



BUKU AJAR

PRINCIPLE OF NUTRITION

Herni Dwi Herawati • Veriani Aprilia
Hastrin Hositanisita • Herwinda Kusuma Rahayu
Winda Irwanti • Yhona Paratmanitya
Lisana Shidiq Aliya • Yulinda Kurniasari
Effatul Afifah • Siska Ariftiyana
Wiji Indah Lestari



PRINCIPLE OF NUTRITION

Penulis:

Herni Dwi Herawati, S.Gz., MPH

Dr. Veriani Aprilia, M.Sc

Hastrin Hositanisita, S.Gz, M.Sc

Herwinda Kusuma Rahayu, S.Gz., MPH

Winda Irwanti, S.Gz., MPH

Dr. Yhona Paratmanitya, MPH

Lisana Shidiq Aliya, S.Gz., MPH

Yulinda Kurniasari, S.Gz., RD, MPH

Dr. Effatul Afifah, MPH

Siska Ariftiyana, S.Gz., MKM

Wiji Indah Lestari, S.Gz., MKM

Editor:

Harry Freitag Luglio Muhammad, RD, Ph.D

Penerbit “Zahira Media Publisher”

CV. ZT CORPORA

PRINCIPLE OF NUTRITION

ISBN : 978-623-8481-99-6

Penulis Naskah : Herni Dwi Herawati, Veriani Aprilia,
Hastrin Hositanisita,
Herwinda Kusuma Rahayu,
Winda Irwanti, Yhona Paratmanitya,
Lisana Shidiq Aliya,
Yulinda Kurniasari, Effatul Afifah,
Siska Ariftiyana, Wiji Indah Lestari

Editor : Harry Freitag Luglio Muhammad

Desain Sampul : Andrianto

Jumlah Halaman : Halaman

Ukuran Buku : 15,5 x 23 cm

Cetakan 1, Desember 2024

Penerbit “Zahira Media Publisher”

CV. ZT CORPORA

E-mail: zahiramediapublisher@gmail.com

Anggota IKAPI : 191/JTE/2020

PEMASARAN

CV. ZT CORPORA, Jl. Ach Zein No. 97 D Pasir

Kidul, Purwokerto Barat,

Banyumas, Jawa Tengah

E-mail: cv.ztcorpora@gmail.com

Hak Cipta © 2024 pada Penulis

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Kata Pengantar

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah *Subhanahu wa Ta'Ala* atas selesainya penyusunan buku ajar ini, yang berjudul *Principle of Nutrition*. Buku ini dirancang untuk membantu mahasiswa memahami konsep dasar ilmu gizi sebagai landasan penting dalam mempelajari dan mengaplikasikan ilmu gizi di berbagai bidang.

Buku ini disusun dengan mengacu pada literatur terkini dan disesuaikan dengan kebutuhan pembelajaran yang interaktif dan aplikatif. Materi yang dibahas meliputi berbagai aspek gizi, seperti karbohidrat, protein, lemak, vitamin, mineral, proses metabolisme energi zat gizi, serta interaksi vitamin dan mineral. Setiap bab dilengkapi latihan soal untuk mengukur pemahaman mahasiswa terhadap materi yang telah dipelajari, sekaligus membantu mereka mengasah kemampuan analitis dan aplikatif dalam memahami konsep-konsep ilmu gizi.

Kami menyadari bahwa penyusunan buku ini masih terdapat kekurangan, baik dari segi isi maupun penyajian. Oleh karena itu, kritik dan saran dari pembaca sangat kami harapkan demi penyempurnaan buku ajar ini di masa mendatang. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang besar bagi para mahasiswa, dosen, dan semua pihak yang tertarik pada ilmu gizi. Selamat membaca dan semoga sukses dalam pembelajaran.

Hormat kami,

Tim Penyusun

Daftar Isi

BAB 1 KONSEP DASAR ILMU GIZI	1
BAB 3 KAITAN ANTARA MAKANAN DAN ENERGI	31
BAB 4 KARBOHIDRAT	57
BAB V LEMAK	101
BAB VI PROTEIN	133
BAB VII VITAMIN LARUT LEMAK(A, D, E, dan K)	166
BAB VIII VITAMIN LARUT AIR (B dan C)	186
BAB IX Mineral Makro (Ca, Na, P, Mg)	247
BAB X MINERAL MIKRO (K, I, Zn, Fe, Se, F)	266
BAB XI INTERAKSI VITAMIN & MINERAL	280

Daftar Tabel

Tabel 4.1. Hasil Metabolisme Karbohidrat (8).....	81
Tabel 4.2. Angka Kecukupan Karbohidrat yang Dianjurkan	95
Tabel 5.1. Penamaan Asam Lemak Menurut <i>International Union Of Pure and Applied Chemistry</i> (IUPAC) dan Nama Umum ...	106
Tabel 5.2. Angka Kecukupan Lemak untuk Lemak Total, Omega 3, dan Omega 6 yang Dianjurkan.....	114
Tabel 5.3. Proses pemanjangan asetil-KoA dengan bahan antara malonil-KoA menjadi asam lemak	120
Tabel 6.3. Angka Kecukupan Protein yang Dianjurkan.....	143
Tabel 6.3. Enzim yang Berperan dalam Pencernaan Protein ...	148
Tabel 7.1. Kebutuhan Vitamin A Menurut AKG 2019	171
Tabel 7.2. Makanan Sumber Vitamin A.....	173
Tabel 7.3. Jumlah Vitamin E yang Dibutuhkan Menurut AKG	179
Tabel 9.1. Angka Kecukupan Kalsium yang Dianjurkan (Per Orang Per Hari)	251
Tabel 9.3. Angka Kecukupan Fosfor yang Dianjurkan.....	258
Tabel 10.1. Angka Kecukupan Kalium yang Dianjurkan	268
Tabel 10.6. Angka Kecukupan Fluor yang Dianjurkan.....	277
Tabe 11.1. Karakteristik Zat Besi, Vitamin C dan Vitamin A	282
Tabel 11.2. Karakteristik Kalsium dan Vitamin D.....	287
Tabel 11.3. Karakteristik Asam Folat dan Vitamin B12	288
Tabel 11. 4. Karakteristik Tembaga dan Zinc	291
Tabel 11.5. Karakteristik Natrium dan Potassium	293

Daftar Gambar

Gambar 1.1. Tumpeng Gizi Seimbang	11
Gambar 1.2. Isi Piringku	13
Gambar 2.1. Proses Pencernaan Makanan	22
Gambar 3.1. Struktur Organela Sel Hewan	33
Gambar 3.3. Struktur Mitokondria	36
Gambar 3.4. Proses Fermentasi Asam Laktat [1], dan Fermentasi Alkohol [2]	37
Gambar 3.5. Siklus Asam Sitrat (1).....	40
Gambar 3.6. Keseimbangan Energi.....	46
Gambar 4.1. Struktur Monosakarida	62
Gambar 4.2. Rantai Struktur Glikogen, Amilopektin dan.....	66
Gambar 4.3. Sepuluh Tahapan Glikolisis.....	72
Gambar 4.4. Jalur glikolisis galaktosa.....	73
Gambar 4.5. Metabolisme Fruktosa di Hati (7).....	75
Gambar 4.6. Siklus Asam Sitrat	79
Gambar 4.7. Transfer Elektron (6)	81
Gambar 4.8. Jalur glikogenesis dan glikogenolisis (6).....	86
Gambar 4.9. Tahapan Gluconeogenesis	92
Gambar 5.2. Struktur asam lemak jenuh (a) dan gambaran zigzag asam lemak (b).....	105
Gambar 6.1. Tingkatan Struktur Protein	135
Gambar 6.2. Berbagai Sumber Protein.....	137
Gambar 6.3. Proses Siklus Urea	152
Gambar 6.4. Penggunaan kerangka karbon atau asam α -keto	154
Gambar 7.1 Konversi retinoid menjadi beberapa bentuk.....	167
Gambar 7.2. Perbedaan Struktur Vitamin A	168

Gambar 7.2. Xerophtalmia	170
Gambar 7.3 Proses sintesis vitamin D endogen dengan paparan UVB	174
Gambar 7.4. Struktur Vitamin K	180
Gambar 8.1. Metabolisme Vitamin B dalam Tubuh	189
Gambar 8.1. Struktur Kimia Vitamin B12 (kobalamin).....	231
Gambar 8.2. Struktur Kimia Vitamin C (Asam Askorbat).....	239
Gambar 11.2. Gambaran zat besi beserta zat pendukung dan penghambat fungsinya (Sumber : (5)).....	286
Gambar 11.3. Komponen Elektrolit dalam Plasma, Cairan Interstitial dan Kompartemen Intraseluler dalam Tubuh	294

BAB 1

KONSEP DASAR ILMU GIZI

Lisana Shidiq Aliya
Yhona Paratmanitya

Tujuan Instruksional Khusus

Setelah mengikuti bab ini diharapkan mahasiswa mampu:

1. Mampu memahami dan menjelaskan jenis, fungsi dan makanan sumber zat gizi.
2. Mampu memahami dan menjelaskan konsep dasar ilmu gizi dan gizi seimbang.

1. Istilah dalam Ilmu Gizi

Ilmu Gizi atau Nutrition Science adalah cabang ilmu yang mempelajari tentang makanan dan hubungannya dengan kesehatan tubuh. Menurut WHO, ilmu gizi mencakup kajian mengenai berbagai proses yang terjadi pada organisme hidup, termasuk bagaimana zat-zat gizi dari makanan diolah untuk mendukung pertumbuhan, menghasilkan energi, dan menjaga fungsi serta struktur jaringan tubuh(1).

Dalam ilmu gizi, terdapat beberapa istilah penting yang perlu dipahami:

- a. Ilmu Gizi (*Science of Nutrition*) adalah ilmu yang mempelajari segala sesuatu tentang makanan dalam hubungannya dengan kesehatan optimal/ tubuh (2).
- b. Gizi (Nutrition)
Gizi merujuk pada proses dimana organisme memanfaatkan makanan yang dikonsumsi melalui serangkaian tahapan, seperti pencernaan, penyerapan, transportasi, penyimpanan, metabolisme, dan pembuangan zat-zat yang tidak dibutuhkan. Proses ini bertujuan untuk mempertahankan kehidupan, mendukung pertumbuhan, menjaga fungsi organ-organ tubuh, serta menghasilkan energi. Secara etimologi, istilah "gizi" berasal dari kata *ghidza* yang berarti makanan (2).
- c. Zat Gizi (Nutrients)
Zat gizi adalah senyawa kimia yang diperlukan oleh tubuh untuk menjalankan berbagai fungsi vital, seperti menghasilkan

energi, membangun dan memelihara jaringan tubuh, serta mengatur proses kehidupan (2).

d. Bahan Makanan

Istilah ini mengacu pada makanan dalam kondisi mentah atau yang belum melalui proses pengolahan lebih lanjut (2).

e. Pangan

Pangan adalah istilah yang digunakan untuk bahan yang dapat diolah menjadi makanan, baik dalam kondisi mentah maupun matang (3).

f. Makanan

Makanan merupakan bahan selain obat yang mengandung zat gizi atau senyawa kimia lain yang dapat diubah menjadi zat gizi oleh tubuh. Bahan ini memiliki manfaat bagi tubuh ketika dikonsumsi (2).

g. Status Gizi

h. Status gizi menggambarkan keseimbangan antara asupan dan pemanfaatan zat gizi oleh tubuh, yang dapat diukur melalui berbagai indikator. Status gizi juga dapat diartikan sebagai kondisi tubuh yang mencerminkan hasil dari konsumsi makanan dan pemanfaatan zat gizi tersebut (2).

2. Sejarah/Perkembangan Ilmu Gizi

a. Perkembangan Ilmu Gizi

Ilmu gizi sebenarnya telah dikenal sejak zaman kuno, meskipun pada masa itu fokusnya masih terbatas pada makanan sebagai sarana untuk mempertahankan hidup dan mengobati penyakit. Sekitar 400 tahun sebelum Masehi, seorang tokoh Yunani bernama Hipocrates menyatakan bahwa makanan merupakan kebutuhan dasar manusia. Teorinya menyatakan bahwa makanan sebagai panas yang dibutuhkan manusia, artinya manusia butuh makan. Hipocrates juga Berhasil menyembuhkan orang-orang yang menderita rabun senja dengan memberikan makanan ekstra berupa hati binatang buruan (Vitamin A) (4)(5).

