadi pada isomerasi triosafosfat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 30 berikut.



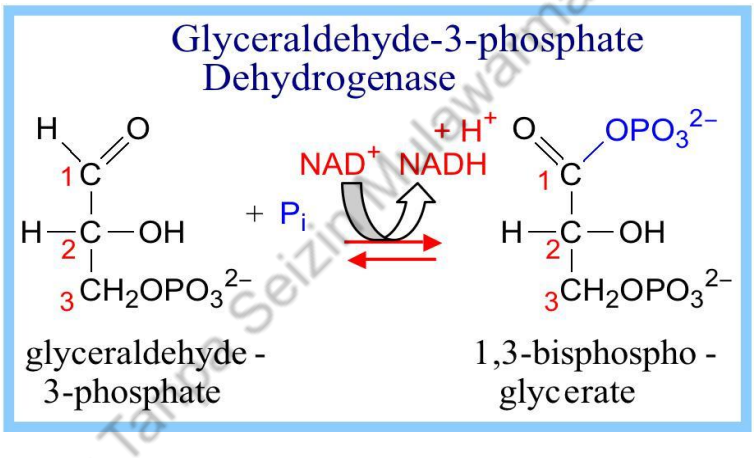
Gambar 30. Isomerasi triosafosfat (https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/bi801054v?src=recsys)

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

Hanya gliseraldehid-3-fosfat yang akan diteruskan dalam proses glikolisis sehingga dengan adanya reaksi isomerisasi ini memungkinkan proses glikolisis berjalan sempurna. Pada akhir tahap I glikolisis ini, dihasilkan 2 molekul gliseraldehid-3-fosfat dan membutuhkan 2 molekul ATP untuk setiap 1 molekul glukosa. Tahap II. Perubahan gliseraldehid-3-fofat sampai memasuki siklus asam sitrat (siklus Krebs)

g) Oksidasi gliseraldehid-3-fosfat

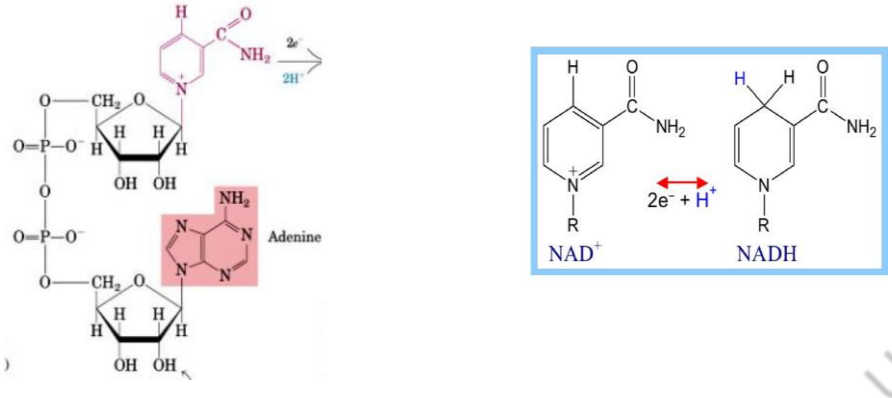
Reaksi ini dikatalisis oleh enzim gliseraldehid-3-fosfat dengan NAD^+ sebagai koenzimnya. Gambar 31 menunjukkan proses oksidasi gliseraldehid-3-fosfat menjadi 1,3-pisphospho-gliserat.



Gambar 31 Proses oksidasi gliserldehid-3-fosfat (https://lh3.googleusercontent.com/T0KX0O-sQk1RORr2E-fPnBAwkZHg6gyz5G1N72nbMJriVy0XHIlSKrDXGap0sfzLjWQHsg=s144)

Reaksi oksidasi ini terjadi penambahan gugus fosfat dan menghasilkan NADH. Pada tahap ini terbentuk pertama kali senyawa yang mengandung energi tinggi. Gambar 32 menunjukkan senyawa yang mengandung energi tinggi.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press



Gambar 32. Struktur bangun senyawa yang mengandung energi tinggi (https://lh3.googleusercontent.com/BiDYFMf3mI8EAIsH5bED1uMBtgRDXE33YkTl4L60TN_jQB56unTv_klEEZM3B6SnZO8K=s170)

Keterangan:

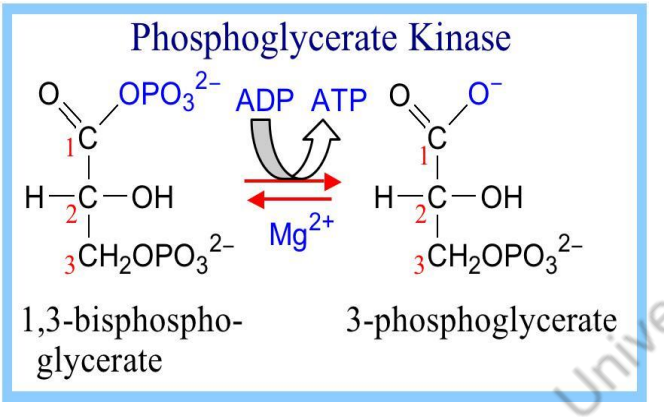
NAD^+ : Nukotinamid Adenin dinukleotida, bentuk teroksidasi

NADH : Nukotinamid Adenin dinuklotida, bentuk tereduksi

h) Transfer fosfat untuk membentuk ATP

Senyawa 1,3 bifosfogliserat merupakan senyawa berenergi tinggi yang selanjutnya gugus fosfat tersebut ditransfer untuk membentuk ATP yang dikatalisis oleh enzim fosfogliserat kinase dengan ko-faktor Mg^{2+}. Enzim ini mirip dengan heksokinase yang mengalami perubahan konformasi yang diinduksi oleh substrat. Reaksi ini bersifat reversible. Gambar 33 menunjukkan proses transfer fosfat untuk membentuk ATP.

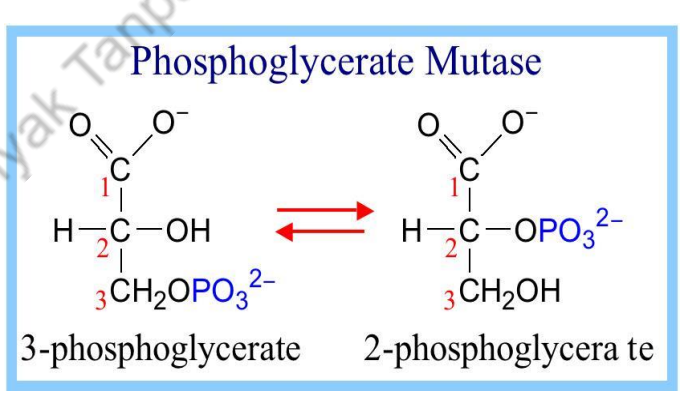
Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press



Gambar 33. Proses transfer fosfat untuk membentuk ATP (https://lh3.googleusercontent.com/dDkny12ef-t5nqImKLEwzjKxal0qhNfr7FjciWOclCyPUaa0-yyh2Tr50mCdKTUdKQCCfA=s150)

i) Perpindahan posisi gugus fosfat

Pada tahap ini terjadi reaksi perpindahan gugus fosfat pada 3-fosfogliserat yang berada pada posisi C-3 berpindah ke OH posisi C-2 yang dikatalisis oleh enzim fosfogliserat mutase. Reaksi ini menghasilkan 2-fosfogliserat. Gambar 34 menunjukkan proses perpindahan gugus fosfat.

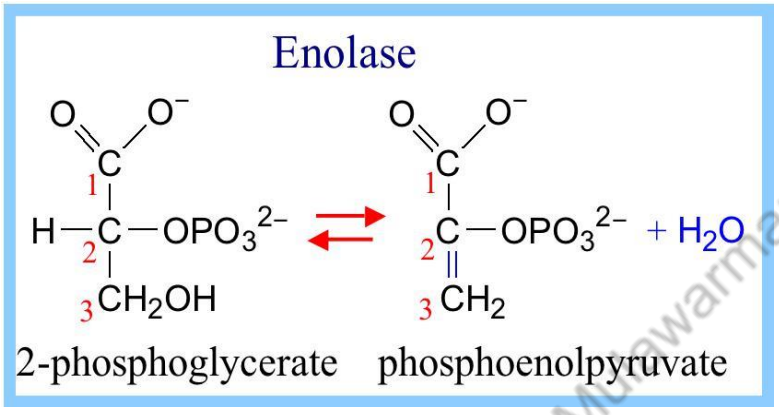


Gambar 34. Proses perpindahan gugus fosfat (https://lh3.googleusercontent.com/jI0r6ha6KjJFnZNNjunDbBHCVTbfNlS-ua6PiXdsHKDi7lziiNl4vh2tFOMHbVKJDUc6JA=s167)

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

j) Pembentukan senyawa berenergi tinggi kedua

Pembentukan senyawa ini dilakukan dengan dehidrasi yang dikatalisis oleh enzim enolase yang memiliki ko-faktor Mg^{2+}. Reaksi ini dapat dihambat oleh fluorida. Gambar 35 menujukkan proses pembentukan senyawa berenergi tinggi kedua.