Penelitian-penelitian terdahulu tentang gizi :

- Para awak kapal Vasco de Gama (1497) diserang penyakit skorbut (gusi bengkak, gigi mudah tanggal, gangguan pencernaan), akhirnya diketahui bahwa mereka kekurangan vitamin C karena selama berbulan-bulan para awak kapal tersebut tidak mengkonsumsi makanan segar (5).
- Penelitian tentang Pernafasan dan Kalorimetri
- Kemajuan ilmu gizi mulai terlihat pada abad ke-18 dengan kontribusi Antoine Lavoisier (1743-1794), yang mempelajari proses pernapasan, oksidasi, dan kalorimetri. Penelitian yang dimulai oleh Lavoisier kemudian berkembang pada awal abad ke-20 menjadi kajian tentang sifat-sifat bahan makanan pokok dan pertukaran energi di dalam tubuh (5).
- Penelitian komponen utama zat gizi
Memasuki abad ke-19, seorang ahli kimia asal Prancis, Megendie, berhasil mengidentifikasi tiga komponen utama zat gizi dalam makanan, yaitu protein, lemak, dan karbohidrat (5).
- Penemuan Mineral
Tahun 1808 → ditemukan kalsium & Boussingault menemukan zat besi sebagai zat esensial. Ringer (1885) dan Locke (1990) → menemukan cairan tubuh perlu konsentrasi elektrolit tertentu. Awal abad 20 → penelitian Loeb tentang pengaruh konsentrasi garam natrium, kalium dan kalsium klorida terhadap jaringan hidup (5).
- Penemuan Vitamin
Sejak tahun 1887-1905 muncul penelitian-penelitian dengan makanan yang dimurnikan dan makanan utuh. Dengan hasil: ditemukan suatu zat aktif dalam makanan yang tidak tergolong zat gizi utama dan berperan dalam pencegahan penyakit (Scurvy dan Rickets). Tahun 1912 → Funk mengusulkan memberi nama vitamine untuk zat tersebut. Tahun 1920 → diakui sebagai zat esensial (5).

- Penelitian Tingkat Molekular dan Selular
Dimulai tahun 1955, dan diperoleh pengertian tentang struktur sel yang rumit serta peranan kompleks dan vital zat gizi dalam pertumbuhan dan pemeliharaan sel-sel. Setelah tahun 1960, penelitian bergeser dari zat-zat gizi esensial ke inter relationship antara zat-zat gizi, peranan biologik spesifik, penetapan kebutuhan zat gizi manusia dan pengolahan makanan thdp kandungan zat gizi (5).
- Pada tahun 1926, Mary Swartz Rose diangkat sebagai profesor pertama dalam bidang ilmu gizi, menandai pengakuan ilmu gizi sebagai disiplin ilmu yang berdiri sendiri(5).
- Hingga saat ini muncul konsep-konsep baru yang masih terus diteliti, antara lain: nutrigenomik, nutrigenetik, telenutrition (6).

b. Perkembangan Ilmu Gizi di Indonesia

Di Indonesia, perkembangan ilmu gizi dimulai dengan pendirian Laboratorium Kesehatan di Jakarta oleh pemerintah kolonial Belanda pada tahun 1888. Laboratorium ini didirikan untuk menangani masalah penyakit beri-beri yang meluas di Indonesia dan Asia. Selanjutnya, antara tahun 1919 hingga 1938, Jansen dan Donath mengadakan penelitian tentang gangguan kesehatan akibat gondok di daerah Wonosobo. Penelitian ini menjadi salah satu dasar untuk pendirian Lembaga Eijkman, yang kemudian melakukan survei gizi pada tahun 1927 hingga 1942. Survei ini bertujuan mempelajari pola makan, status gizi masyarakat, kondisi pertanian, dan situasi ekonomi. Lembaga ini juga menyusun analisis zat gizi dalam bahan makanan, yang kini dikenal sebagai Daftar Komposisi Bahan Makanan (DKBM) (4).

Pada tahun 1934, didirikan Lembaga Makanan Rakyat, dengan Prof. Poerwo Soedarmo sebagai ketuanya. Beliau, yang dikenal sebagai Bapak Gizi Indonesia, memperkenalkan konsep

promosi gizi melalui slogan “Empat Sehat Lima Sempurna,” yang menjadi panduan dasar masyarakat dalam pola makan sehat.

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) dalam bidang gizi, serta berbagai masalah dan tantangan yang dihadapi, menjadikan konsep "Empat Sehat Lima Sempurna" tidak lagi relevan dengan kondisi gizi saat ini. Sebagai respons terhadap kebutuhan zaman, Kementerian Kesehatan Indonesia mulai mengembangkan *Pedoman Gizi Seimbang* (PGS) pada tahun 1995 dan melakukan revisi pada 2014. Konsep ini didasarkan pada *Nutrition Guide for Balanced Diet* yang disepakati dalam Konferensi Pangan Dunia yang diselenggarakan oleh *Food and Agriculture Organization* (FAO) di Roma, Italia, pada 1992. Pedoman ini diyakini mampu mengatasi permasalahan gizi ganda, yakni kekurangan gizi dan kelebihan gizi (4).

Di Indonesia, pedoman gizi disampaikan melalui dua panduan utama:

1. Tumpeng Gizi Seimbang, yang menyerupai piramida makanan dan merepresentasikan prinsip gizi seimbang. Model ini terinspirasi dari *Food Guide Pyramid* yang diperkenalkan oleh *United States Department of Agriculture* (USDA) pada 1992. PGS pertama kali diterima secara resmi pada 2009 melalui Undang-Undang Kesehatan No. 36 Tahun 2009, dan kemudian disempurnakan dalam Peraturan Menteri Kesehatan No. 41 Tahun 2014 (7).
2. Isi Piringku, sebuah panduan berupa visualisasi porsi makan dalam satu piring. Panduan ini menggambarkan proporsi makanan yang disarankan dalam sekali makan, mencakup kelompok makanan utama seperti karbohidrat, protein, sayur, dan buah(8).

Kedua pedoman ini dirancang untuk memperkenalkan pola makan sehat kepada masyarakat dan mendorong penerapan gaya hidup sehat yang lebih modern dan terintegrasi.

3. Ruang Lingkup Ilmu Gizi

Ruang lingkup ilmu gizi cukup luas, dimulai dari :

- a. Gizi individu; Gizi keluarga dan masyarakat; Gizi institusi; Gizi olahraga
- b. Gizi klinis, meliputi :
 - Anamnesis dan pengkajian status gizi pasien.
 - Pemeriksaan fisik yang berkaitan dengan defisiensi zat gizi
 - Pemeriksaan antropometris dan tindak lanjut terhadap gangguannya.
 - Pemeriksaan radiologi dan tes laboratorium yang berhubungan dg status gizi pasien.
 - Suplementasi oral, enteral dan parenteral.
 - Interaksi timbal balik antara nutrien dan obat-obatan.
- c. Bahan tambahan makanan (pewarna, penyedap dan sejenis serta bahan-bahan kontaminan).
- d. Cara produksi pangan
- e. Perubahan pascapanen (penyediaan pangan, distribusi dan pengolahan pangan, konsumsi makanan serta cara pemanfaatan makanan oleh tubuh yang sehat dan sakit).
- f. Ilmu gizi berkaitan dengan ilmu agronomi, peternakan, ilmu pangan, mikrobiologi, biokimia, faal, biologi molekular dan kedokteran.
- g. Informasi gizi yang diberikan pada masyarakat, yang meliputi gizi individu, keluarga dan masyarakat; gizi institusi dan gizi olahraga.
- h. Karena konsumsi makanan dipengaruhi oleh kebiasaan makan, perilaku makan dan keadaan ekonomi maka ilmu gizi juga berkaitan dengan ilmu- ilmu sosial seperti antropologi, sosiologi, psikologi, dan ekonomi.

4. Konsep Gizi Seimbang

Perbedaan utama antara konsep "Empat Sehat Lima Sempurna" dengan *Pedoman Gizi Seimbang* (PGS) adalah bahwa konsumsi makanan harian menurut PGS harus mengandung zat gizi dalam jenis dan jumlah (porsi) yang disesuaikan dengan kebutuhan individu atau kelompok umur tertentu. Penerapan PGS menjadi sangat penting mengingat hasil *Survei Kesehatan Indonesia* (SKI) tahun 2023 menunjukkan bahwa *Penyakit Tidak Menular* (PTM), seperti asma, kanker, diabetes, hipertensi, penyakit jantung, stroke, dan penyakit ginjal kronis, merupakan penyebab utama kematian dan pembiayaan kesehatan. Salah satu penyebab utama tingginya prevalensi PTM adalah pola makan masyarakat Indonesia yang belum sesuai dengan pedoman gizi seimbang.

Beberapa alasan perlunya mengganti konsep 4 sehat 5 sempurna adalah:

- a. Dalam konsep 4 sehat 5 sempurna baru memunculkan jenis makanan yang perlu dikonsumsi, tapi belum dilengkapi dengan seberapa banyak makanan tersebut perlu dikonsumsi
- b. Dalam konsep 4 sehat 5 sempurna, muncul kesan bahwa gizi baru akan tercukupi setelah minum susu sebagai penyempurna. Padahal, posisi susu sebenarnya hanya sebagai salah satu jenis makanan sumber protein, sumber kalsium, dimana protein dan kalsium juga bisa ditemukan di bahan makanan yang lain, tidak hanya susu.

Data SKI 2023 mengungkapkan bahwa 96,7% masyarakat masih kurang mengonsumsi buah dan sayur; 37% jarang melakukan aktivitas fisik; 22,46% dari populasi adalah perokok aktif; 23,4% mengalami obesitas, dan 36,8% menderita obesitas sentral. Kondisi ini menggambarkan perlunya penerapan pola makan yang lebih sehat, sebagaimana direkomendasikan oleh WHO. WHO menekankan bahwa pola makan sehat mampu melindungi tubuh dari malnutrisi dan PTM, seperti diabetes, stroke, dan kanker. Keseimbangan asupan kalori dan

pengeluaran energi menjadi kunci penting. Total lemak yang dikonsumsi pun tidak boleh melebihi 30% dari total energi untuk mencegah kenaikan berat badan yang tidak sehat (8).

Pemerintah Indonesia diharapkan dapat meningkatkan kampanye sosialisasi, edukasi, dan komunikasi terkait PGS, agar masyarakat lebih memahami bahwa konsep "Empat Sehat Lima Sempurna" sudah tidak relevan dan telah digantikan oleh PGS. Selain itu, keterlibatan aktif berbagai pemangku kepentingan, seperti instansi di bidang pendidikan, agama, pertanian, perdagangan, perindustrian, kelautan, serta sektor swasta dan masyarakat, juga diperlukan. Dengan penerapan PGS yang efektif, masalah gizi ganda di Indonesia dapat diatasi, dan visi "Indonesia Emas 2045" dapat terwujud.

5. Pedoman Umum Gizi Seimbang

Pedoman Gizi Seimbang bertujuan untuk memberikan panduan konsumsi makanan sehari-hari dan berperilaku sehat berdasarkan prinsip konsumsi anekaragam pangan, perilaku hidup bersih, aktivitas fisik, dan memantau berat badan secara teratur dalam rangka mempertahankan berat badan normal (Permenkes No 41 tahun 2014) (7).

Makanan yang dikonsumsi oleh individu sehari-hari hendaknya yang beraneka ragam dan memenuhi 5 kelompok zat gizi dalam jumlah yang cukup, tidak berlebihan dan tidak kekurangan. Cukup secara kuantitas, cukup secara kualitas, mengandung berbagai zat gizi (energi, protein, vitamin dan mineral) yang diperlukan tubuh untuk tumbuh (pada anak-anak), untuk menjaga kesehatan dan untuk melakukan aktivitas dan fungsi kehidupan sehari-hari (bagi semua kelompok umur dan fisiologis), serta menyimpan zat gizi untuk mencukupi kebutuhan tubuh saat konsumsi makanan tidak mengandung zat gizi yang dibutuhkan.

Sepuluh (10) pesan umum gizi seimbang, meliputi:

- 1) Syukuri dan Nikmati Anekaragam Makanan
- 2) Banyak Makan Sayuran dan Cukup Buah-Buahan
- 3) Biasakan Mengonsumsi Lauk Pauk yang Mengandung Protein Tinggi
- 4) Biasakan Mengonsumsi Anekaragam Makanan Pokok.
- 5) Batasi Konsumsi Pangan Manis, Asin dan Berlemak.
- 6) Biasakan Sarapan.
- 7) Biasakan Minum Air Putih yang Cukup dan Aman.
- 8) Biasakan Membaca Label Pada Kemasan Pangan.
- 9) Cuci Tangan Pakai Sabun dengan Air Bersih Mengalir.
- 10) Lakukan aktivitas fisik yang cukup dan Pertahankan Berat Badan Normal.

6. Piramida/Tumpeng Gizi Seimbang

Ada dua visual Gizi Seimbang, yaitu:

- 1) Tumpeng Gizi Seimbang.

Tumpeng Gizi Seimbang adalah ilustrasi sederhana yang menjadi panduan pola makan sehat dan gaya hidup sehari-hari. Model ini dirancang untuk membantu masyarakat memahami pentingnya menjaga keseimbangan gizi melalui makanan, minuman, kebersihan, aktivitas fisik, dan pemantauan berat badan.

Tumpeng Gizi Seimbang terbagi menjadi empat lapisan, mulai dari lapisan bawah yang lebih besar hingga lapisan atas yang lebih kecil. Setiap lapisan menggambarkan prioritas konsumsi pangan berdasarkan jumlah dan pentingnya:

- a. Lapisan Dasar: Mencakup aktivitas fisik yang direkomendasikan dilakukan minimal tiga kali seminggu. Selain itu, kebersihan pribadi seperti mencuci tangan sebelum dan sesudah makan turut menjadi elemen utama.
- b. Lapisan Kedua: Menyoroti pentingnya konsumsi makanan pokok, seperti nasi, gandum, atau jagung sebagai sumber energi utama.