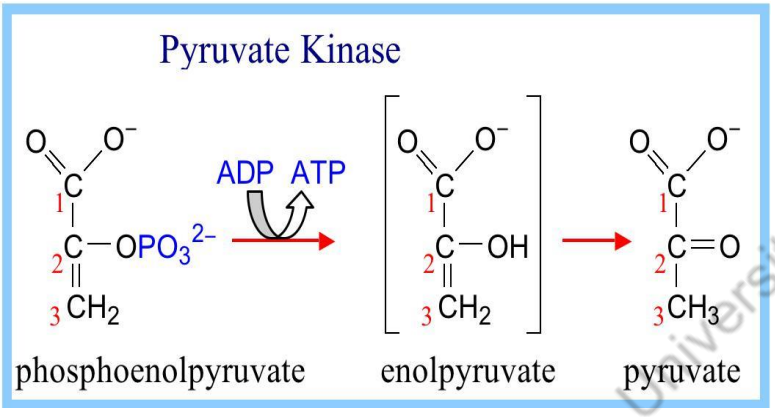


Gambar 35. Proses pembentukan senyawa berenergi tinggi kedua (https://pdfcoffee.com/makalah-glikolisis—pdf-free.html)

k) Pembentukan ATP akhir

Reaksi ini berjalan spontan dan terjadi transfer gugus fosfat dari fosfoenolpirufat ke ADP membentuk ATP. Pelepasan fosfat ion menyebabkan terjadinya ikatan enol yang tidak stabil sehingga akan terkonversi ke bentuk keto dan menjadi piruvat. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim piruvat kinase. Enzim ini memerlukan Mg^{+} sebagai ko-faktor. Piruvat merupakan hasil akhir glikolisis. Gambar 22 menunjukkan proses pembentuk ATP akhir. Gambar 36 menunjukkan proses pembentukan piruvat yang melepaskan ATP.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press



Gambar 36. Proses pembentukan piruvat yang melepaskan ATP (https://lh3.googleusercontent.com/Ugds9eMEQkIXcBd8EpvmtQsvybMiuiUWnuMDNnjVGtqfBUdDwS2HDXocFbAcFh7wqq06Nw=s170)

Ngili (2009) menjelaskan bahwa laju proses glokolisis dikendalikan dalam tiga tahap, yaitu.

a) Langkah 1, merupakan titik kontrol yang pertama, glukosa diubah menjadi glukosa 6-fosfat dengan enzim heksokinase.
b) Langkah 2, adalah titik kontrol kedua, yang melibatkan erubahan fruktosa 6-fosfat menjadi frukstoa 1,6-bifosfat dengan dikatalisis oleh fosfofruktokinase.
c) Langkah 3, merupakan titik kontrol ketiga, yang melibatkan perubahan fosfoenolpiruvat menjadi piruvat, yang dikatalisis oleh piruvat kinase.

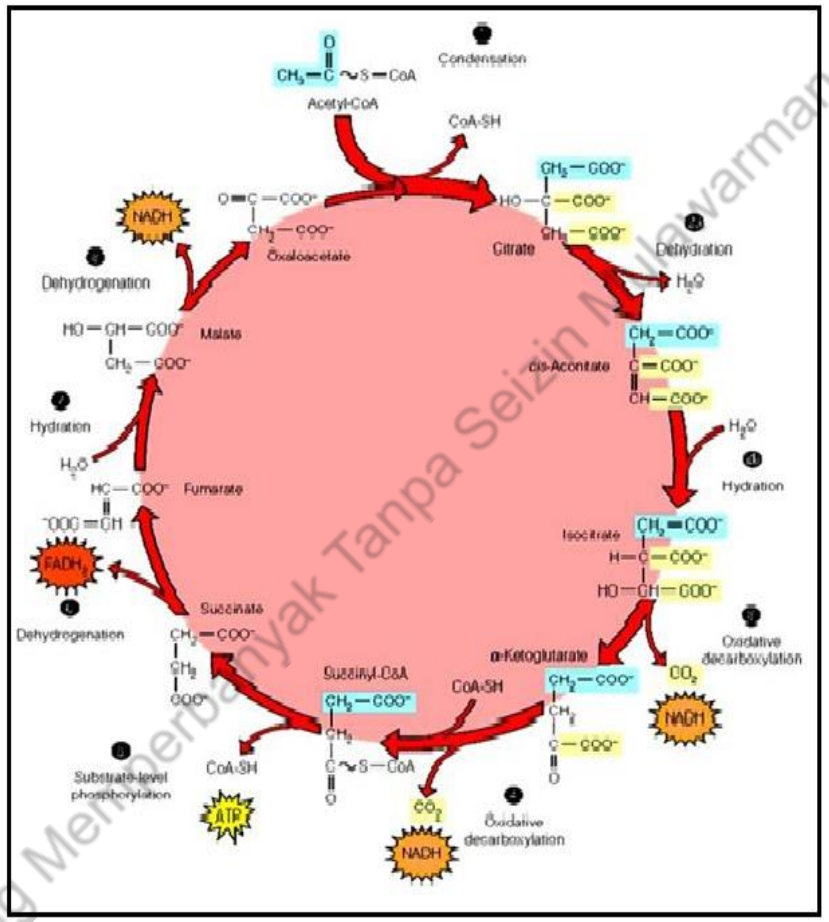
Produksi dua molekul piruvat dari satu molekul glukosa, terjadi dalam hampir semua sel. Proses ini mempunyai tiga karakteristik, yakni.

a) Tidak mensyaratkan oksigen
b) Dua molekul ADP difosforilasi oleh fosforilasi tingkat substrat.
c) Dua molekul NAD^+ direduksi.

Nasib piruval dalam sel tertentu, selanjutnya tergantung pada kondisi yang berkaitan dengan ketiga kriteria berikut: (1) ketersediaan oksigen untuk sel, (2) status energi sel, (3) mekanisme yang tersedia bagi sel untuk mengoksidasi NADH manjadi NAD^+.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

Kriteria yang lebih lanjut yang mengatur nasib piruva, yakni tipe sel tempat piruvat terbentuk, karena sel-sel tertentu seperti sel darah merah kurang mampu memetabolisme untuk melakukan oksidasi sempurna piruvat menjadi CO_2. Dalam suasana aerob, asam piruvat selanjutnya mengalami perubahan menjadi asetil Ko-A. Setelah mengalami perubahan menjadi Asetil Ko-A, asetil Ko-A selanjutnya memasuki silkus Krebs (atau yang dikenal juga sebagai siklus asam sitrat). Gambar 37 berikut menunjukkan lintasan siklus Kreb.



Gambar 37. Lintasan Siklus Krebs
(https://slideplayer.info/slide/13530613/)

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

Terkait dengan proses siklus Krebs, Purba dkk., (2021) menjelaskan bahwa proses ini diawali dengan molekul piruvat yang dihasilkan pada proses glikolisis diangkut melintasi membran mitokondria dan dibawa dan dibawa ke dalam matriks mitokondria. Di dalam matriks tersebut piruvat dimetabolisme oleh enzim dalam mekanisme yang disebut siklus Krebs. Siklus Krebs disebur pula dengan siklus asam sitrat atau siklus asam trikarboksilat (*TCA*). Moleklul berenergi tunggi seperti ATP, $NADH_2$, dan $FADH_2$, dihasilkan selama proses siklus Krecbs. $NADH_2$ dan $FADH_2$, mengalirkan 64ellitus melalui rantai *transport* electron di mitokondria untuk menghasilkan lebih banyak molekul ATP. Molekul piruvat 3 karbon yang dihasilkan selama glikolisis bergerak dari sitoplasma ke matriks mitokondria, di mana enzim piruvat dehydrogenase mengubah piruvat menjadi molekul dua karbon asetil koenzim A (aseltil CoA).

Terkait dengan langkah-langkah siklus Krebs, Ngili (2019) menjelaskan bahwa ada tiga langkah siklus Krebs, yaitu:

Langkah 1: Oksidasi molekul bahan bakar menjadi asetil CoA.

Sumber energi utama yakni glukosa yang diubah oleh glikolisis menjadi piruvat. Piruvat didehidrogenase (suatu kompleks toga enzim dan lima koenzim) lalu mengatalisis piruvat menggunakan NAD^+ yang direduksi menjadi NADH) untuk membentuk asetil CoA dan CO_2.

Langkah 2: Siklus asam sitrat (siklus Krebs)

Siklus ini melakukan oksidasi gugus asetil dari asetil CoA menjadi CO_2, dengan produksi empat pasang electron, disimpan lebih dulu dalam pembawa electron tereduksi NADH dan $FADH_2$.

Langkah 3: Oksidasi $NADH_2$ dan $FAFH_2$ yang diproduksi oleh siklus asam sitrat.

Selanjutnya, terkait dengan hasil energi, Ngili (2019) menjelaskan bahwa masing-masing dari ketiga molekul $NADH_2$ yang dihasilkan per putaran siklus menghasilkan tiga ATP dan satu $FADH_2$ menghasilkan dua ATP oleg fosforilasi oksidasi. Satu GTP (atau ATP) disintesis langsung selama konversi suksinil CoA menjadi suksinat. Dengan demikian, oksidsi satu molekul glukosa via asam sitrat menghasilkan 12 molekul ATP.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

Proses Anabolisme (Penyusunan)

Proses anabolisme (penyusunan) merupakan proses penggabungan komponen-komponen kecil dari masing-masing makromolekul membentuk makromolekul. Wahyuni (2013) menjelaskan bahwa anabolisme (biosinstesis) merupakan kebalikan dari katabolisme.

D. Metabolisme Protein

1. Proses Katabolisme (Penguraian)

a. Pencernaan

Enzim yang disekresi oleh lambung, pankreas, dan usus akan mencerna protein menjadi bentuk yang lebih sederhana dan akhirnya akan diserap dalam bentuk asam amino.

Dalam lambung ada HCl lambung yang berfungsi:

1) Mengaktifkan proenzim
2) Denaturasi protein
3) Antiseptik

Dalam lambung ada pencernaan protein oleh enzim pepsin yang mana enzim ini dapat bekerja secara optimal pada pH rendah. Renin dapat mengkoagulasi susu pada bayi dan hewan. Ngili (2019) menjelaskan bahwa banyaknya protein 9atau nitrogen terfikssi) yang dicern menentukan keadaan keseimbangan nitrogen seseorang. Seperti juga hewan, manusia akan mengeluarkan senyawa-senyawa nitrogen bahkan juga ketika diberi makanan bebas protein, karena tidak semua senyawa nitrogen bisa didaur ulang. Banyaknya protein yang dibutuhkan orang dewasa untuk dapat mempertahankan keseimbangan nitrogennya tidak mudah ditentukan, karena tidak semua asam amino yang ditemukan dalam protein (terutama protein nabati) adalah sama pentingnya untuk metabolisme hewan.

Terkait dengan penyerapan asam amino, terjadi sebagai berikut.

a) Absorpsi L-asam amino lebih cepat dari pada D-asam amino
b) Perlu energi (*transport* aktif)
c) Pada keadaan normal tak terjadi absorpsi protein atau polipeptida
d) Pada keadaan tertentu dapat terjadi absorpsi protein /polipeptida (sedikit), misalnya dalam keadaan alergi

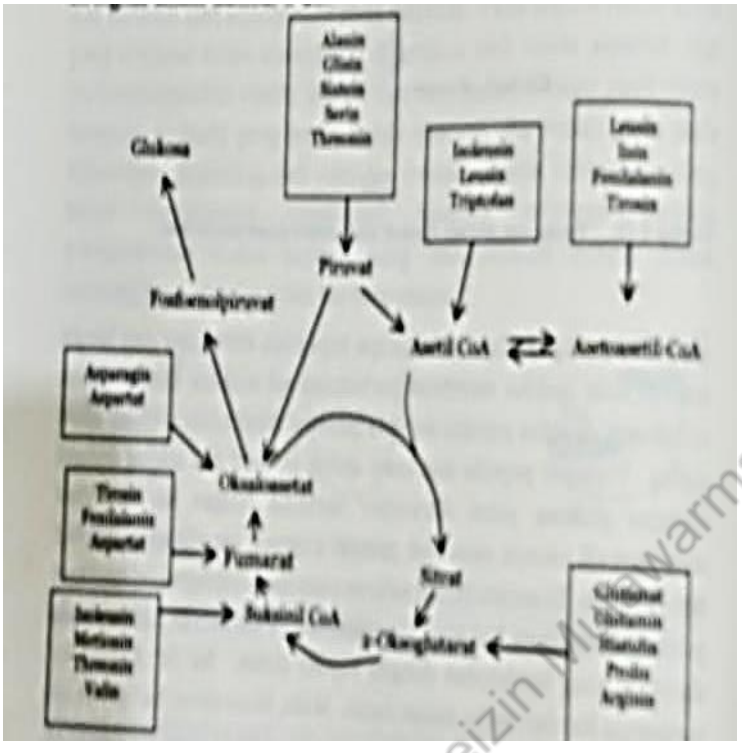
Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

e) Bayi dapat mengabsorpsi 66ellitus dalam colostrum/ASI melaui pinocytosis

Proses metabolisme asam amino, terjadi melalui:

a) Asam amino yang terbentuk di usus akan diabsorpsi dan dibawa oleh peredaran darah ke dalam sel-sel tubuh
b) Metabolisme asam amino di dalam sel:
   1) Katabolisme nitrogen asam amino, menghasilkan amonia (NH_3) kemudian dibawa ke hepar untuk diubah menjadi urea, dan diekskresikan oleh ginjal.
   2) Katabolisme kerangka karbon asam amino akan melewati senyawa amfibolik. Melalui proses anabolisme, asam amino akan disintesis menjadi protein.
   3) Ada 20 macam asam amino, 10 macam diantaranya adalah asam amino esensial yang didapatkan dari makanan. Asam amino dari makanan yang berasal dari pencernaan protein, di dalam tubuh dipergunakan untuk sintesis protein dan sintesis produk khusus misalnya purin, pirimidin, serotonin, dan lain-lain.
   4) Sisanya akan mengalami katabolisme. Katabolisme N asam amino akan dieksresi melalui ginjal dalam bentuk urea.
   5) Apabila berlebihan kerangka C asam amino dengan melalui senyawa amfibolik bisa diubah menjadi ATP, asam lemak atau steroid dan disimpan dalam bentuk glikogen, dan dengan tambahan senyawa lain bisa diubah menjadi trigliserida.
   6) Pada keadaan kelaparan, katabolisme asam amino meningkat, sehingga produksi urea meningkat.
   7) Kerangka C asam amino akan diubah menjadi glukosa, untuk mempertahankan kadar glukosa darah, selain juga diubah menjadi energi. Gambar 38 berikut menunjukkan nasib rangka karbon dari asam-asam amino.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press



Gambar 38. Nasib rangka karbon dari asam-asam manio
Sumber: Ngili (2019).

Ngili (2019) menjelaskan bahwa asam-asam amino hasil hidrolisis protein dapat dipisahkan satu sama lain dengan menggunakan kromatografi penukar ion. Tiga macam larutan penyanggah pH tinggi, dipakai untuk mengelusi asam amino pada kolom kromatografi. Urutan pengelusian tergantung pada muatan asam amino.

2. Keseimbangan Nitrogen

Beberapa hal yang penting mengenai keseimbangan nitrogen:

a. Protein dalam tubuh bersifat dinamis, selalu ada sintesis dan degradasi (katabolisme)
b. Dengan mengukur jumlah nitrogen yang masuk dan keluar, kita dapat memperkirakan kondisi metabolisme protein tubuh, oleh karena nitrogen dalam tubuh terutama terdapat pada protein.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

c. N masuk tubuh lewat makanan
d. N keluar tubuh lewat urine, keringat, dan feces.
e. Keseimbangan nitrogen tubuh dikatakan positif bila N masuk lebih besar dari N yang keluar dari tubuh. Berarti sintesis protein lebih besar dari katabolismenya. Kondisi ini terjadi misalnya pada masa penyembuhan, masa pertumbuhan, dan masa kehamilan.
f. Keseimbangan nitrogen negatif berarti katabolisme protein lebih besar dari sintesisnya, misalnya pada waktu kelaparan dan sakit.
g. Keseimbangan nitrogen terdapat pada orang dewasa normal dan sehat.

3. Macam-macam asam amino

Asam amino esensial diperlukan tubuh dari makanan, tidak dapat disintesis dalam tubuh. Asam amino non esensial dapat disintesis dalam tubuh. Tabel 4 berikut memuat daftar asam-asam amino esensial dan nonesensial.