- c. Lapisan Ketiga: Berisi sayuran dan buah-buahan dengan rekomendasi 3–4 porsi sayur (300 gram per hari) dan 2–3 porsi buah (150 gram per hari) untuk memenuhi kebutuhan serat dan vitamin.
- d. Lapisan Teratas: Gula, garam, dan lemak yang perlu dibatasi karena hanya dibutuhkan dalam jumlah kecil.

Di sisi Tumpeng Gizi Seimbang, terdapat simbol +8 gelas yang menunjukkan anjuran konsumsi air putih sebanyak 8 gelas per hari untuk menjaga hidrasi tubuh. Selain itu, visualisasi juga menampilkan siluet olahraga, menimbang berat badan, dan mencuci tangan untuk mempertegas empat pilar Gizi Seimbang: konsumsi pangan beragam, aktivitas fisik, kebersihan, dan pemantauan berat badan (1).

Model Tumpeng Gizi Seimbang ini menjadi bagian dari edukasi kesehatan masyarakat yang menekankan prinsip pengurangan risiko penyakit kronis dan malnutrisi melalui kebiasaan hidup sehat dan gizi seimbang.



Gambar 1.1. Tumpeng Gizi Seimbang

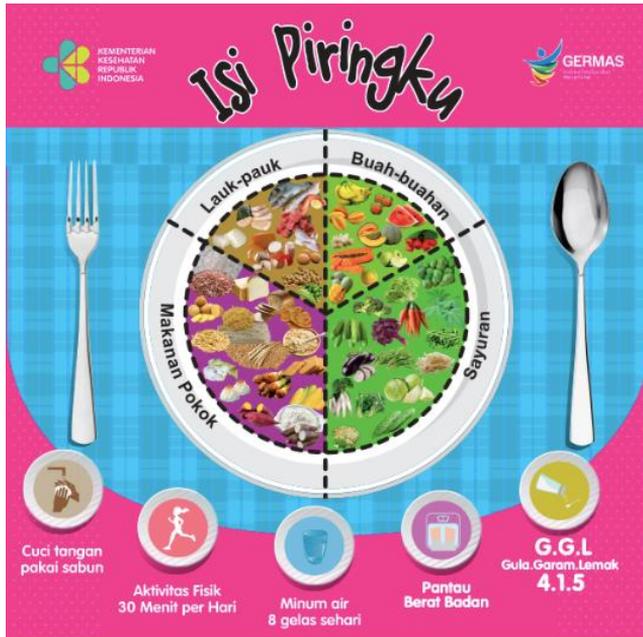
2) Isi Piringku

Isi Piringku adalah sebuah panduan yang memberikan gambaran ideal mengenai porsi makanan dan minuman dalam setiap kali makan, seperti saat sarapan, makan siang, atau makan malam. Visualisasi ini menunjukkan bahwa setengah (50%) dari piring terdiri dari sayuran dan buah-buahan, sementara setengahnya lagi terdiri dari makanan pokok dan lauk-pauk. Dalam pembagian tersebut, dianjurkan agar porsi sayuran lebih banyak daripada buah-buahan, sedangkan porsi makanan pokok lebih besar dibandingkan lauk-pauk.

Panduan ini juga menekankan pentingnya mengonsumsi minuman di setiap waktu makan, baik sebelum, saat, maupun setelah makan, dengan jumlah yang dapat disesuaikan sesuai kebutuhan individu. Meskipun visual Isi Piringku menampilkan satu gelas minuman, jumlah sebenarnya dapat lebih dari itu, misalnya segelas sebelum makan dan satu lagi setelah makan.

Selain itu, kebersihan menjadi perhatian utama dalam Isi Piringku. Prinsip ini mencakup anjuran mencuci tangan sebelum dan sesudah makan serta memastikan makanan dan peralatan makan dalam kondisi bersih dan aman. Walaupun Isi Piringku tidak mencantumkan anjuran untuk aktivitas fisik atau pemantauan berat badan, aspek-aspek tersebut diwakili dalam panduan lain, yaitu Tumpeng Gizi Seimbang.

Dengan panduan ini, Isi Piringku mendukung prinsip Gizi Seimbang sebagai pola makan sehat yang dapat membantu menjaga kesehatan dan mencegah berbagai penyakit (8).



Gambar 1.2. Isi Piringku

7. Jenis Zat Gizi

Zat gizi dibagi menjadi dua kelompok utama berdasarkan kebutuhannya dalam tubuh, yaitu makronutrien (karbohidrat, protein, lemak) dan mikronutrien (vitamin dan mineral) (3)(9).

a. Karbohidrat

Karbohidrat adalah senyawa yang tersusun dari karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O). Dalam tubuh, karbohidrat diubah menjadi energi, dengan setiap gramnya menghasilkan 4 kalori. Berdasarkan ukuran molekulnya, karbohidrat dikelompokkan menjadi monosakarida, disakarida, dan polisakarida. Sumber utama karbohidrat adalah makanan

berbasis tumbuhan seperti beras, gandum, jagung, kentang, dan umbi-umbian. Karbohidrat penting untuk mendukung aktivitas seperti bernapas, bekerja, dan fungsi tubuh lainnya (10).

b. Protein

Protein merupakan senyawa yang mengandung unsur C, H, O, dan N, serta kadang mengandung fosfor (P) dan sulfur (S). Protein dibedakan berdasarkan sumbernya menjadi protein nabati (contohnya kacang-kacangan, tahu, tempe) dan protein hewani (daging, telur, susu, ikan, keju). Fungsi protein meliputi pembentukan dan perbaikan jaringan tubuh, seperti kulit, rambut, kuku, darah, enzim, dan hormon. Setiap gram protein menghasilkan 4 kalori (10).

c. Lemak

Lemak adalah senyawa yang mengandung C, H, dan O, dengan setiap gramnya memberikan 9 kalori. Fungsi utama lemak adalah sebagai sumber energi dan pelarut vitamin A, D, E, dan K. Selain itu, lemak memberikan rasa kenyang lebih lama dan menambah cita rasa makanan. Lemak banyak terdapat pada minyak, daging berlemak, dan produk olahan seperti mentega (10).

d. Mineral

Mineral adalah senyawa anorganik yang memainkan peran penting dalam tubuh, seperti membangun tulang dan gigi, serta mendukung fungsi enzim dan hormon. Contoh mineral penting meliputi kalsium, zat besi, magnesium, fosfor, natrium, dan kalium. Sumber mineral termasuk sayuran hijau seperti bayam dan kangkung, telur, dan makanan laut (3).

e. Vitamin

Vitamin adalah senyawa organik esensial yang diperlukan tubuh dalam jumlah kecil untuk mendukung reaksi metabolisme. Berdasarkan kelarutannya, vitamin dibagi

menjadi dua jenis: vitamin larut lemak (A, D, E, K) dan vitamin larut air (B dan C). Fungsi utama vitamin adalah membantu pertumbuhan dan pemeliharaan kesehatan tubuh (3).

8. Rangkuman

Ilmu gizi merupakan cabang ilmu kesehatan yang mempelajari hubungan antara makanan, nutrisi, dan kesehatan tubuh. Istilah dalam ilmu gizi meliputi makronutrien (karbohidrat, protein, lemak) yang diperlukan dalam jumlah besar, serta mikronutrien (vitamin dan mineral) yang dibutuhkan dalam jumlah kecil untuk fungsi tubuh.

Ilmu gizi dimulai sejak zaman purba dengan fokus pada makanan sebagai sumber kehidupan. Pada abad ke-18, Antoine Lavoisier mengembangkan penelitian tentang metabolisme. Abad ke-20 membawa pengakuan ilmu gizi sebagai disiplin tersendiri dengan riset-riset tentang zat gizi. Di Indonesia, ilmu gizi berkembang melalui penelitian terkait penyakit kekurangan gizi, seperti beri-beri dan gondok, serta pengenalan konsep "Empat Sehat Lima Sempurna" oleh Prof. Poerwo Soedarmo. Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) dalam bidang gizi, serta berbagai masalah dan tantangan yang dihadapi, menjadikan konsep "Empat Sehat Lima Sempurna" tidak lagi relevan dengan kondisi gizi saat ini. Kementerian Kesehatan Indonesia mulai mengembangkan *Pedoman Gizi Seimbang* (PGS) pada tahun 1995 dan melakukan revisi pada 2014.

Ruang lingkup ilmu gizi meliputi gizi klinis, gizi masyarakat, gizi olahraga, dan gizi institusi. Ilmu gizi mencakup studi tentang kebutuhan gizi individu berdasarkan umur, jenis kelamin, aktivitas fisik, serta pengaruh lingkungan terhadap status gizi. Konsep gizi seimbang meliputi empat pilar utama: konsumsi makanan yang beragam, menjaga kebersihan, melakukan aktivitas fisik secara rutin, dan memantau berat badan. Konsep ini bertujuan memenuhi kebutuhan nutrisi individu tanpa kekurangan atau kelebihan.

Pedoman Umum Gizi Seimbang (PUGS) adalah panduan kesehatan nasional yang menggantikan konsep "Empat Sehat Lima Sempurna." Pedoman ini mencakup pesan utama tentang pentingnya pola makan beragam, konsumsi buah dan sayur, aktivitas fisik, serta pembatasan konsumsi gula, garam, dan lemak.

Tumpeng Gizi Seimbang menggambarkan porsi makan sehari-hari berdasarkan prioritas kebutuhan gizi. Lapisan bawah mencakup makanan pokok, sayuran, buah-buahan, dan protein, sementara lapisan atas berisi gula, garam, dan lemak yang harus dibatasi. Tumpeng ini juga menekankan pentingnya minum air putih dan aktivitas fisik.

Zat gizi terdiri atas makronutrien (karbohidrat, protein, dan lemak sebagai sumber energi), mikronutrien (vitamin dan mineral yang mendukung fungsi metabolisme dan Kesehatan), dan air (komponen utama tubuh yang berperan dalam transportasi zat gizi dan pengaturan suhu tubuh).

9. Latihan dan Jawaban

- 1) Sebutkan perbedaan antara makronutrien dan mikronutrien dalam ilmu gizi!

Jawaban: Makronutrien adalah zat gizi yang diperlukan tubuh dalam jumlah besar, seperti karbohidrat, protein, dan lemak, yang berfungsi sebagai sumber energi dan komponen utama tubuh.

Mikronutrien adalah zat gizi yang dibutuhkan dalam jumlah kecil, seperti vitamin dan mineral, yang berfungsi untuk mendukung proses metabolisme dan menjaga kesehatan tubuh.

- 2) Apa alasan konsep "Empat Sehat Lima Sempurna" dianggap tidak lagi relevan dan digantikan dengan Pedoman Umum Gizi Seimbang (PUGS)?

Jawaban: Konsep "Empat Sehat Lima Sempurna" tidak memperhatikan jumlah dan proporsi zat gizi sesuai kebutuhan individu, serta tidak mencakup aspek kebersihan, aktivitas fisik, dan pemantauan berat badan. Oleh karena itu, PUGS dirancang untuk lebih komprehensif dengan menyesuaikan perkembangan ilmu gizi terkini dan menangani beban ganda masalah gizi.

3) Sebutkan empat pilar dalam konsep Gizi Seimbang!

Jawaban: Empat pilar Gizi Seimbang meliputi:

- a. Konsumsi makanan yang beragam.
- b. Menjaga kebersihan pribadi dan lingkungan.
- c. Melakukan aktivitas fisik secara rutin.
- d. Memantau berat badan untuk mempertahankan berat badan ideal.

4) Apa makna dari ukuran lapisan tumpeng yang semakin kecil ke atas pada Tumpeng Gizi Seimbang? Jawaban: Semakin kecil ukuran lapisan tumpeng berarti semakin sedikit porsi makanan yang dianjurkan. Misalnya, lapisan atas yang berisi gula, garam, dan lemak hanya diperlukan dalam jumlah kecil, sedangkan lapisan bawah seperti makanan pokok harus dikonsumsi lebih banyak.

5) Jelaskan empat ruang lingkup ilmu gizi beserta contohnya!

Jawaban:

- a. Gizi Klinik: Fokus pada penanganan gizi pasien di rumah sakit, misalnya pemberian diet rendah garam untuk penderita hipertensi.
- b. Gizi Masyarakat: Mengkaji masalah gizi pada populasi, seperti program fortifikasi gizi untuk mencegah anemia pada anak-anak.
- c. Gizi Olahraga: Memberikan panduan nutrisi bagi atlet untuk meningkatkan performa, seperti suplementasi protein.

- d. Gizi Institusi: Mengelola pola makan dalam skala besar, seperti di sekolah atau pabrik.

1. Daftar Pustaka

1. Hardinsyah. Ilmu Gizi Teori dan Aplikasi. Jakarta: EGC Penerbit Buku Kedokteran; 2017.
2. Sandjadja. Kamus gizi: pelengkap kesehatan keluarga. Jakarta: Penerbit Buku Kompas; 2009.
3. Khomsan A, others. Pangan dan gizi untuk kesehatan. Jakarta: PT. Rajagrafindo Persada. 2003.
4. Estofany F. Direktorat Jenderal Pelayanan Kesehatan Kemenkes. 2022. Konsep Dasar dan Sejarah Perkembangan Ilmu Gizi.
5. Judi S. Morrill. History of Nutrition Science [Internet]. San Jose State University; 2022. Available from: [https://med.libretexts.org/Bookshelves/Nutrition/Science_Physiology_and_Nutrition_for_the_Nonscientist_\(Morrill\)/01%3A_Behind_the_Soundbite/1.02%3A_History_of_Nutrition_Science](https://med.libretexts.org/Bookshelves/Nutrition/Science_Physiology_and_Nutrition_for_the_Nonscientist_(Morrill)/01%3A_Behind_the_Soundbite/1.02%3A_History_of_Nutrition_Science)
6. Judi S. Morrill. Science and Nutrition Today [Internet]. San Jose State University; 2023. Available from: [https://med.libretexts.org/Bookshelves/Nutrition/Science_Physiology_and_Nutrition_for_the_Nonscientist_\(Morrill\)/01%3A_Behind_the_Soundbite/1.03%3A_Science_and_Nutrition_Today](https://med.libretexts.org/Bookshelves/Nutrition/Science_Physiology_and_Nutrition_for_the_Nonscientist_(Morrill)/01%3A_Behind_the_Soundbite/1.03%3A_Science_and_Nutrition_Today)
7. Kementerian Kesehatan RI. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia tentang Angka Kecukupan Gizi yang Dianjurkan Bagi Masyarakat Indonesia. 2019.
8. Darmawanti B. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. 2022. Isi Piringku: Pedoman Makan Kekinian Orang Indonesia. Available from: <https://ayosehat.kemkes.go.id/isi-piringku-pedoman-makan-kekinian-orang-indonesia>
9. Whitney E, Rolfes SR. Understanding Nutrition. Cengage Learning; 2018.
10. Winarno FG. Kimia Pangan dan Gizi. Jakarta: P.T. Gramedia; 1984.

BAB 2 PROSES PENCERNAAN DAN ABSORPSI

Wiji Indah Lestari

Tujuan Instruksional Khusus

Setelah mengikuti bab ini diharapkan mahasiswa mampu:

1. Mampu memahami dan menjelaskan proses Sistem Pencernaan.
2. Mampu memahami dan menjelaskan jenis pencernaan (Mekanik dan Kimiawi).
3. Mampu memahami dan menjelaskan enzim-enzim yang terlibat dalam Proses Pencernaan.
4. Mampu memahami dan menjelaskan hasil akhir pencernaan.

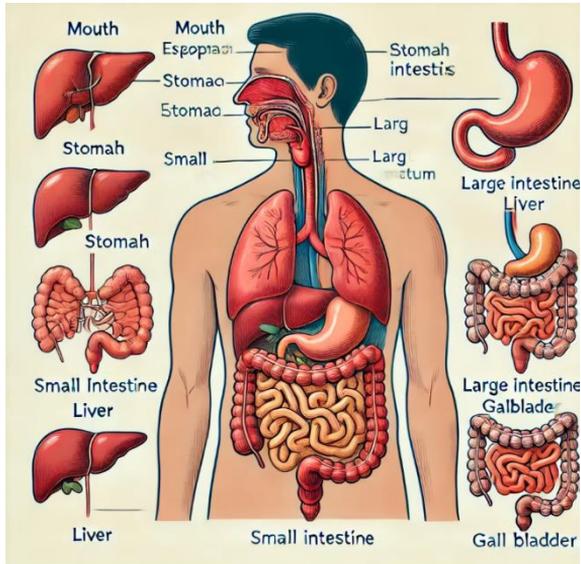
1. Sistem Pencernaan

Sistem pencernaan manusia terdiri dari saluran pencernaan (*gastrointestinal tract*) dan organ-organ tambahan seperti pankreas, hati, dan kandung empedu. Saluran pencernaan ini mencakup mulut, esofagus, lambung, usus kecil, dan usus besar. Makanan yang dikonsumsi kemudian diproses secara mekanik dan kimiawi agar nutrisinya dapat diserap oleh tubuh secara optimal.

Sistem pencernaan adalah rangkaian organ yang bekerja sama untuk memecah makanan menjadi nutrisi yang dapat diserap dan digunakan oleh tubuh. Proses ini dimulai di mulut, di mana makanan dikunyah dan dicampur dengan air liur. Setelah ditelan, makanan melewati esofagus menuju lambung, di mana asam lambung dan enzim mulai memecah makanan lebih lanjut. Dari lambung, makanan bergerak ke usus kecil, tempat sebagian besar pencernaan dan penyerapan nutrisi terjadi dengan bantuan enzim dari pankreas dan empedu dari hati. Nutrisi yang sudah dicerna diserap oleh dinding usus kecil dan masuk ke aliran darah. Sisa makanan yang tidak dicerna bergerak ke usus besar untuk dibentuk menjadi tinja dan dikeluarkan dari tubuh melalui rectum.

- **Mulut:** Di sinilah pencernaan dimulai. Makanan dikunyah dan dicampur dengan air liur yang mengandung enzim amylase untuk memecah karbohidrat.

- **Esofagus:** Setelah ditelan, makanan melewati esofagus, tabung yang menghubungkan mulut ke lambung. Gerakan peristaltik membantu mendorong makanan ke bawah.
- **Lambung:** Di lambung, makanan dicampur dengan asam lambung dan enzim pepsin yang mulai memecah protein. Makanan berubah menjadi chyme, zat semi-cair.
- **Usus Kecil:** Di sini sebagian besar pencernaan dan absorpsi terjadi. Enzim dari pankreas dan empedu dari hati membantu memecah lemak, protein, dan karbohidrat. Nutrien diserap melalui dinding usus kecil ke dalam darah.
- **Usus Besar:** Sisa makanan yang tidak tercerna masuk ke usus besar. Di sini, air dan elektrolit diserap, dan sisa makanan dibentuk menjadi tinja.
- **Rektum:** Rektum adalah bagian akhir dari usus besar, tempat penyimpanan sementara tinja sebelum dikeluarkan dari tubuh melalui anus.



Gambar 2.1. Proses Pencernaan Makanan

2. Jenis Pencernaan (Mekanik dan Kimiawi)

1) Pencernaan Mekanik

Pencernaan Mekanik: Proses yang melibatkan penghancuran fisik makanan, seperti saat dikunyah di mulut dan mengalami peristaltik di saluran pencernaan. Gerakan mekanis ini mempercepat proses kimia dengan memperbesar permukaan makanan. Adapun proses pencernaan mekanik adalah sebagai berikut:

a. Proses Mengunyah (Mastikasi)

Mengunyah adalah tahap awal dari pencernaan mekanis yang terjadi di mulut. Saat makan masuk ke mulut, gigi akan memotong makanan menjadi bagian-bagian kecil dengan bantuan air liur yang dihasilkan oleh kelenjar ludah untuk membantu melembutkan makanan agar lebih mudah ditelan. Air liur juga mengandung enzim amilase yang mulai memecah karbohidrat.

b. Gerakan Peristaltik

Gerakan Peristaltik adalah serangkaian kontraksi otot yang bergerak berirama untuk membantu mendorong makanan ke bawah melalui saluran pencernaan, dan memastikan makanan sampai ke lambung.

c. Proses di Lambung

Di lambung, makanan dicampur dengan asam lambung dan enzim, sehingga membantu menguraikan makanan secara lebih lanjut. Otot-otot lambung juga berkontraksi dalam gerakan yang disebut *churning*, yaitu mengaduk dan menghaluskan makanan, meningkatkan kontak dengan asam dan enzim. Makanan selanjutnya akan menjadi *chyme* (campuran semi-cair).

d. Pencernaan di Usus Kecil

Di usus kecil *chyme* bercampur dengan empedu (yang membantu mencerna lemak) dan enzim pankreas (yang membantu mencerna karbohidrat, protein, dan lemak). Usus kecil memiliki gerakan yang disebut *segmentation*, di mana otot-otot usus berkontraksi dan relaksasi secara bergantian untuk mencampur dan mengaduk *chyme*.

e. Usus Besar

Di usus besar, pencernaan mekanik berlanjut dalam bentuk gerakan peristaltik yang lebih lambat untuk menyerap air dan elektrolit dari sisa makanan, untuk selanjutnya membentuk tinja. Gerakan otot di usus besar membantu memindahkan sisa makanan ke rektum untuk disimpan sebelum dikeluarkan dari tubuh melalui anus.

2) Pencernaan Kimiawi

Pencernaan Kimia: Pencernaan kimiawi melibatkan pemecahan makanan menjadi molekul yang lebih kecil melalui aksi enzim. Proses ini dimulai di mulut dengan bantuan enzim saliva,

dilanjutkan oleh sekresi enzim pencernaan dari pankreas dan empedu dari hati, dan berlangsung di lambung serta usus kecil. Adapun proses pencernaan kimiawi adalah sebagai berikut:

a. Pencernaan di Mulut

Ketika makanan dikunyah, air liur yang mengandung enzim *amylase* mulai memecah karbohidrat (seperti pati) menjadi maltosa (disakarida). Karena pH air liur cenderung netral, sehingga pencernaan kimiawi di mulut tidak berlangsung lama yaitu terjadi sebelum makanan ditelan dan memasuki lambung.

b. Pencernaan di Lambung

Saat makanan sampai di lambung, sel-sel lambung memproduksi asam klorida (*HCl*), yang menciptakan lingkungan asam dengan pH sekitar 1,5 hingga 3,5. Enzim *pepsinogen*, yang dihasilkan dalam bentuk tidak aktif, kemudian diaktifkan menjadi *pepsin* dalam lingkungan asam. *Pepsin* mulai memecah protein menjadi polipeptida yang lebih kecil. Makanan dicampur dengan asam dan enzim melalui gerakan *churning* lambung mengubah makanan menjadi *chyme*, yaitu campuran semi-cair dari makanan yang dicerna.

c. Pencernaan di Usus Kecil

Di usus kecil pencernaan kimiawi berlangsung secara intensif dimana Pankreas akan mengeluarkan berbagai enzim pencernaan ke dalam usus kecil, yaitu:

- 1) Enzim *Amylase*: karbohidrat menjadi monosakarida.
- 2) Enzim *Lipase*: lemak menjadi asam lemak dan gliserol.
- 3) Enzim *Trypsin* dan *Chymotrypsin*: polipeptida menjadi asam amino.

Empedu yang di produksi oleh hati berfungsi untuk membantu mengemulsi lemak, meningkatkan luas permukaan untuk enzim lipase agar lebih efektif dalam memecah lemak.

d. Penyerapan Nutrisi

Nutrisi yang telah dipecah menjadi monosakarida, asam amino, asam lemak, gliserol selanjutnya akan diserap melalui dinding usus dan di kirim ke dalam aliran darah. Proses ini terjadi di bagian usus kecil yang disebut jejunum dan ileum. Dinding usus kecil memiliki lipatan kecil yang disebut mikrovili yang berfungsi untuk meningkatkan luas permukaan dan membantu dalam penyerapan.

3. Enzim yang Terlibat dalam Proses Pencernaan

1) Karbohidrat

- a. *Salivary Amylase*: Enzim yang disekresikan oleh kelenjar ludah, memulai pemecahan pati menjadi maltose (disakarida) saat masih di mulut.
- b. *Pancreatic Amylase*: Disekresikan oleh pancreas ke dalam usus kecil untuk melanjutkan pencernaan karbohidrat menjadi gula sederhana seperti glukosa
- c. *Maltase, Sucrase, dan Lactase*: Enzim-enzim yang terdapat di dinding usus kecil, bertanggung jawab memecah disakarida menjadi monosakarida. Maltase mengubah maltose menjadi glukosa, sucrase memecah sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa, dan lactase memecah laktosa menjadi glukosa dan galaktosa.

2) Protein

- a. *Pepsin*: Enzim yang diaktifkan dari bentuk pepsinogen oleh asam klorida di lambung. Pepsin memulai pencernaan protein dengan memecahnya menjadi polipeptida yang lebih kecil.
- b. *Trypsin dan Chymotrypsin*: Enzim-enzim yang dihasilkan oleh pancreas dan bekerja di usus kecil. Mereka memecah rantai polipeptida menjadi peptide yang lebih kecil dan asam amino.

- c. *Carboxypeptidase* dan *Aminopeptidase*: Enzim ini berfungsi di usus kecil, memecah peptide menjadi asam amino tunggal dengan memotong rantai dari ujung karboksil (*carboxypeptidase*) atau ujung amino (*aminopeptidase*).
- 3) Lemak
- a. *Gastric Lipase*: Enzim yang dihasilkan di lambung, memulai pencernaan lemak menjadi asam lemak dan monogliserida
 - b. *Pancreatic Lipase*: Enzim utama dalam pencernaan lemak di usus kecil. *Lipase* pancreas memecah trigliserida menjadi asam lemak bebas dan gliserol.
 - c. *Bile Salts*: Garam empedu yang diproduksi oleh hati dan disimpan di kantong empedu mengemulsi lemak, memperbesar luas permukaan untuk aksi lipase.

4. Hasil Akhir Pencernaan

Hasil akhir pencernaan adalah nutrisi dalam bentuk molekul yang lebih kecil, yang telah dipecah dari makanan sehingga dapat diserap oleh tubuh. Proses pencernaan dimulai dari mulut hingga rektum, dengan hasil akhir yang bervariasi tergantung pada makronutrien yang dicerna. Berikut ini adalah penjelasan tentang hasil akhir pencernaan setiap makronutrien dan cara penyerapannya.