Tabel 4. Asam-asam amino esensial dan nonesensial

Esensial		**Nonesensial**	
Arginin	Metionin	Alanin	Glutamin
Histidin	Phenilalanin	Aspartet	Glisin
Isoleusin	Threonin	Asparagin	Prolin
Leusin	Triptofan	Cistein	Serin
Lisin	Valin	Glutamin	Tyrosin

Sintesis protein memerlukan ke 20 jenis asam amino. Protein hewani mempunyai nilai biologis lebih tinggi dibandingkan protein nabati, oleh karena komposisi asam aminonya lebih lengkap dan kadarnya lebih tinggi, terutama asam amino esensialnya.

a. Katabolisme N asam amino.
   Kandungan N asam amino pada mamalia akan disekresi sebagai urea, yang disintesis dalam hepar dan dibuang lewat ginjal.
   Tahapan katabolisme N asam amino:
   1) Transaminasi
   2) Deaminasi oksidatif

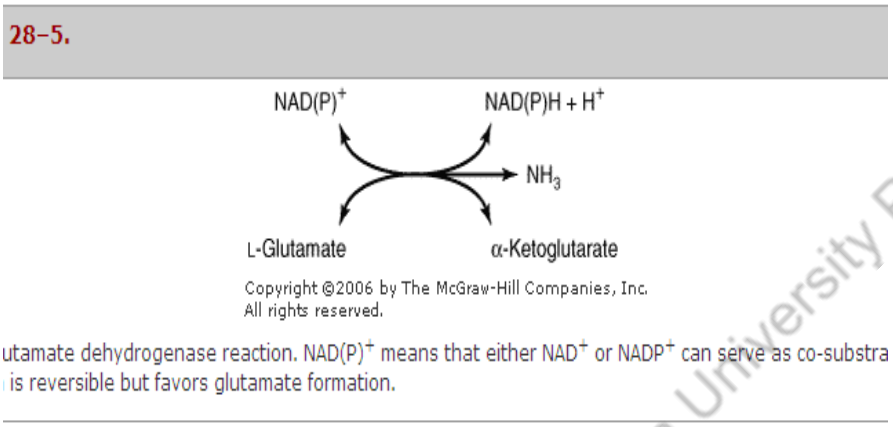
Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

3) Transpor ammonia
4) Siklus Urea

Hasil akhir katabolisme N asam amino adalah sebagai berikut:
1) Organisme ureotelik menghasilkan urea, misalnya pada mamalia.
2) Organisme uricotelik menghasilkan asam urat (*uric acid*), misalnya pada burung dan reptil.
3) Organisme amonotelic menghasilkan 69ellitu (NH_3), misalnya ikan bertulang.

a) Transaminasi
   Enzim yang bertanggung jawab adalah transaminase yang disebut juga aminotransferase. Koenzimnya adalah piridoksil fosfat atau vitamin B_6. Enzim transaminase yang hampir bisa didapatkan pada semua jaringan adalah:
   1) Alanin transaminase
   2) Glutamat transaminase
   3) Alanin transaminase
   4) Piruvat asam α-amino
b) Deaminasi oksidatif
   Harper (1996) menjelaskan bahwa L-glutamat adalah satu-satunya asam amino yang mengalami demainasi oksidatif dengan laju yang cukup tinggi di jaringan Mamalia. Jadi pembentukan amonia dari gugus a-amino terjadi terutama melalui nitrogen a-amino L-glutamat, Gambar 39 berikut menunjukkan proses perubahan glutamat menjadi α-ketoglutarat.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press



Gambar 39. Proses perubahan glutamat menjadi α-ketoglutarat (https://www.google.com/search?q=proses+deaminasi+oksidatif&tbm=isch&ved=2ahUKEwiwnse0xKv7AhUNndgFHebUDj4Q2-cCegQIABAA&oq=Proses+deaminasi+oks&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgcIABCABBAYOgQIIxAnOgUIABCABDoLCAAQgAQQsQMQgwE6CAgAEIAEELEDOgQIABAeUNQPWK04YMJEaABwAHgAgAGDAogBsxCSAQU2LjcuM5gBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&sclient=img&ei=hBVxY7DMEY264t4P5qm78AM&bih=635&biw=1366#imgrc=RxUT9bb3Ji3FOM)

Enzim yang terlibat adalah Glutamat dehidrogenase

1) Proses reaksinya adalah reversibel
2) Enzimnya berfungsi sebagai pengendali
3) Inhibitor allosteriknya adalah ATP, GTP, dan NADH
4) Aktivator allosteriknya adalah ADP dan GDP
5) Proses deaminasi terjadi di berbagai jaringan dalam sitoplasma.

Terkait dengan *transport* ammonia, karena amonia (NH_3) bersifat racun, maka diangkut dari jaringan menuju ke hepar tidak dalam bentuk bebas (NH_3/ NH_4^+). Dari berbagai jaringan diubah menjadi asam amino Glutamin.

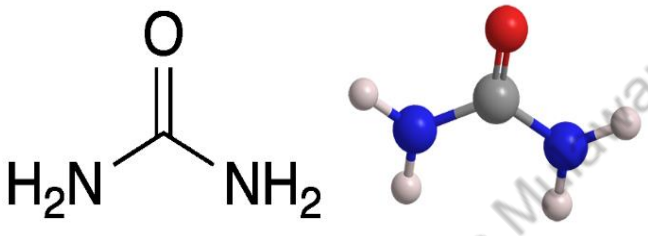
Glutamat didapat dari □-Ketoglutarat (*TCA cycle*) melalui transaminasi dengan asam amino lain. Glutamin kemudian diangkut ke hepar, sebagian ke ginjal, dan ke usus. Dalam hepar/hati Glutamin (Gln) dihidrolisis menggunakan enzim Glutaminase untuk melepas NH_3 yang akan masuk ke siklus urea. Reaksinya adalah:

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Kedokteran Universitas Press

$Glutamin + H_2O \rightarrow Glu + NH_4^+$
Glutaminase

b. Siklus Urea

Ngili (2019) menjelaskan bahwa kelebihan asam amino dari kebutuhan metabolisme, didegradasi menjadi rangka karbonnya, memasuki metabolisme energi atau diubah menjadi senyawa lain dan ammonia. Amonia dikeluarkan begitu saja atau diubah menjadi urea lalu dikeluarkan. Rumus bangun urea ditunjukkan pada Gambar 40.



Gambar 40. Rumusa Bangun Urea
(https://www.acs.org/content/acs/en/molecule-of-the-week/archive/u/urea.html)

Urea (NH_2CONH_2) sangat mudah larut, nontoksik, dan memiliki kandungan nitrogen tinggi (47%). Manusia normal mengeluarkan 30 g per hari pada diet makanan berat, tetapi pada makanan berprotein tinggi jumlah ini meningkat sampai 100 g per hari. Manusia dan primata mengeluarkan sejumlah kecil asam urat sebagai produk akhir metabolisme purin.

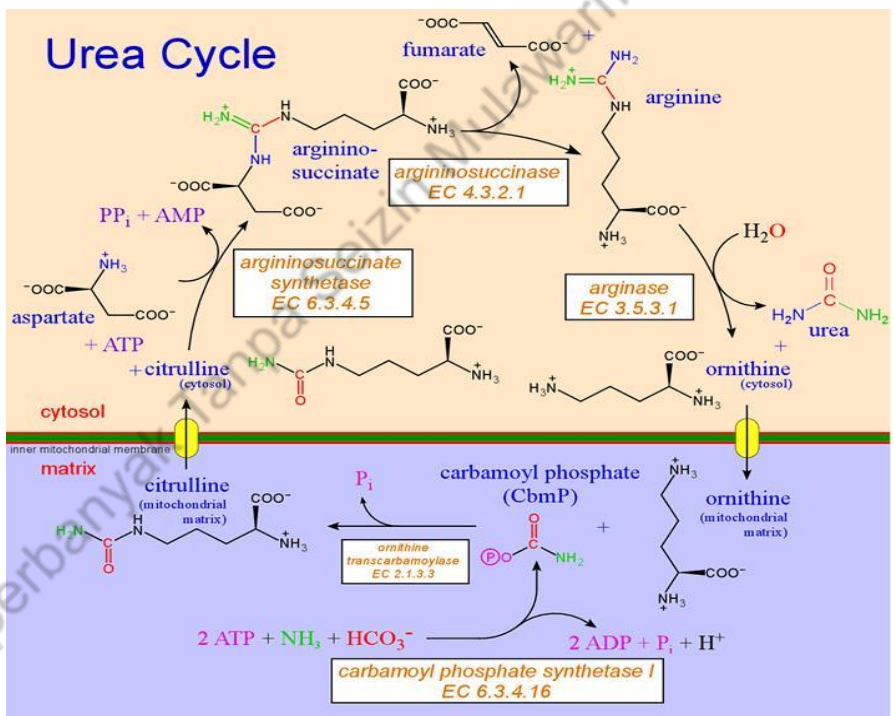
Sebagian besar ammonia yang diubah menjadi urea dalam hati berasal dari metabolism dalam jaringan ekstrahepatik, meskipun hanya sebagian kecil meninggalkan jaringan ini dalam bentuk amonia. Sel absortif pada usus halus merupakan pengecualian dalam hal pelepasan ammonia ke dalam gerbang pembuluh darah yaknikonsentrasi ammonium dapat sampai 0,26 L^{-1}, dihitung untuk 30 persen ures yang disintesis dalam hati. Urea disintesis dalam hati oleh serangkaian reaksi yang dikenal sebagai siklus urea. Gambar 41

Dilarang Memperbanyak tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

menunjukkan siklus urea. Satu oksigen berasal dari ammonium, sedangkan yang kedua dari aspartat.Karbon berasal dari CO_2. Sintesis urea memerlukan pembentukan karbanoil fosfat dan empat reaksi enzim pada siklus urea,

Ciri-ciri siklus urea:

1) Terjadi dalam hepar
2) Memerlukan energi (ATP)
3) Pengendalian siklus ini terutama oleh Glutamatdehidrogenase dan enzim karbamoil fosfat sintetase I (CPS 1)
4) Produk terakhir adalah urea, yang akan masuk kedalam darah dan diangkut ke ginjal untuk disekresi (dibuang) bersama urine. Gambar 41 berikut menunjukkan siklus urea.