1) Hasil Akhir Pencernaan Karbohidrat

Pencernaan karbohidrat dimulai di mulut oleh enzim *salivary amylase* dan berlanjut di usus kecil oleh enzim *pancreatic amylase*. Di dinding usus kecil, enzim seperti maltase dan sucrase menghidrolisis disakarida menjadi monosakarida dengan glukosa sebagai yang dominan. Kemudian Monosakarida diserap melalui dinding usus kecil ke dalam aliran darah. Glukosa dan fruktosa menembus sel epitel

melalui transporter khusus, lalu dibawa ke hati melalui vena porta untuk di proses lebih lanjut.

2) Hasil Akhir Pencernaan Protein

Pencernaan protein dimulai di lambung oleh enzim *pepsin* yang memecah protein menjadi proteosa dan peptida. Di usus kecil, enzim *trypsin* dan *chymotrypsin* melanjutkan pemecahan menjadi peptida yang lebih kecil dan asam amino. Protein dipecah menjadi sekitar 20 jenis asam amino, beberapa di antaranya merupakan asam amino esensial yang harus diperoleh dari makanan karena tubuh tidak dapat memproduksinya. Selanjutnya asam amino akan diserap oleh dinding usus kecil dan masuk ke aliran darah, kemudian dibawa ke sel-sel tubuh untuk membangun protein dan menjalankan berbagai fungsi lainnya.

3) Hasil Akhir Pencernaan Lemak

Pencernaan Lemak dimulai di lambung dengan sedikit bantuan dari enzim *gastric lipase*, tetapi sebagian besar pemecahan terjadi di usus kecil oleh *pancreatic lipase*. Emulsi oleh empedu sangat penting untuk meningkatkan efektivitas lipase dalam mencerna lemak. Trigliserida dipecah menjadi asam lemak bebas dan monogliserida yang diserap di usus kecil. Setelah diserap, mereka membentuk struktur yang disebut micelle untuk memudahkan transportasi melalui dinding usus. Di dalam sel usus, asam lemak dan monogliserida disusun kembali menjadi trigliserida dan dikemas dalam partikel yang disebut chylomicrons, yang kemudian dilepaskan ke system limfatik sebelum masuk ke aliran darah.

4) Hasil akhir pencernaan mikronutrien

Mikronutrien, seperti vitamin dan mineral, sangat penting untuk kesehatan dan metabolisme tubuh, meskipun tidak mengalami proses pencernaan seperti makronutrien:

a. Vitamin

Vitamin Larut Air (seperti B dan C), diserap langsung ke dalam aliran darah dari usus kecil. **Vitamin Larut Lemak** (A, D, E, K) diserap bersama lemak dan memerlukan emulsi untuk penyerapan.

b. Mineral

Mineral seperti zat besi, kalsium, dan magnesium diserap melalui dinding usus kecil. Penyerapan mineral dapat dipengaruhi oleh senyawa lain seperti fitat atau tannin dalam makanan.

5. Rangkuman

1. **Sistem Pencernaan:** Makanan diolah mulai dari mulut, esofagus, lambung, usus kecil, hingga usus besar. Organ tambahan seperti pancreas dan hati juga berperan.
2. Pencernaan Mekanik dan Kimiawi:
 - a. Mekanik: Makanan dihancurkan melalui mengunyah dan gerakan peristaltik.
 - b. Kimiawi: Pencernaan dibantu enzim di mulut, lambung, dan usus kecil.
3. Enzim Pencernaan
 - a. Karbohidrat: *Salivary amylase* dan *pancreatic amylase* memecah pati menjadi monosakarida.
 - b. Protein: *Pepsin* (lambung) serta *trypsin* serta *chymotrypsin* (pancreas) memecah protein menjadi asam amino.
 - c. Lemak: *Gastric lipase* dan *pancreatic lipase*, Bersama empedu memecah lemak.
4. Hasil akhir pencernaan
 - a. Karbohidrat: Monosakarida (glukosa, fruktosa).
 - b. Protein: Asam amino.
 - c. Lemak: Asam lemak dan monogliserida

6. Latihan dan Jawaban

- 1) Sebutkan organ utama yang terlibat dalam sistem pencernaan manusia!

Jawaban: Organ utama dalam sistem pencernaan manusia meliputi mulut, kerongkongan, lambung, usus kecil, usus besar, hati, pankreas, dan empedu. Mulut untuk mengunyah dan enzim amilase, kerongkongan untuk mengantarkan makanan, lambung untuk pencernaan protein dengan enzim pepsin, usus kecil untuk pencernaan dan absorpsi, usus besar menyerap air, hati memproduksi empedu, dan pankreas menghasilkan enzim pencernaan.

- 2) Apa yang dimaksud dengan pencernaan mekanik? Berikan contohnya!

Jawaban: Pencernaan mekanik adalah pemecahan makanan menjadi bagian lebih kecil tanpa mengubah komposisi kimianya. Contohnya adalah mengunyah dengan gigi dan gerakan peristaltik di saluran pencernaan.

- 3) Jelaskan perbedaan antara pencernaan mekanik dan pencernaan kimiawi!

Jawaban: Pencernaan mekanik memecah makanan secara fisik tanpa mengubah struktur kimianya, seperti mengunyah dan peristaltik. Sementara itu, pencernaan kimiawi mengubah makanan menjadi molekul lebih sederhana dengan bantuan enzim, seperti amilase yang menguraikan karbohidrat menjadi glukosa.

- 4) Sebutkan enzim-enzim yang berperan dalam pencernaan karbohidrat, protein, dan lemak!

Jawaban: Enzim yang berperan antara lain:

- Karbohidrat: Amilase (mengurai karbohidrat menjadi glukosa).
- Protein: Pepsin (di lambung), tripsin, dan kimotripsin (di usus kecil).

- Lemak: Lipase (menguraikan lemak menjadi asam lemak dan gliserol).
- 5) Apa fungsi dari enzim *pepsin* dan di mana enzim ini bekerja?
Jawaban: Enzim pepsin berfungsi menguraikan protein menjadi polipeptida di lambung dalam lingkungan asam (pH 1,5 hingga 2).
- 6) Bagaimana proses pencernaan lemak terjadi di usus kecil? Jelaskan peran empedu!
Jawaban: Lemak dipecah oleh lipase menjadi asam lemak dan gliserol di usus kecil. Empedu berperan mengemulsikan lemak, memecahnya menjadi partikel kecil agar mudah dicerna lipase.
- 7) Apa hasil akhir dari pencernaan karbohidrat, protein, dan lemak?
Jawaban: Hasil akhirnya adalah:
 - Karbohidrat: Glukosa untuk sumber energi.
 - Protein: Asam amino untuk membangun dan memperbaiki jaringan.
 - Lemak: Asam lemak dan gliserol sebagai cadangan energi.
- 8) Di mana tempat utama absorpsi zat gizi setelah proses pencernaan selesai?
Jawaban: Absorpsi zat gizi utama terjadi di **usus halus**, yang memiliki permukaan luas berkat vili dan mikrovili untuk menyerap glukosa, asam amino, dan asam lemak ke dalam aliran darah.

7. Daftar Pustaka

- Gropper, S. S., Smith, J. L., & Carr, T. P. (2021). *Advanced Nutrition and Human Metabolism* (8th ed.). Cengage Learning.
- Kennelly, P. J., Botham, K. M., McGuinness, O. P., Rodwell, V. W., & Weil, P. A. (2022). *Harper's Illustrated Biochemistry* (32nd ed.). McGraw Hill.

BAB 3

KAITAN ANTARA MAKANAN

DAN ENERGI

Siska Ariftyana

Tujuan Instruksional Khusus

Setelah mengikuti bab ini diharapkan mahasiswa mampu:

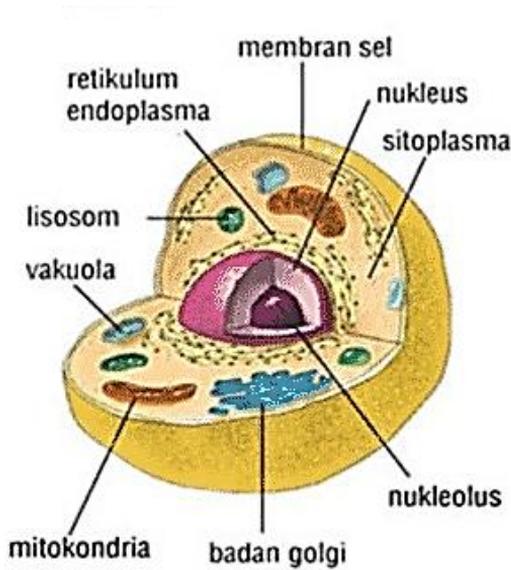
1. Mampu memahami dan menjelaskan rantai respirasi
2. Mampu Memahami dan menjelaskan siklus asam sitrat
3. Mampu memahami dan menjelaskan sumber-sumber energi untuk tubuh
4. Mampu memahami dan menjelaskan kaitan antara makanan dan energi
5. Mampu memahami dan menjelaskan definisi dan cara perhitungan Basal Energy Expenditure (BEE) dan Total Energy Expenditure (TEE)
6. Mampu memahami dan menjelaskan tahapan metabolisme energi

1. Definisi Metabolisme (Katabolisme & Anabolisme)

Metabolisme adalah serangkaian proses kimia dan fisik yang terjadi di dalam tubuh untuk mempertahankan kehidupan (1). Proses ini mencakup semua reaksi kimia yang melibatkan transformasi energi dan materi untuk mendukung fungsi biologis, seperti pertumbuhan, reproduksi, dan perbaikan sel. Proses metabolisme dapat menghasilkan energi untuk berbagai aktivitas seluler, menyediakan bahan baku untuk sintesis molekul biologis yang dibutuhkan tubuh dan membuang produk sampingan metabolisme yang tidak lagi dibutuhkan oleh tubuh.

Energi yang dihasilkan berfungsi untuk membantu proses untuk tetap hidup, tumbuh dan bereproduksi baik sel tumbuhan maupun sel hewan. Kebutuhan energi suatu organisme dapat dipenuhi melalui biomolekul (makanan) dan akan diproses secara kimiawi yang disebut respirasi sel. Pada respirasi sel tumbuhan melalui proses yang dinamakan fotosintesis yang menghasilkan O_2 (oksigen) yang digunakan untuk semua organisme di bumi, sedangkan pada sel hewan melalui pembentukan energi sel yang dinamakan metabolisme sel. Metabolisme berlangsung sebagai

proses pertumbuhan dan perkembangan serta bereproduksi terjadi pada sel (1).



Gambar 3.1. Struktur Organela Sel Hewan

Sel dapat menjalankan fungsi kehidupan berkaitan dengan adanya reaksi kimia. Organel sel mempunyai struktur fungsional dalam sel yang memiliki fungsi tertentu dan terdiri dari molekul-molekul kompleks yaitu membrane sel, ribosom, mitokondria, kloroplas dan inti sel. Membran sel mempunyai fungsi sebagai pelindung terhadap keluar masuknya zat pada sel dan memiliki reseptor untuk komunikasi dengan lingkungannya. Selain pelindung sel, di dalam sel terdapat sitoplasma berupa cairan sel sebagai tempat terjadinya seluruh reaksi kimia seluler melalui organel sel.

Nukleus (inti sel) merupakan struktur sel yang mengandung DNA dan berfungsi menyampaikan informasi genetic, mengatur seluruh aktivitas sel dan sintesa protein. Struktur kecil didalam sel

yang terdiri dari RNA dan prprotein adalah ribosom. Ribosom berperan dalam melakukan sintesa protein dengan menerjemahkan RNA ke rantai polipeptida. Metabolisme did alam tubuh terjadi pada sel yaitu sitosol dan mitokondria sel dengan menggunakan glukosa atau asam lemak (2). Metabolisme terdiri dari dua jalur utama yaitu:

a. Katabolisme

Katabolisme adalah proses pemecahan molekul kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana, biasanya disertai dengan pelepasan energi yang dapat digunakan oleh tubuh. Contoh: respirasi aerob (pemecahan glukosa menjadi ATP melalui glikolisis dan siklus asam sitrat) dan respirasi anaerob (fermentasi).

b. Anabolisme

Anabolisme adalah proses biosintesis yang membangun molekul kompleks dari molekul sederhana, seringkali memerlukan input energi. Contoh: proses sintesis protein dari asam amino dan pembentukan lipid (1,3).

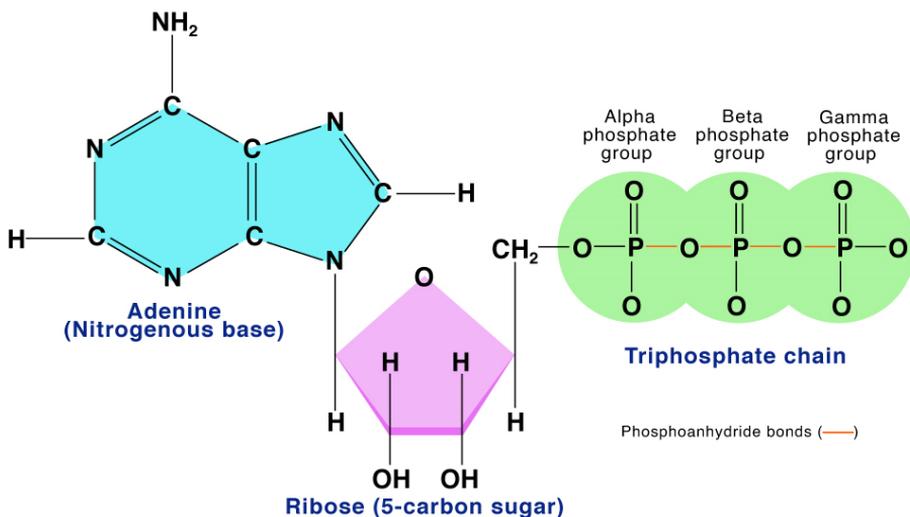
Komponen Utama Metabolisme

a. Energi: Energi kimia dalam tubuh disimpan dan digunakan dalam bentuk ATP (Adenosine Triphosphate), yang dihasilkan melalui proses metabolisme katabolik. Adenosin Triphosphate (ATP) adalah molekul penyimpan dan penyedia energi utama dalam sel. ATP berperan sebagai mata uang energi yang digunakan untuk menjalankan berbagai proses

biokimia dalam tubuh, seperti kontraksi otot, transpor aktif, dan reaksi anabolisme.

Gambar 3.2. Struktur Adenosine Triphosphate (ATP)

b. Enzim: Protein khusus yang mempercepat reaksi kimia



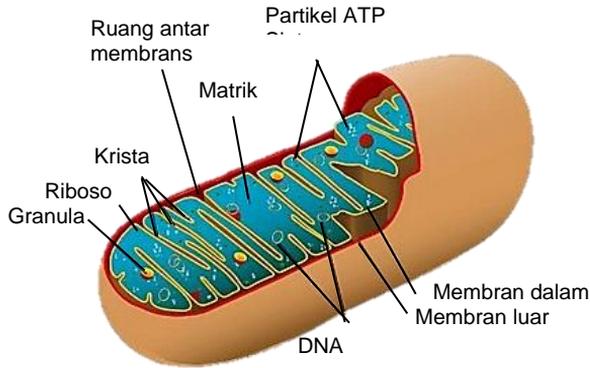
dengan menurunkan energi aktivasi tanpa dikonsumsi dalam reaksi tersebut.

c. Koenzim dan kofaktor: Molekul tambahan, seperti NAD^+ (Nikotinamida adenin dinukleotida) dan FAD (flavin adenin dinukleotida), yang membantu enzim dalam melaksanakan fungsinya (4) .

2. Rantai Respirasi

Rantai respirasi seluler merupakan proses biokimia esensial yang terjadi di dalam mitokondria, di mana energi dari molekul organik, seperti glukosa, diubah menjadi Adenosine Triphosphate (ATP), sumber energi utama sel. Mitokondria adalah organel intraseluler yang berfungsi sebagai pusat utama respirasi seluler (5). Rantai respirasi seluler adalah pusat metabolisme energi, yang menjadi dasar untuk

memahami berbagai aspek gizi dan kesehatan manusia.

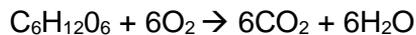


Gambar 3.3. Struktur Mitokondria

Respirasi ini dibedakan menjadi 2 yaitu respirasi aerob dan respirasi anaerob yang keduanya digunakan untuk menghasilkan energi.

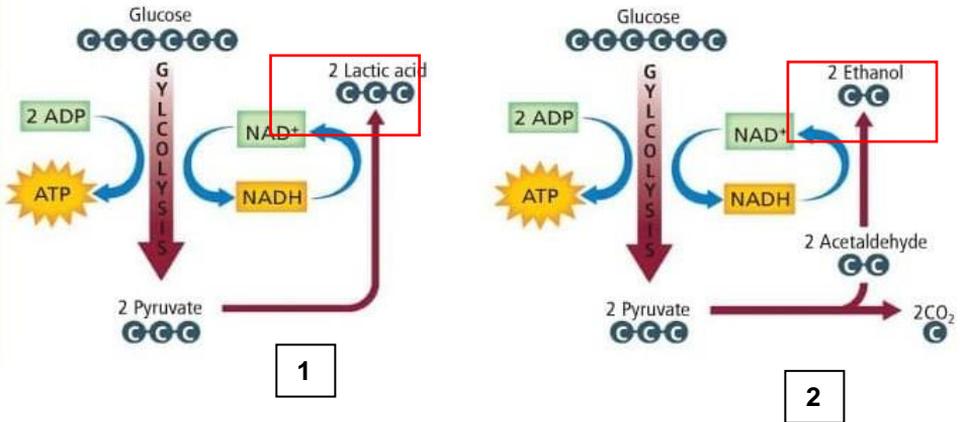
a. Respirasi Aerob

Respirasi aerob memerlukan oksigen (O_2) untuk menjalankan prosesnya. Katabolisme karbohidrat, protein dan lemak merupakan proses metabolisme yang termasuk ke dalam respirasi aerob. Adapun reaksi kimia respirasi aerob:



b. Respirasi Anaerob

Respirasi anaerob merupakan respirasi yang tidak menggunakan O_2 . Contoh dari respirasi anaerob yaitu fermentasi alkohol dan fermentasi asam laktat. Pada proses fermentasi alkohol, hasil akhir dari proses glikolisis, piruvat akan diubah menjadi etil alkohol (etanol), sedangkan pada proses fermentasi asam laktat, piruvat akan diubah menjadi asam laktat.



Gambar 3.4. Proses Fermentasi Asam Laktat [1], dan Fermentasi Alkohol [2]

Proses Rantai Respirasi

Jalur utama orosis katabolisme adalah respirasi sel. Respirasi sel melibatkan serangkaian transfer elektron (elektron dari NADH dan FADH₂ ditransfer melalui kompleks protein yang berurutan. dari keadaan energi tinggi dalam glukosa ke keadaan energi rendah, sebagai bagian dari air. Energi yang dilepaskan dalam proses ini digunakan untuk membuat ATP, baik melalui fosforilasi tingkat substrat maupun fosforilasi oksidatif. Ketika elektron secara bertahap dikeluarkan dari karbon glukosa, kemudian glukosa dipecah menjadi 6 molekul CO₂. Respirasi seluler terjadi dalam empat fase, yaitu:

Fase 1: Glikolisis

Fase 2: Oksidasi piruvat

Fase 3: Siklus asam sitrat/Siklus krebs

Fase 4: Fosforilasi oksidatif

3. Siklus Asam Sitrat

Siklus asam sitrat, yang juga dikenal sebagai siklus Krebs atau siklus asam trikarboksilat (TCA) adalah jalur metabolisme sentral yang terjadi di dalam mitokondria. Siklus ini memainkan peran kunci dalam oksidasi molekul bahan bakar seperti glukosa, asam lemak, dan asam amino, serta menghasilkan energi dalam bentuk NADH, FADH₂, dan GTP. Produk ini kemudian digunakan dalam rantai transport elektron untuk sintesis ATP.

Fungsi Utama Siklus Asam Sitrat

- 1) Produksi energi, menghasilkan NADH dan FADH₂ yang diperlukan untuk produksi ATP dalam rantai transport elektron.
- 2) Sumber prekursor biosintetik, siklus asam sitrat menyediakan molekul antara (intermediat) seperti oksaloasetat yang dapat digunakan kembali untuk memulai siklus berikutnya dan alfa-ketoglutarat untuk biosintesis asam amino, glukosa, dan lipid.
- 3) Pengelolaan produk metabolisme menghasilkan oksidasi asetil-KoA menjadi karbon dioksida (CO₂) (6).

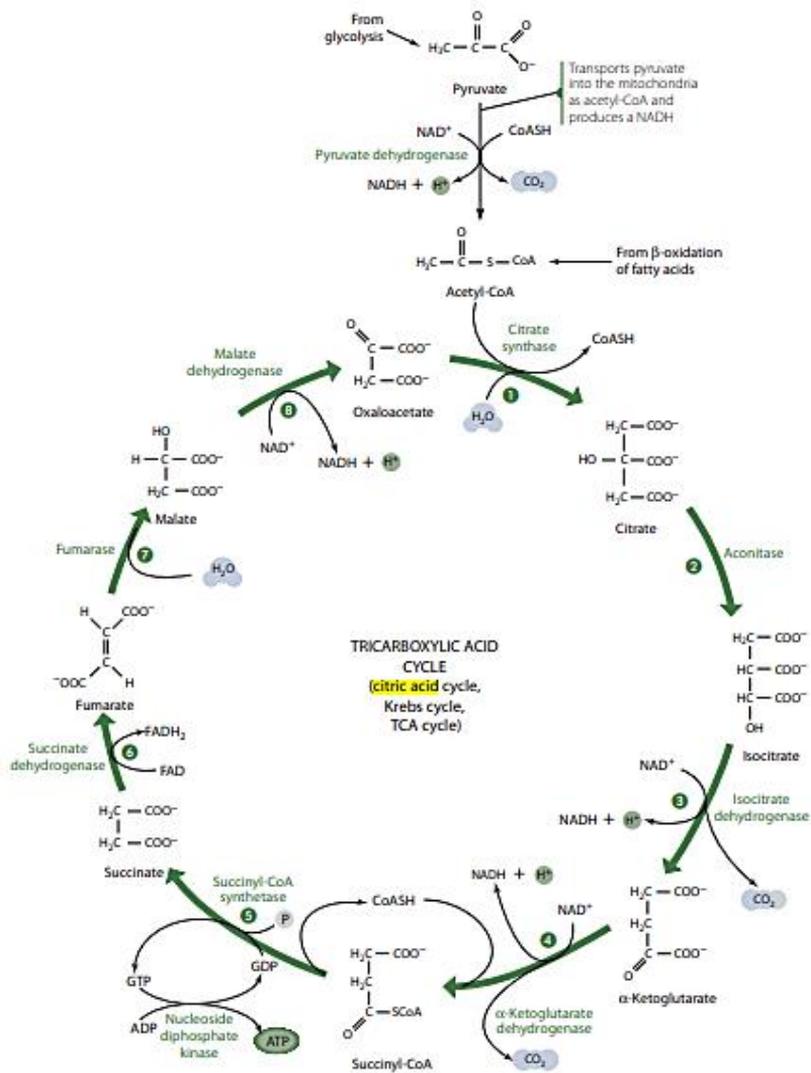
4. Tahapan Siklus Asam Sitrat

Siklus ini terdiri dari delapan reaksi enzimatik. Enzim yang terlibat dalam siklus asam sitrat ini antara lain Asetil-KoA (Koenzim A), sitrat sintase, isositrat dehidrogenase, ketoglutarate dehidrogenase, fumarase dan malat dehidrogenase.

- a. Kondensasi: Asetil-KoA (2 karbon) bergabung dengan oksaloasetat (4 karbon) untuk membentuk sitrat (6 karbon), dikatalisis oleh enzim sitrat sintase.
- b. Isomerisasi: Sitrat diubah menjadi isositrat melalui molekul antara, cis-akonitat, oleh enzim akonitase.
- c. Dekarboksilasi Oksidatif I: Isositrat dioksidasi menjadi alfa-ketoglutarat (5 karbon) oleh enzim isositrat dehidrogenase, menghasilkan NADH dan CO₂.

- d. Dekarboksilasi Oksidatif II: Alfa-ketoglutarat diubah menjadi suksinil-KoA (4 karbon) oleh alfa-ketoglutarat dehidrogenase, menghasilkan NADH dan CO₂.
- e. Fosforilasi Substrat: Suksinil-KoA dikonversi menjadi suksinat oleh suksinil-KoA sintetase, menghasilkan GTP (yang dapat dikonversi menjadi ATP).
- f. Oksidasi I: Suksinat dioksidasi menjadi fumarat oleh enzim suksinat dehidrogenase, menghasilkan FADH₂.
- g. Hidrasi: Fumarat diubah menjadi malat melalui penambahan molekul air oleh fumarase.
- h. Oksidasi II: Malat dioksidasi kembali menjadi oksaloasetat oleh malat dehidrogenase, menghasilkan NADH.

Setiap putaran siklus menghasilkan 3 molekul NADH, 1 molekul FADH₂, 1 molekul GTP (atau ATP), 2 molekul CO₂. Produk energi ini kemudian digunakan dalam rantai respirasi untuk menghasilkan ATP.



Gambar 3.5. Siklus Asam Sitrat (1)

1) Peran Siklus Asam Sitrat dalam Metabolisme Lain

- a. Gluconeogenesis: Oksaloasetat dapat digunakan untuk sintesis glukosa.
- b. Sintesis Asam Amino: Alfa-ketoglutarat dan oksaloasetat adalah prekursor asam amino.
- c. Lipogenesis: Sitrat dapat diekspor dari mitokondria untuk digunakan dalam sintesis asam lemak.

2) Gangguan pada Siklus Asam Sitrat

Kelainan dalam siklus ini dapat menyebabkan akumulasi produk antara yang beracun dan gangguan produksi energi. Contohnya adalah defisiensi enzim isositrat dehidrogenase yang berhubungan dengan beberapa jenis kanker.

5. Tahapan Metabolisme Energi

Proses metabolisme ini saling bersinergi karena energi dalam bentuk Adenosine Triphosphate (ATP) dari hasil katabolisme akan digunakan kembali untuk proses anabolisme dan aktivitas lain seperti kontraksi otot (1,7).