Gambar 41. Siklus Urea
(https://lh3.googleusercontent.com/Q5JY_2mPU_Aop5rDQVPLDAeNQvDMCACjvWvZOeS_waKnE1Uiklmpz7WXbWC8_lFfs79Q=s93)

Dilarang Memperbanyak Tanpa Izin Muawarman University Press

Pada cirrhosis hepar, amonia darah akan meningkat, karena sel hepar yang berkurang banyak tidak mampu untuk mengubah amino yang ada menjadi Urea semuanya. Apalagi apabila terjadi perdarahan lambung akibat pecahnya varises, maka biasanya terjadi muntah darah yang kelihatan gelap (hitam) dan diare darah hitam.

Karena amonia bersifat racun terutama pada sistem saraf, maka bisa terjadi gangguan penglihatan, gangguan bicara, *flapping tremor*, koma hingga kematian. Pada kerusakan ginjal berat (chronic renal failure) akan terjadi Uremia (kadar Urea yang meningkat).

E. Metabolisme Lemak

1. Katabolisme (Penguraian)

a. Pencernaan Lemak (Lipid)

Ngili (2019) menjelaskan bahwa lipid didefinisikan sebagai senyawa yang tak larut dalam air yang diekstrak dari organisme hidup menggunakan pelarut yang kepolarannya lemah atau pelarut nonpolar. Pencernaan dan penyerapan lipid bersama-sama dengan pencernaan fosfolipid tergantung pada sekresi dari pancreas (eksokrin) dan aliran empedu dari kantong empedu. Konstituen penting dalam sekresi pancreas adalah enzim, sedangkan pada empedu adalah garam empedu.

Pencernaan lipid dilakukan di dalam usus halus dilakukan oleh reaksi enzim-enzim hidrolisis yang disebut lipase dan fosfolipase, yang bekerja pada triasil gliserol dan fosfolipid dari makanan. Fosfolipase A1 menghidrolisis ikatan ester antara asam lemak dan gliserol pada posisi 1 rantai karbon fosfogilerida. Lipase pencernaan yang disekresikan ke dalam lumen pada usus bergabung dengan permukaan tetesan lemak besar. Produk awal pencernaan oleh lipase dan fosfolipse yakni asam lemak dan fofogliserida, yang merupakan detergen kuat.

Asam lemak dengan rantai karbon yang panjangnya sama atau lebih dari 14 (asam rantai panjang) berdifusi secara pasif ke dalam sel epitel usus. Molekul ini memasuki sel dengan menuruni gradien konsentrasi karena konsentrasi asam lemak bebas dalam miclle campuran adalah tinggi, sedangkan konsentrasinya dalam sel adalah

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

rendah. Masuknya asam lemak ke dalam sel segera diikuti dengan pengikatan pada suatu protein pengikat yang mempunyai afinitas tinggi untuk asam lemak rantai panjang. Dengan serempak, dua monoasilgliserol secara pasif berdifusi ke dalam sel epitel dan bersama dengan asam lemak kemudian diubah dengan cepat menjadi triasil gliserol.

Triasil gliserol yang baru terbentuk, kemudian masuk ke dalam kilomikron (suatu jenis lipoprotein) yang disekresikan oleh sel epitel usus ke dalam lacteal, yakni saluran getah bening dalam villi usus halus. Selanjutnya kilomikron lewat dari kandungan getah bening menuju saluran thoraks, lalu memasuki darah dan berperan untuk *transport* bahan bakar lipid menuju berbagai jaringan.

b. Oksidasi Asam Lemak

Oksidasi asam lemak yang terjadi di hati dalam berlangsung menjadi tiga macam yaitu, α-oksidasi, β-oksidasi, dan ꝺ-oksidasi.

1) β-Oksidasi

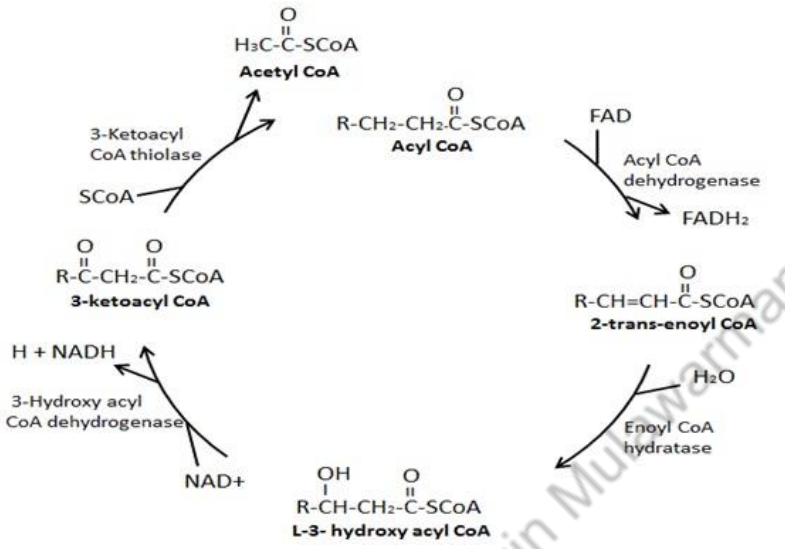
Padas sel eukariotik, asam lemak pada sitosol akan diaktivasi oleh 1 mol ATP dan dengan bantuan enzim asil KoA sintetase yang terdapat pada membran luar membentuk asil KoA dengan KoA pada ruang antar membran mitokondria. Selanjutnya, kompleks ini diangkut ke dalam mitokondria melewati membran bagian dalam dengan bantuan kornitin sebagai pengemban dan enzim karnitin asil-KoA transferase I.

Tahap-tahap β-Oksidasi

a) Pada matriks mitokondria, asam lemak yang sudah diaktivasi oleh ATP dan Kenzim KoA menghasilkan ester asam lemak-asetil KoA.
b) Ester asam lemak-asetil KoA yang terbentuk didehidrogenasi pada posisi α, β oleh enzim asil-KoA dehydrogenase, sehingga terbentuk ikatan rangkap pada posisi α. Di dalam sel juga ditemukan tiga macam enzim ini. Ketiga macam enzim ini memerlukan FAD sehingga reaksi dehidrogenasi ini menghasilkan $FADH_2$.
c) Oksidasi β-hidroksi asil KoA menjadi β-ketoasil oleh enzim L-β hidroksiasil KoA dehydrogenase. Kemudian β-keto asil

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

yang terbentuk dihidrolisis menjadi asetil KoA dan asil KoA dengan bantuan enzim β-keto asil KoA tilase. Gambar 42 berikut menunjukkan tahapan reaksi β-oksidasi.

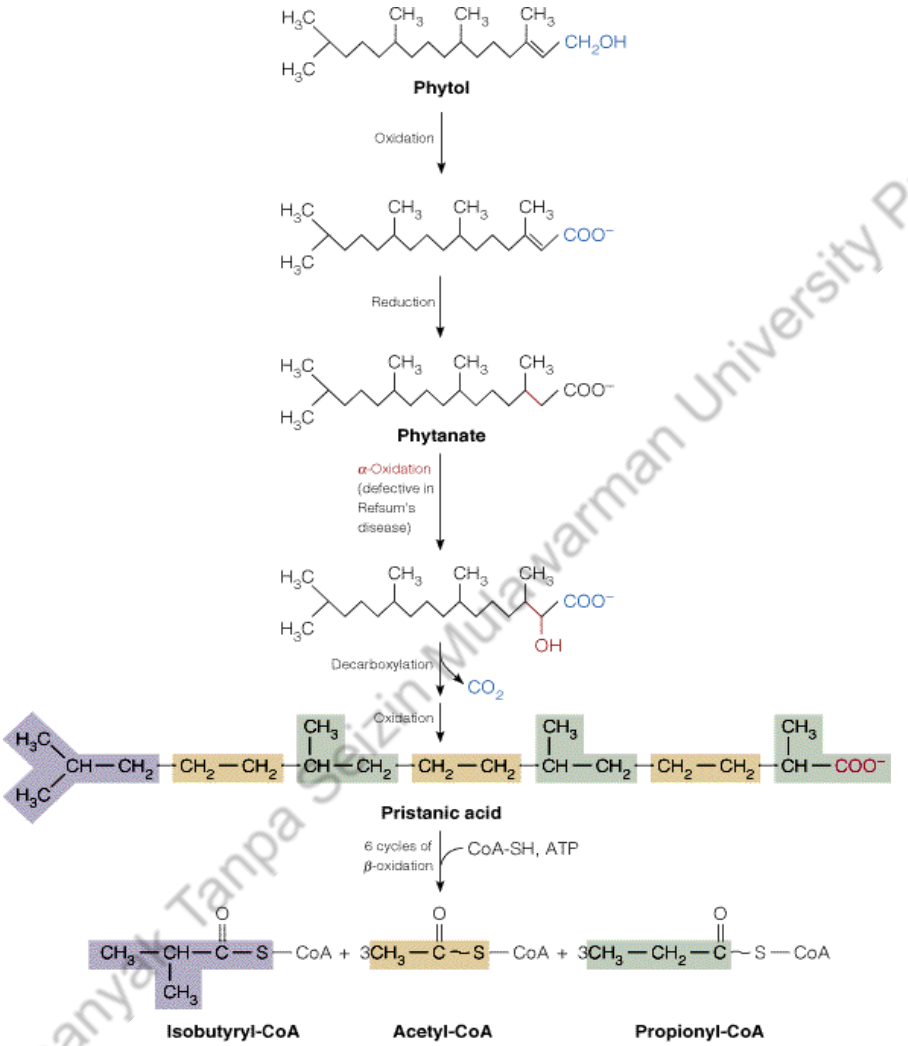


Gambar 42. Tahapan-tahapan β-oksidasi (https://www.google.com/search?q=Gambar+tahapan+beta+oksidasi+asam+lemak&client=firefox-bab&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=sS8KK79ZWFJdDM%253A%252Cqif8bxwsb5XM8M%252_&usg=__82LaoagoSvN1TdWXDvBUBlfAEPI%3D&sa=X&ved=0ahUKEwjm7Zv__9vbAhWCSH0KHS53BbAQ9QEIQTAD#imgrc=sS8KK79ZWFJdDM:, diakses tanggal: 16 Juni 2018).

2) α-Oksidasi

Kalau pada β-oksidasi tiap kali siklus terjadi pemutusan tiap 2 atom C (dalam bentuk asetil Ko-A), maka pada α-oksidasi akan dihasilkan CO_2. α-Oksidasi terutama terdapat jaringan otrak dan hati pada manusia, atau pada biji dan jaringan daun pada tanaman. Gambar 43 berikut menunjukkan tahapan α-oksidasi.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muawarman University Press



Gambar 43. Tahapan α-oksidasi
(https://www.google.com/search?q=gambar+tahapan+alfa+oksidasi+asam+lemak&client=firefox-bab&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=sS8KK79ZWFJdDM%253A%252Cqif8bxwsb5XM8M%252C_&usg=__lQwHaz-bHvVh463IsKHZH1oUgl8%3D&sa=X&ved=0ahUKEwj1jvTXgdzbAhUCfysKHcdDUQQ9QEIPDAH#imgrc=IU_bRlvS5p5GRM☺

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

3) Ꞷ-Oksidasi

Seperti halnya α-oksidasi, Ꞷ-oksidasi ini merupakan jalur yang minor, dan terjadi pada retikulum endoplasma pada beberapa jaringan. Bakteri dapat melakukan Ꞷ-oksidasi terhadap asam lemak. Pada proses Ꞷ-oksidasi yang dilakukan oleh bakteri, alkane dapat diubah menjadi asam lemak, yang selanjutnya didegradasi melalui β-oksidasi untuk menghasilkan energi.

Terkait dengan metabolisme lipoprotein, Ngili (2009) menjelaskan bahwa lipoprotein utama yang beredar dalam darah yaitu: kilomikron, *VLDL* (*Very Low Density Lipoprotein*), *LDL* (*Low Density Lipoprotein*), *HDL* (*High Density Lipoprotein*), *IDL* (*Intermediate Density Lipoprotein*) *diturunkan dari VLDL* dalam pembentukan *LDL*. Asam lemak merupakan bahan bakar sel yang penting, yang tersimpan sebagai triasil gliserol dalam jaringan adipose.

F. Kelainan-Kelainan dalam Metabolisme

Kelainan-kelainan dalam metabolisme umumnya bersifat sistemik. Kelainan=kelainan yang akan dibahas adalah gangguan pada metabolisme karbohidrat, protein, dan lemak.

1. Gangguan metabolisme karbohidrat

a. Diabetes mellitus (Hiperglykemia)

Dasar penyakit adalah defisiensi insulin. Gejala klinis penyakitnya adalah:

1) Hiperglikemia, kandungan gula tinggi di dalam darah
2) Glikosuria, terjadi ekskresi gula ke dalam urine. Seharusnya urine tidak mengandung gula lagi, karena ginjal akan melakukan proses penyerapan gula lagi dan kembali ke dalam sirkulasi darah.
3) Gejala ini, dapat diikuti gangguan sekunder metabolisme protein dan lemak
4) Gejala ini juga dapat berakhir dengan kematian. Insidensi terbanyak usia 50 – 60 tahun. Kejadian dapat terjadi pada dekade

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

pertama atau pada yang sudah lanjut. Penyakit ini diturunkan secara autosomal resesif.

Ada 2 teori cara kerja insulin

1) Teori 1: Teori Levine : Insulin mentransfer glukosa melalui membran sel otot serat lintang, tetapi tidak mengganggu perpindahan glukosa melalui sel membran hati
2) Teori 2: Insulin diperlukan untuk fosforilasi glukosa dalam sel menghasilkan glukosa 6 posfatase. Untuk pengikatan ini dibutuhkan enzim hexokinase yang dihasilkan oleh sel hati. Kelenjar hipofisis menghasilkan zat inhibitor hexokinase. Insulin merupakan zat antagonis terhadap hexokinase.

2. Kelenjar Hipofisis

a. Hormon pertumbuhan (Growth hormone).
b. Adrenocorticotropic Hormon (ACTH) merangsang sintesis kortisol pada korteks adrenal perkembangan sel kelenjar tersebut.
c. Efek menghambat enzim hexokinase.
d. Bila kelenjar hipofisis hiperaktif, maka menyebabkan terjadi diabetes.

3. Kelenjar Adrenal

a. Glukoneogenesis yaitu perubahan bentuk protein menjadi karbohidrat.
b. Karena pengaruh hormon steroid yang dihasilkan oleh kortex adrenal
c. Bila berlangsung terus menerus akan menekan sel beta mellitus, dan menimbulkan defisiensi insulin permanen
d. Aktivitas adrenal bergantung kepada kelenjar hipofisis anterior

5. Komplikasi Diabetes Melitus

Kelainan ini merupakan gangguan biokimia. Cedera morfologik sebenarnya tidak dapat untuk menegakkan diagnosis. Kondisi ini tidak selalu sebagai dasar dari pada gangguan metabolisme. Ada 20 % penderita meninggal tidak menunjukkan bukti-bukti kelainan anatomik.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

a. Pankreas

Seperempat penderita, pankreasnya normal. Pada umumnya kerusakan pada sel beta ringan, dan tidak mungkin menimbulkan gangguan produksi insulin. Bila ada:

1) Hialinisasi
2) Fibrosis
3) Vakoalisasi hidropik yang sebenarnya merupakan penimbunan glikogen

b. Pembuluh darah

Bila gangguan metabolisme karbohidrat terlalu lama, maka akan terjadi hiperglikemik menahun, pada otot, hati dan jantung, terjadi defisiensi. Kondisi selanjutnya adalah terjadi mobilisasi lemak sebagai sumber tenaga, sehingga lemak dalam darah meningkat. Kondisi selanjutnya adalah dapat terjadi lipaemia dan cholestrolimia, sehingga terjadi gangguan vascular, dengan komplikasi asteriosklerosis merata yang akan menimbulkan sklerosis pembuluh darah arteri coronaria, ginjal dan retina.

c. Mata

Komplikasi dapat juga terjadi sklerosis arteri retina, sehingga menyebabkan retinitis diabetika. Kondisi ini dapat menyebabkan:

- Perdarahan kecil-kecil tidak teratur
- Pelebaran pembuluh darah retina dan berkeluk-keluk
- Kapiler-kapiler membentuk mikroaneurisme

c. Jantung

Sklerosis arteri coronaria, dan gejala ini dapat menimbulkan infrak otot jantung.

d. Ginjal

Kelainan degeneratif pada alat vaskuler glomerulus – tubular. Pyleonepritis akut maupun kronis.

e. Kulit

Penimbunan lipid dalam makropag-makropag pada dermis dan dapat menimbulkan xantoma diabetikum.

f. Susunan syaraf

Pada syaraf tepi terkadang medula spinalis. Perubahan degeratif, meliputi.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

1) Demyelinisasi, gelaja robeknya selubung myelin pada neuron.
2) Fibrosis, proses pembentukan jaringan fibrin.

g. Hati

Perlemakan dapat menimbulkan hepatomegali dan infiltasi glikogen. Gejala ini disebabkan karena defisiensi karbohidrat, dengan sumber tenaga dari lemak, sehingga menimbulkan imobilisasi lemak berlebihan dan terjadi defisiensi lipotropic, mengakibatkan lemak tidak dapat diangkut dari sel, akhirnya terjadi penimbunan lemak berlebihan.

h. Klinis

1) Polyphagia, tubuh tidak dapat memetabolisme karbohidrat yang dimakan, sehingga penderita banyak makan.
2) Polidipsia, glycosuria (diuresis osmotik), sehingga timbul kompensasi yaitu penderita banyak minum.
3) Polyuria, glycosuria (diuresis osmotik), sehingga penderita banyak kencing

i. Hipoglikemia

Patologis: Sering ditemukan pada 3 keadaan.

1) Akibat pemakaian insulin berlebihan pada diabetes.
2) Pada pengobatan psykosis dengan shock hipoglikemik.
3) Akibat pembentukan insulin berlebihan pada tumor pankreas yangg dibentuk oleh sel β.