1) Katabolisme

Molekul kompleks seperti karbohidrat, lemak, dan protein dipecah menjadi molekul sederhana seperti glukosa, asam lemak, dan asam amino. Proses ini menghasilkan energi dalam bentuk ATP yang dapat digunakan untuk aktivitas seluler. Jalur katabolisme di dalam tubuh dapat disebut pula proses respirasi yang terdiri dari proses:

- a. Katabolisme Karbohidrat, terdiri dari reaksi glikolisis, siklus asam sitrat, fosforilasi oksidatif
- b. Katabolisme Lipid, terdiri dari reaksi beta-oksidasi dan ketogenesis
- c. Katabolisme Protein, terdiri dari reaksi deaminasi dan transaminase, siklus urea serta penggunaan karbon rangka.

2) Anabolisme

Molekul sederhana yang dihasilkan dari katabolisme digunakan untuk membangun molekul kompleks yang diperlukan oleh tubuh, seperti protein, DNA, dan glikogen. Anabolisme mencakup sintesis biomolekul yang penting untuk pertumbuhan, pemeliharaan, dan perbaikan tubuh.

- a. Anabolisme Karbohidrat, terdiri dari proses gluconeogenesis dan glikogenesis
- b. Anabolisme Lipid, terdiri dari sintesis asam lemak, sintesis trigliserida
- c. Anabolisme Protein, terdiri dari proses sintesis protein dan sintesis molekul nitrogen lainnya (1).

3) Regulasi Metabolisme

Metabolisme diatur oleh beberapa mekanisme untuk memastikan keseimbangan antara kebutuhan energi dan bahan baku. Regulasi ini melibatkan:

1. Hormon, yaitu Insulin, glukagon, dan hormon tiroid memainkan peran penting dalam mengatur jalur metabolisme.
2. Keadaan energi sel, yaitu Rasio ATP/ADP dan NADH/NAD⁺ memengaruhi aktivitas enzim yang terlibat dalam metabolisme.
3. Kontrol Alosterik, yaitu enzim-enzim tertentu diatur oleh efektor alosterik yang dapat meningkatkan atau menghambat aktivitasnya (1,3,7,8).

6. Sumber-Sumber Energi untuk Tubuh

Energi sangat penting untuk mendukung fungsi tubuh, termasuk kontraksi otot, sintesis molekul, transportasi zat, dan pengaturan suhu tubuh. Sumber energi utama tubuh berasal dari makanan golongan makronutrien, yang terdiri dari karbohidrat, lemak, dan

protein. Selain itu, energi juga dapat diperoleh dari cadangan tubuh seperti glikogen dan lemak (1,9).

Makronutrient terdiri dari karbohidrat, lemak dan protein yang masing-masing zat gizi mempunyai peran penting tersendiri di dalam tubuh. Alkohol juga mengandung kalori pada setiap 1 gram alkohol terkandung 7 kalori, namun alkohol tidak diklasifikasikan menjadi makronutrient karena alkohol tidak dibutuhkan oleh tubuh dan tidak mempunyai fungsi di dalam tubuh.

1) Karbohidrat

- a. Sumber Utama: Karbohidrat ditemukan dalam makanan seperti biji-bijian, buah-buahan, sayuran, dan produk susu.
- b. Metabolisme: Karbohidrat dipecah menjadi glukosa selama pencernaan. Glukosa diserap ke dalam darah dan digunakan sebagai sumber energi melalui glikolisis, siklus asam sitrat, dan rantai respirasi.
- c. Cadangan Energi: Kelebihan glukosa disimpan dalam bentuk glikogen di hati dan otot.
- d. Energi yang dihasilkan: 1 gram karbohidrat menghasilkan 4 kkal energi.

2) Lemak

- a. Sumber Utama: Lemak ditemukan dalam minyak, kacang-kacangan, biji-bijian, dan produk hewani seperti daging dan produk susu tinggi lemak.
- b. Metabolisme: Lemak dipecah menjadi asam lemak dan gliserol. Asam lemak dioksidasi melalui beta-oksidasi menjadi asetil-KoA, yang kemudian masuk ke siklus asam sitrat untuk menghasilkan ATP.
- c. Cadangan Energi: Lemak disimpan dalam jaringan adiposa sebagai trigliserida, yang merupakan cadangan energi terbesar tubuh.
- d. Energi yang dihasilkan: 1 gram lemak menghasilkan 9 kkal energi.

3) Protein

- a. Sumber Utama: Protein ditemukan dalam daging, ikan, telur, susu, kacang-kacangan, dan produk nabati seperti kedelai.
- b. Metabolisme: Protein dipecah menjadi asam amino selama pencernaan. Asam amino dapat digunakan untuk sintesis protein tubuh atau diubah menjadi energi melalui deaminasi dan masuk ke jalur metabolisme sebagai piruvat, asetil-KoA, atau intermediat siklus asam sitrat.
- c. Cadangan Energi: Protein tidak disimpan secara khusus sebagai sumber energi. Penggunaan protein untuk energi terjadi terutama dalam kondisi kelaparan.
- d. Energi yang Dihasilkan: 1 gram protein menghasilkan 4 kkal energi.

Pengeluaran energi diukur dengan keluaran panas dari tubuh. Satuan panas yang digunakan dalam penelitian awal adalah kalori—jumlah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu 1 g air sebesar 1°C. Berikut adalah konversi antara kalori dan joule:

$$1 \text{ kkal} = 4,186 \text{ kJ (dibulatkan menjadi 4,2 kJ)}$$
$$1 \text{ kJ} = 0,239 \text{ (dibulatkan menjadi 0,24 kkal)}$$

7. Sumber Energi Cadangan

- 1) Glikogen, disimpan di hati dan otot dan digunakan untuk mempertahankan kadar glukosa darah (hati) dan mendukung aktivitas otot (otot).
- 2) Lemak Cadangan, Trigliserida dalam jaringan adiposa adalah sumber energi utama selama periode puasa atau aktivitas fisik yang berkepanjangan.

- 3) Protein Otot, dalam kondisi kelaparan ekstrem, protein otot dapat dipecah menjadi asam amino untuk energi.

8. Kebutuhan Energi Tubuh

Kebutuhan energi tubuh bergantung pada:

- 1) *Basal Metabolic Rate* (BMR): Energi yang dibutuhkan untuk fungsi dasar tubuh seperti bernapas dan menjaga suhu tubuh.
- 2) Aktivitas Fisik: Energi tambahan yang dibutuhkan untuk aktivitas sehari-hari.
- 3) Thermic Effect of Food (TEF): Energi yang digunakan untuk mencerna, menyerap, dan memproses makanan.

9. Kaitan Antara Makanan dan Energi Metabolisme Energi dari Makanan

Energi dari makanan diperoleh melalui proses metabolisme:

- 1) Pencernaan: Nutrien dari makanan dipecah menjadi molekul yang lebih kecil (glukosa, asam lemak, dan asam amino).
- 2) Absorpsi: Molekul kecil diserap ke dalam aliran darah dan diangkut ke sel-sel tubuh.
- 3) Produksi Energi: Molekul ini diubah menjadi ATP melalui jalur metabolisme seperti glikolisis, siklus asam sitrat, dan rantai transport elektron.

10. Faktor yang Mempengaruhi Kebutuhan Energi

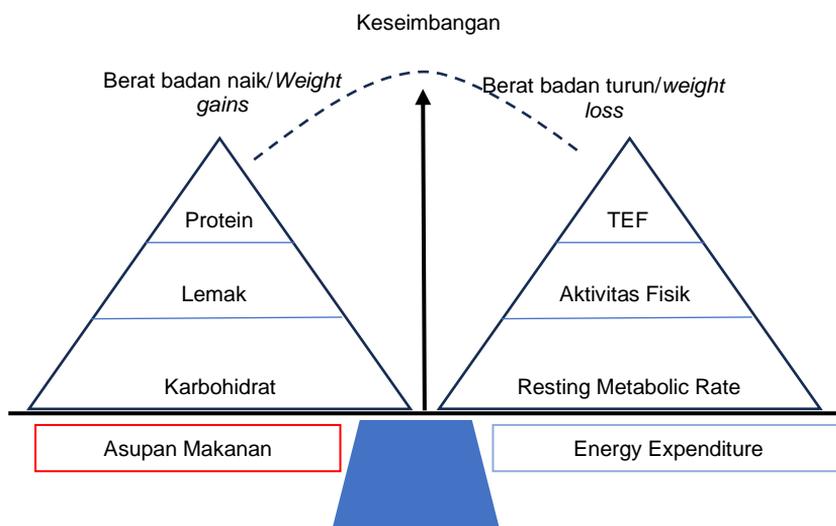
Beberapa factor tersebut antara lain:

- 1) Usia dan Jenis Kelamin, kebutuhan energi menurun seiring bertambahnya usia dan bervariasi antara pria dan wanita.
- 2) Aktivitas Fisik, aktivitas fisik meningkatkan kebutuhan energi.
- 3) Kondisi Fisiologis, seperti kehamilan, laktasi, dan pertumbuhan memerlukan tambahan energi.
- 4) Komposisi Tubuh, orang dengan massa otot lebih besar membutuhkan lebih banyak energi.

11. Keseimbangan Energi

Keseimbangan energi terjadi ketika energi yang diperoleh dari makanan sama dengan energi yang digunakan oleh tubuh. Pola makan dan aktivitas fisik sangat erat kaitannya dengan komposisi tubuh, di mana apabila terjadi ketidakseimbangan energi dapat menyebabkan:

- 1) Energi Positif: Jika asupan energi lebih besar daripada kebutuhan, kelebihan energi disimpan sebagai lemak tubuh, yang dapat menyebabkan obesitas.
- 2) Energi Negatif: Jika asupan energi lebih kecil daripada kebutuhan, tubuh akan memecah cadangan energi, yang dapat menyebabkan penurunan berat badan.



Gambar 3.6. Keseimbangan Energi

12. Makanan dan Energi dalam Aktivitas Fisik

Sumber energi cepat, karena karbohidrat adalah sumber utama energi selama aktivitas intensitas tinggi. Sumber energi berkelanjutan, lemak digunakan selama aktivitas fisik intensitas rendah hingga sedang yang berlangsung lama dan Protein

sebagai Sumber Energi Cadangan: Protein hanya digunakan dalam jumlah kecil, terutama saat cadangan karbohidrat dan lemak habis.

Peran mikronutrien dalam energi:

- Vitamin B Kompleks: Membantu dalam reaksi metabolisme energi.
- Mineral: Magnesium dan fosfor penting untuk reaksi enzimatik yang menghasilkan energi.

Aplikasi dalam pola makan sehari-hari:

- Pola Makan Seimbang: Mengonsumsi proporsi karbohidrat, lemak, dan protein yang sesuai untuk memenuhi kebutuhan energi harian.
- Asupan Energi Disesuaikan: Menyesuaikan asupan makanan berdasarkan tingkat aktivitas fisik dan kondisi kesehatan.
- Kualitas Makanan: Memilih sumber makanan yang bergizi, seperti karbohidrat kompleks, lemak sehat, dan protein berkualitas tinggi.

13. Definisi dan Cara Perhitungan Basal Energy Expenditure (BEE) dan Total Energy Expenditure (TEE)

1) Definisi

Basal Energy Expenditure (BEE) atau *Basal Metabolic Rate* (BMR) adalah jumlah energi yang dibutuhkan tubuh untuk menjalankan fungsi dasar seperti bernapas, sirkulasi darah, dan pemeliharaan suhu tubuh dalam kondisi istirahat total. Total Energy Expenditure (TEE) adalah total kebutuhan energi harian, termasuk energi untuk aktivitas fisik dan thermogenesis. Memahami cara perhitungan BEE dan TEE penting untuk menentukan kebutuhan energi individu, terutama dalam konteks perencanaan diet dan pengelolaan berat badan.

2) Perhitungan Basal Energy Expenditure (BEE)

BEE dapat dihitung menggunakan persamaan prediksi seperti Harris-Benedict Equation atau Mifflin-St Jeor Equation, dimana *persamaan* yang digunakan untuk laki-laki dan perempuan berdasarkan berat badan (kg), tinggi badan (cm) dan usia (tahun).

Harris-Benedict Equation

Laki-laki:

$$\text{BMR (kkal/hari)} = 66.5 + (13,7 \times \text{Berat Badan}) + (5,0 \times \text{Tinggi Badan}) - (6,8 \times \text{Usia})$$

Perempuan

$$\text{BMR (kkal/hari)} = 665 + (9,56 \times \text{Berat Badan}) + (1,85 \times \text{Tinggi Badan}) - (4,7 \times \text{Usia})$$

Mifflin-St Jeor Equation

Laki-laki:

$$\text{BMR (kkal/hari)} = (9,99 \times \text{Berat Badan}) + (6,25 \times \text{Tinggi Badan}) - (4,92 \times \text{Usia}) + 5$$

Perempuan

$$\text{BMR (kkal/hari)} = (9,99 \times \text{Berat Badan}) + (6,25 \times \text{Tinggi Badan}) - (4,92 \times \text{Usia}) - 161$$

14. Perhitungan Total Energy Expenditure (TEE)

TEE mencakup komponen-komponen berikut:

- a. *Basal Energy Expenditure* (BEE): Energi untuk fungsi dasar tubuh.
- b. *Activity Energy Expenditure* (AEE): Energi untuk aktivitas fisik.
- c. *Thermic Effect of Food* (TEF): Energi untuk mencerna, menyerap, dan memproses makanan (sekitar 10% dari total asupan kalori).