G. Gangguan Metabolisme Protein

Penyakit akibat kelebihan protein tidak ada.

a. Defisiensi protein, terjadi pada pemasukan protein kurang, sehingga terjadi, asam akino, mineral, dan faktor lipotropik. Akibatnya adalah: pertumbuhan tubuh, pemeliharaan jaringan tubuh, pembentukan zat anti dan serum protein akan terganggu, penderita mudah terserang penyakit infeksi, perjalanan infeksi berat, luka sukar sembuh dan mudah terserang penyakit hati akibat kekurangan faktor lipotropik.

b. Hipoagammaglobulinemia didapat

Kondisi ini, dapat terjadi pada tiga fenomena.

1) Dapat terjadi pada pria dan wanita pada semua usia

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

2) Penderita mudah terkena infeksi
3) Dapat terjadi hiperplasi konpensatorik sel retikulum sehingga mengakibatkan limfadenopathi dan spenomegali.

c. Hipoagammaglobulinemia sementara

Kondisi ini hanya ditemukan pada bayi. Kasus ini merupakan peralihan pada waktu gamma globulin yang didapat dari ibu habis, dan anak harus membentuk gamma globulin sendiri.

d. Pirai atau Gout

Kasus ini dapat timbul akibat gangguan metabolisme asam urat menimbulkan asam urat serum meninggi sehingga terjadi pengendapan asam urat pada berbagai jaringan. Asam urat merupakan hasil akhir dari metaboisme purin. Secara klinis:

1) Arthritis akut yang sering kambuh secara menahun
2) Pada jaringan ditemukan tonjolan-tonjolan disebut "tophus" di sekitar sendi, tulang rawan, telinga, ginjal, dan katup jantung.

H. Gangguan Metabolisme Lemak

1. Kelebihan lemak (Obesitas)

Kalori yang didapat lebih besar daripada kalori yang dimetabolismekan (hipometabolisme). Pada kasus ini terjadi pada hipopituitarisme dan hipotiroidisme. Kalori yang dibutuhkan menurun sehingga menimbulkan berat badan naik, meskipun penderita diberi makan tidak berlebihan. Obesitas dapat memperberat hipertensi, diabetes, penyakit jantung.

2. Hiperlipemia

Jumlah lipid darah total dan kolesterol meningkat Terdapat pada Diabetes mellitus tidak diobati, Hipotiroidisme, nefrosis lipoid, penyakit hati, sirhrosis biliaris, xantomatosa, hiperlipidemi, hiperkholesterolemi. Penimbunan lemak terjadi di dinding pembuluh darah dan dapat menimbulkan arteriosclerosis.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

I. Ringkasan

Metabolisme adalah rangkai reaksi kimia yang terjadi di dalam sel makhluk hidup. Metabolisme karbohidrat dimulai dari proses penguraian gula monosakarida (glukosa) dalam proses glikolisis. Setelah dihasilkan dua mol asam piruvat, proses selanjutnya adalah terjadi dua jalur. Jalur aerob, yaitu mengubah asam piruvat menjadi asel koenzim (Asetil KoA), dan selanjutnya ,asuk ke siklus Krebs. Jalur yang lain adalah jalur anaerob, yaitu mengubah asam piruvar menjadi etanol atau asam laktat. Proses anabolisme (penyusunan) karbohidrat merupakan reaksi kebalikan dari katabolisme. Metabolisme protein dimulai dari proses pencernaan, mengahsilkan asam-asam amino. Ada 20 macam asam amino. Asam-asam amino selanjutnya mengalami proses katabolisme di sel. Anabolisme protein merupakan proses kebalikan dari proses katabolisme protein. Metabolisme lemak dimulai dari proses katabolime (penguraian). Proses katabolisme asam lemak dari terjadi secara α-oksidasi, β-oksidasi, dan ꞷ-oksidasi. Proses anabolisme lemak merupakan kebalikan dari reaksi katabolisme lemak. Kelainan-kelainan metabolisme dapat ditemukan pada metabolisme karbohidrat, metabolisme protein, dan metabolisme lemak.

J. Evaluasi

1. Jelaskan pengertian metabolisme!
2. Uraikan proses metabolisme karbohidrat!
3. Uraikan proses metabolisme protein!
4. Uraikan proses metabolisme lemak!
5. Jelaskan kelainan-kelainan metabolisme!

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

DAFTAR RUJUKAN

Almatsier, S. 2004. *Prinsip Dasar Ilmu Gizi.* Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.

Adugna, S., Alemu, L., A., M., Kalemu, T., Teola, H., Kibret, B., Genet, S. 2014. *Medical Biochemistry*. Ethiopia: Gondar University, Jimma University, Debub Univrsity.

Arbianto, P. 1993. *Biokimia, Konsep-Konsep Dasar.* Jakarta: Dikti Depdiknas.

Azhar, M. (2016). Biomolekul Sel: Karbohidrat, Protein, dan Enzim.

Campbell, N.A., Reece, J.B., Urry, L.A., Can, M.L., Wasserman, S.A., Minorsky, P.V., Jackson, R.B. 2008. *Biologi.* Alih Bahasa: Damaning Tyas Wulandari. Jakarta: Erlangga.

Girinda, A. 1987. *Biokimia 1.* Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.

Harper. 1996. *Ringkasan Biokimia*. Jakarta: EGC.

Iskandar. 1984. *Biokimia Bagian 1.* Jakarta: Yayasan Dharma Graha.

Ischak, N. I., Salimi, Y. K., Botutihe, D. N. 2017. Biokimia Dasar. Gorontalo: UNG Press

Lehninger, 1994. *Dasar-Dasar Biokimia.* Jakarta: Erlangga.

Martoharsono, S. 1984. *Biokimia Jilid I.* Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Marray, R.K., Grammer, D.K., Rodwell, V.W. 2002. *Biokimia Harper*. Alih bahasa: Brahmn U. Pendit. Jakarta: EGC.

Meisenberg, G., & Simmons, W. H. (2016). *Principles of Medical Biochemistry E-Book*. Elsevier Health Sciences.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seijin Mulawarman University Press

Ngili, Y. 2009. *Biokimia, Metabolisme & Bioenergitika*. Yogyakarta: Graha Ilmu.

Ngili, Y. 2019. *Mekanisme Reaksi dan Metabolisme biomolekul*. Bandung: Rekayasa Sains.

Poedjianti, A. 1994. *Dasar-Dasar Biokimia*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Prawirokusumo, S. 1990. *Biokimia Nutrisi*. Yogyakarta: BPFE-Yogyakarta.

Purba, D. H., Marzuki, I., Dailami, M., Saputra, H. A., Mawarti, H., Gurning, K., ... & Purba, A. M. V. (2021). *Biokimia*. Yayasan Kita Menulis.

Risnawati, M. (2013). Pengaruh penambahan ion logam Ca2+ terhadap aktivitas enzim papain (The addition effect of the metal ions Ca2+ on the papain activities). *UNESA Journal of Chemistry*, *2*(1), 76-83.

Schumm, D.E. 1993. *Intisari Biokimia*. Jakarta: Binarupa Aksara.

Wahyudiati, D. 2017. *Biokimia*. Mataram. LEPPIM.

Wahyuni S. 2002. *Dasar-Dasar Biokimia*. Denpasar; Udayana University Press.

Wahyuni, S. 2017. *Biokimia Enzim dan Karbohidat. Lhokseumawe*, Unimal Press.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Muhammadiyah University Press

GLOSARIUM

Adenosin Tri-Phosphat (ATP); energi yang dihasilkan dari proses oksidasi terhadap substrat

Asam deoksiribonukleat (ADN); komponen inti sel yang terdiri antara lain gula deoksiribosa

Asam amino; unsur terkecil penyusun makromomolekul yaitu protein

Asam ribonukleat (ARN); komponen inti sel yang terdiri antara lain gula ribosa

Biokatalisator;komponen yang berperan dalam mempercepat reaksi yang terjadi di salam sel **Kadar asam (pH);** keadaan dimana banyak ion H^+ yang ada dalam suatu larutan atau media

Lipopretein; struktur protein yang terdiri atas hasil konjugasi antara protein dengan lemak

Metabolisme; proses pembingkaran dan penyusunan senyawa organik

Monosakarida; struktur karbohidrat yang paling sederhana

Nukleoprotein; struktur protein yang terdiri tas konjugasi antara protein dan asan nukleat

Oksidasi; reaksi pengikatan oksigen

Fosfolipida; struktur lemak yang terdiri atas konjugasi antara lemak dengan fosfat

Fosfopratein; struktur protein yang terdiri atas konjugasi antara protein dengan fosfat

Glikolipid; struktur lemak yang terdiri atas konjugasi antara lemak dan klukosa

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

Glikolisis; proses penguraian glukosa (gula berkarbon 6) menjadi asam piruvat

Inhibitor; komponen penghambat kerja enzim

Inhibitor kompetitif; komponen penghambat kerja enzim yang mana strukturnya mirip dengan inhibitor

Inhibitor nonkompetitif; komponen penghambat kerja enzim yang mana strukturnya tidak sama dengan inhibitor

Oligosakarida; struktur karbohidrat yang terdiri atas 2 sampai 6 monosakarida (jumlah mnonosakarida sedikir)

Organel; komponen yang ada dalam suatu sel

Polisakarida; struktur karbohidrat yang terdiri atas lebih dari 6 monosakarida

Reduksi; reaksi pelepasan oksigen

Sel; struktur terkecil penyusun tubuh organisme

Senyawa anorganik; struktur yang tidak menunjukkan ikatan antara C,H, O, N

Senyawa organik; struktur yang menunjukkan ikatan antara C, H, O, N

Siklus Krebs; proses pemecahan senyawa organik secara aerob dan menghasilkan ATP, konezim tereduksi, dan air

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

INDEKS

A

Aldehid, 15, 17, 53
Apoenzim, 38, 46, 47
Asam amino, 9, 12, 23, 24, 25, 27, 29, 30, 32, 36, 38, 41, 47, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 82, 85
Asam nukleat, 3, 6, 12, 14, 27, 32, 35, 36
ATP, v, 2, 4, 9, 41, 46, 48, 50, 51, 53, 54, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 66, 70, 72, 74, 85, 86

B

Biokimia, iii, v, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 37, 78, 83, 84

D

DNA, 8, 12, 24, 32, 33, 34, 35

E

Energi, 2, 6, 12, 14, 22, 28, 32, 37, 41, 42, 43, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 58, 59, 62, 64, 65, 66, 71, 72, 77, 85
Enzim, 3, 6, 9, 10, 12, 26, 27, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 52, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 69, 70, 72, 73, 74, 78, 83, 84, 86

G

Glikolisis, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 61, 64, 82, 86
Glukosa, 12, 14, 16, 19, 22, 28, 53, 54, 55, 58, 62, 64, 66, 78, 82, 86
Gula dekstro, 17
Gula levo, 17

H

Holoenzim, 38, 46, 47

I

Inhibitor, 45, 47, 70, 78, 86

K

Karbohidrat, 3, 6, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 23, 32, 36, 48, 52, 53, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 85, 86
Keton, 15, 17, 53
Kofaktor, 10, 12, 37, 38, 46, 47

Dilarang memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

L

Lemak, 3, 6, 12, 14, 31, 32, 36, 52, 66, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 85

M

Metabolisme, v, 2, 4, 6, 32, 43, 48, 52, 53, 54, 65, 66, 67, 71, 73, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 84, 85
Monosakarida, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 36, 53, 55, 82, 85, 86

O

Oksidasi, 3, 6, 9, 12, 48, 49, 51, 53, 58, 63, 64, 74, 75, 76, 77, 82, 85

P

Polisakarida, 15, 21, 22, 36, 86
Prostetik, 27, 46
Protein, 3, 4, 6, 9, 12, 14, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 46, 47, 52, 53, 65, 66, 67, 68, 74, 77, 78, 80, 82, 83, 85

R

Reduksi, 48, 49, 51, 86
RNA, 32, 33, 35, 40

S

Sel, v, 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 21, 23, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 62, 63, 66, 71, 73, 74, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 86
Sel eukariotik, 1, 8, 74
Sel prokariotik, 1, 8
Substrat, 10, 12, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 49, 53, 54, 59, 62, 85

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

TENTANG PENULIS

Prof. Dr. Didimus Tanah Boleng, M.Kes. dilahirkan di Desa Bajun Ta'a, Kabupaten Flores Timur, Nusa Tenggara Timur, pada tanggal 09 Oktober 1964. Ia memulai pendidikan dasar di Sekolah Dasar Katolik Tanahboleng, di Flores Timur, Nusa Tenggara Timur, dan diselesaikannya pada tahun 1979. Pada tahun 1982, ia menyelesaikan pendidikan menengah di Sekolah Menengah Pertama Nyiur Melambai di Tanahboleng, Flores Timur, Nusa Tenggara Timur. Pada tahun 1982 ia memulai pendidikan menengah lanjutan di Sekolah Menengah Atas Katolik Mgr. Soegijapranata di Kota Lumajang, Jawa Timur, dan diselesaikannya pada tahun 1984. Ia lulus Sarjana (S-1) Program Studi Pendidikan Biologi pada tahun 1988 di Universitas Mulawarman, Samarinda, Kalimantan Timur. Pada tahun 1995, ia lulus Magister Kesehatan (S-2) Program Studi Ilmu Kedokteran Dasar, Konsentrasi Mikrobiologi, di Universitas Airlangga, Surabaya, Jawa Timur. Pendidikan Doktor (S-3) Program Studi Pendidikan Biologi, ia selesaikan pada tahun 2014, di Universitas Negeri Malang, di Malang, Jawa Timur.

Sampai saat ini, penulis aktif sebagai staf pengajar tetap pada Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan (FKIP), Universitas Mulawarman (UNMUL), Samarinda. Selain itu, penulis juga terdaftar sebagai staf pengajar di Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Dirgahayu Samarinda. Selain mengajar, ia juga aktif meneliti, dan mengadakan pengabdian kepada masyarakat. Ia juga aktif mengikuti seminar ilmiah baik nasional maupun internasional dan sebagai *reviewer* pada *Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia* (*JPBI*) Universitas Muhammadiyah Malang. Sampai sekarang, penulis menjabat sebagai Kepala Laboratorium Pendidikan Biologi FKIP UNMUL, dan Ketua

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seijin Mulawarman University Press

Himpunan Pendidik dan Peneliti Biologi Indonesia (HPPBI) wilayah Kalimantan Timur.

Buku yang telah dihasilkannya adalah *Bakteriologi* (UMM Press), cetakan pertama tahun 2015, cetakan kedua tahun 2017; *Tanaman Lokal Antibakteri* (Mul Press), cetakan pertama tahun 2019, serta *Protista dan Model-Model Pembelajarannya* (Mul Press), cetakan pertama tahun 2021.

Dilarang Memperbanyak Tanpa Seizin Mulawarman University Press

Prof. Dr. Didimus Tanah Boleng, M.Kes. dilahirkan di Desa Bajun Ta'a, Kabupaten Flores Timur, Nusa Tenggara Timur, pada tanggal 09 Oktober 1964. Ia memulai pendidikan dasar di Sekolah Dasar Katolik Tanahboleng, di Flores Timur, Nusa Tenggara Timur, dan diselesaikannya pada tahun 1979. Pada tahun 1982, ia menyelesaikan pendidikan menengah di Sekolah Menengah Pertama Nyiur Melambai di Tanahboleng, Flores Timur, Nusa Tenggara Timur. Pada tahun 1982 ia memulai pendidikan menengah lanjutan di Sekolah Menengah Atas Katolik Mgr. Soegijapranata di Kota Lumajang, Jawa Timur, dan diselesaikannya pada tahun 1984. Ia lulus Sarjana (S-1) Program Studi Pendidikan Biologi pada tahun 1988 di Universitas Mulawarman, Samarinda, Kalimantan Timur. Pada tahun 1995, ia lulus Magister Kesehatan (S-2) Program Studi Ilmu Kedokteran Dasar, Konsentrasi Mikrobiologi, di Universitas Airlangga, Surabaya, Jawa Timur. Pendidikan Doktor (S-3) Program Studi Pendidikan Biologi, ia selesaikan pada tahun 2014, di Universitas Negeri Malang, di Malang, Jawa Timur.

Sampai saat ini, penulis aktif sebagai staf pengajar tetap pada Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan (FKIP), Universitas Mulawarman (UNMUL), Samarinda. Selain itu, penulis juga terdaftar sebagai staf pengajar di Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Dirgahayu Samarinda. Selain mengajar, ia juga aktif meneliti, dan mengadakan pengabdian kepada masyarakat. Ia juga aktif mengikuti seminar ilmiah baik nasional maupun internasional dan sebagai *reviewer* pada *Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia* (*JPBI*) Universitas Muhammadiyah Malang. Sampai sekarang, penulis menjabat sebagai Kepala Laboratorium Pendidikan Biologi FKIP UNMUL, dan Ketua Himpunan Pendidik dan Peneliti Biologi Indonesia (HPPBI) wilayah Kalimantan Timur.

Buku yang telah dihasilkannya adalah *Bakteriologi* (UMM Press), cetakan pertama tahun 2015, cetakan kedua tahun 2017; *Tanaman Lokal Antibakteri* (Mul Press), cetakan pertama tahun 2019, serta *Protista dan Model-Model Pembelajarannya* (Mul Press), cetakan pertama tahun 2021.

Dilarang memperbanyak tanpa izin Mulawarman University Press

Mulawarman University PRESS
Penerbit Member of IKAPI & APPTI
Mulawarman University PRESS
Gedung LP2M Universitas Mulawarman
Kampus Gunung Kelua, Jl Karyan, Samarinda
Provinsi Kalimantan Timur, INDONESIA 75123
Telp/Fax (0541) 747432, Email : mup@lppm.unmul.ac.id
Website: www.mup.unmul.ac.id

ISBN 978-623-5262-42-0