TEE dihitung dengan mengalikan BEE dengan faktor aktivitas:

$$\text{TEE} = \text{BMR} \times \text{Faktor Aktivitas Fisik/PAL}$$

Faktor Aktivitas:

Level Aktivitas Fisik	Faktor Aktivitas
Sedentary/Istirahat	1,2
Cukup aktif/Ringan/pekerjaan kantor	1,375
Aktivitas Sedang	1,55
Aktivitas Berat	1,725
Aktivitas Sangat Berat	1,9

TEE digunakan sebagai dasar untuk menghitung kebutuhan kalori harian seseorang. Penyesuaian dilakukan berdasarkan tujuan (misalnya, penurunan berat badan, peningkatan massa otot, atau pemeliharaan berat badan). Dalam pengelolaan berat badan juga dapat memperhatikan dengan pengeluaran masuk dan kalori yang dikeluarkan. Untuk menurunkan berat badan, asupan kalori harus lebih rendah dari TEE Defisit kalori dan untuk meningkatkan berat badan, asupan kalori harus lebih tinggi dari TEE Surplus kalori.

15. Rangkuman

Metabolisme adalah proses fundamental yang memungkinkan tubuh untuk mendapatkan energi, membangun struktur yang diperlukan, dan menjaga keseimbangan internal. Dengan memahami metabolisme, kita dapat lebih menghargai kompleksitas dan keajaiban tubuh manusia serta cara-cara di mana nutrisi mendukung kehidupan. Rantai respirasi merupakan komponen kritis dari metabolisme energi, yang memastikan suplai ATP untuk fungsi seluler. Memahami mekanisme ini penting untuk

mengapresiasi bagaimana tubuh mengelola energi dan bagaimana disfungsi dapat memengaruhi kesehatan.

Siklus asam sitrat adalah inti dari metabolisme energi yang menyediakan sumber energi dan prekursor biosintetik bagi tubuh. Pemahaman tentang siklus ini penting dalam memahami bagaimana tubuh mengatur energi dan nutrisi untuk mendukung fungsi biologis. Tubuh menggunakan berbagai sumber energi untuk mendukung fungsi vitalnya. Karbohidrat adalah sumber energi utama yang cepat digunakan, sementara lemak menyediakan cadangan energi yang besar. Protein, meskipun bukan sumber energi utama, dapat digunakan dalam kondisi tertentu. Pemahaman tentang sumber energi dan metabolisme sangat penting dalam menjaga kesehatan dan memenuhi kebutuhan energi tubuh.

Makanan adalah sumber utama energi yang mendukung fungsi tubuh. Dengan memahami hubungan antara makanan dan energi, kita dapat mengatur pola makan yang sehat untuk memenuhi kebutuhan tubuh sekaligus mencegah gangguan metabolisme seperti obesitas atau kekurangan gizi. Sumber energi didapatkan dari makronutrient yaitu karbohidrat (1 gram karbohidrat mengandung 4 kalori), lemak (1 gram lemak mengandung 9 kalori), dan protein (1 gram protein mengandung 4 kalori). Perhitungan energi dapat dihitung menggunakan rumus BEE dan TEE yang merupakan komponen penting dalam pengelolaan energi tubuh. Menggunakan metode perhitungan yang tepat membantu dalam merancang intervensi nutrisi yang efektif untuk mendukung kesehatan individu. Perhitungan energi digunakan rumus Harris-Benedict maupun Mifflin St. Joer berdasarkan jenis kelamin, usia, berat badan dan tinggi badan.

16. Latihan dan Jawaban

Soal Pilihan Ganda: Metabolisme Energi

- 1) Apa tujuan utama dari metabolisme energi di dalam tubuh?

- A. Membuang limbah metabolic
 - B. Menghasilkan energi dalam bentuk ATP
 - C. Menyimpan molekul glukosa dalam tubuh
 - D. Membentuk struktur DNA
- 2) Di mana lokasi utama terjadinya siklus asam sitrat?
- A. Sitoplasma
 - B. Retikulum endoplasma
 - C. Membran plasma
 - D. Matriks mitokondria
- 3) Apa hasil akhir dari rantai transport elektron dalam metabolisme aerobik?
- A. Asam laktat
 - B. Karbon dioksida dan air
 - C. NADH dan FADH₂
 - D. Etanol
- 4) Berapa jumlah ATP yang dihasilkan dari satu molekul glukosa melalui metabolisme aerobik secara keseluruhan?
- A. 12 ATP
 - B. 24 ATP
 - C. 32 ATP
 - D. 40 ATP
- 5) Apa fungsi utama NADH dan FADH₂ dalam metabolisme energi?
- A. Mengangkut elektron ke rantai transport electron
 - B. Menyimpan energi sebagai glikogen
 - C. Mengoksidasi glukosa menjadi karbon dioksida
 - D. Menghasilkan laktat dalam kondisi anaerob
- 6) Pada kondisi anaerob, glikolisis menghasilkan energi dalam bentuk:
- A. 2 ATP dan asam laktat
 - B. 32 ATP dan karbon dioksida
 - C. 2 ATP dan glukosa

- D. 4 ATP dan NADH
- 7) Apa yang terjadi jika tubuh kekurangan oksigen selama metabolisme energi?
- A. Pembentukan ATP berhenti total
 - B. Glikolisis dihentikan
 - C. Produksi asam laktat meningkat
 - D. Siklus asam sitrat menjadi lebih aktif
- 8) Makronutrien mana yang memberikan energi paling tinggi per gram?
- A. Karbohidrat
 - B. Protein
 - C. Lemak
 - D. Vitamin
- 9) Apa yang terjadi jika tubuh kekurangan karbohidrat untuk energi?
- A. Tubuh menggunakan vitamin sebagai energi utama
 - B. Tubuh menggunakan lemak dan protein sebagai sumber energi
 - C. Metabolisme energi berhenti total
8. Semua energi berasal dari glikogen otot
- 10) Nutrien mana yang menjadi sumber energi terakhir yang digunakan tubuh dalam kondisi kelaparan?
- A. Lemak
 - B. Karbohidrat
 - C. Protein
 - D. Vitamin
- 11) Apa yang dimaksud dengan Basal Energy Expenditure (BEE)?
- A. Energi yang digunakan untuk aktivitas fisik intens
 - B. Energi yang diperlukan tubuh saat istirahat total
 - C. Energi untuk mencerna dan menyerap makanan
 - D. Energi yang diperoleh dari makanan harian

- 12) Faktor yang memengaruhi Basal Energy Expenditure (BEE) meliputi:
- A. Usia, jenis kelamin, dan komposisi tubuh
 - B. Jenis aktivitas fisik
 - C. Jumlah makanan yang dikonsumsi
 - D. Lama waktu tidur
- 13) Apa yang terjadi pada Total Energy Expenditure (TEE) jika seseorang meningkatkan aktivitas fisiknya?
- A. TEE menurun
 - B. TEE tetap sama
 - C. TEE meningkat
 - D. TEE hanya dipengaruhi oleh BEE
- 14) Jika seorang laki-laki memiliki Basal Energy Expenditure (BEE) sebesar 1600 kkal dan faktor aktivitas fisik adalah 1.55, berapa Total Energy Expenditure (TEE)-nya?
- A. 1800 Kkal
 - B. 2000 Kkal
 - C. 2480 Kkal
 - D. 2600 Kkal

Kunci Jawaban:

1 B, 2 D, 3 B, 4 C, 5 A, 6 A, 7 C, 8 C, 9 B, 10 C, 11 B, 12 A, 13 C, 14 C

Soal Essay

- 1) Apa peran utama siklus asam sitrat dalam metabolisme energi, dan bagaimana proses ini berhubungan dengan rantai transport elektron?

Jawaban: Siklus asam sitrat adalah jalur metabolisme di mitokondria yang mengoksidasi asetil-KoA menjadi karbon dioksida. Peran utamanya adalah menghasilkan molekul

pembawa elektron seperti NADH dan FADH yang digunakan dalam rantai transport elektron untuk menghasilkan ATP.

- a. Setiap putaran siklus menghasilkan 3 NADH, 1 FADH, dan 1 GTP.
 - b. NADH dan FADH mentransfer elektron ke rantai transport elektron, menciptakan gradien proton yang mendorong sintesis ATP melalui fosforilasi oksidatif.
- 2) Bandingkan **Jawaban:**metabolisme energi aerobik dan anaerobik, termasuk efisiensi energi dan produk akhir yang dihasilkan!

Jawaban:

- a. Metabolisme Aerobik:
 - 1) Terjadi di mitokondria dengan keberadaan oksigen.
 - 2) Melibatkan glikolisis, siklus asam sitrat, dan rantai transport elektron.
 - 3) Efisiensi tinggi: 1 molekul glukosa menghasilkan sekitar 32 ATP.
 - 4) Produk akhir: Karbon dioksida dan air.
 - b. Metabolisme Anaerobik:
 - 1) Terjadi di sitoplasma tanpa oksigen.
 - 2) Hanya melibatkan glikolisis.
 - 3) Efisiensi rendah: 1 molekul glukosa menghasilkan 2 ATP.
 - 4) Produk akhir: Asam laktat (pada manusia) atau etanol (pada mikroorganisme).
- 3) Jelaskan peran ATP dalam metabolisme energi dan bagaimana molekul ini didaur ulang di dalam tubuh!

Jawaban: ATP (adenosin trifosfat) adalah molekul penyimpan energi yang digunakan untuk berbagai aktivitas seluler seperti kontraksi otot, transportasi aktif, dan sintesis biomolekul. Energi diperoleh dari hidrolisis ATP menjadi

ADP dan fosfat anorganik (Pi). ATP didaur ulang melalui fosforilasi oksidatif di mitokondria selama rantai transport electron dan dalam glikolisis serta siklus asam sitrat.

- 4) Jelaskan bagaimana karbohidrat, lemak, dan protein digunakan sebagai sumber energi dalam tubuh!

Jawaban:

- a. Karbohidrat:

Karbohidrat dipecah menjadi glukosa melalui proses pencernaan. Glukosa digunakan dalam glikolisis untuk menghasilkan ATP, NADH, dan piruvat. Dalam kondisi aerobik, piruvat diubah menjadi asetil-KoA dan masuk ke siklus asam sitrat. Dalam kondisi anaerobik, piruvat diubah menjadi asam laktat.

- b. Lemak:

Lemak dipecah menjadi asam lemak dan gliserol. Asam lemak dioksidasi melalui beta-oksidasi di mitokondria, menghasilkan asetil-KoA, NADH, dan FADH₂. Asetil-KoA masuk ke siklus asam sitrat, sedangkan NADH dan FADH₂ digunakan dalam rantai transport elektron.

- c. Protein:

Protein dipecah menjadi asam amino. Asam amino dapat digunakan dalam glukoneogenesis untuk menghasilkan glukosa atau diubah menjadi intermediat siklus asam sitrat untuk menghasilkan energi.

- 5) Bagaimana keseimbangan energi (energy balance) dipengaruhi oleh asupan makanan, dan apa dampaknya pada metabolisme tubuh?

Jawaban: Keseimbangan energi terjadi ketika asupan kalori sama dengan pengeluaran energi.

- a. Energi positif:

Jika asupan makanan lebih besar dari pengeluaran, tubuh menyimpan kelebihan energi sebagai lemak, yang dapat menyebabkan obesitas.

b. Energi negative

Jika asupan makanan lebih kecil dari pengeluaran, tubuh memecah cadangan energi (glikogen, lemak, dan protein)

1. Daftar Pustaka

1. Gropper SS, Smith JL, Carr TP. *Advanced Nutrition and Human Metabolism*. Eighth Edition. Cengage; 2022.
2. Judge A, Dodd MS. *Metabolism*. Vol. 64, *Essays in Biochemistry*. Portland Press Ltd; 2020. p. 607–47.
3. Bender DA. *Introduction to Nutrition and Metabolism* Fifth Edition [Internet]. Fifth Edition. CRC Press; 2014. Available from: www.ebook3000.com
4. Song J. Adenosine Triphosphate: The Primordial Molecule That Controls Protein Homeostasis and Shapes the Genome–Proteome Interface. Vol. 14, *Biomolecules*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2024.
5. Protasoni M, Zeviani M. *Molecular Sciences Mitochondrial Structure and Bioenergetics in Normal and Disease Conditions*. 2021; Available from: <https://doi.org/10.3390/ijms>
6. Choi I, Son H, Baek JH. Tricarboxylic acid (Tca) cycle intermediates: Regulators of immune responses. Vol. 11, *Life*. MDPI AG; 2021. p. 1–19.
7. Kennelly PJ., Botham KM., McGuinness OP., Rodwell VW., Weil PAnthony. *Harper's illustrated biochemistry*. McGraw Hill; 2023. 802 p.
8. Hall JE. *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology* [Internet]. 11th Edition. Elsevier; 2006. Available from: <http://avaxho.me/blogs/ChrisRedfield>
9. Berdanier CD, Berdanier LA. *Advanced Nutrition Macronutrients, Micronutrients, and Metabolism*. Third Edition. London New York: CRC Press; 2021.

BAB 4

KARBOHIDRAT

Herni Dwi Herawati

Tujuan Instruksional Khusus

Setelah mengikuti bab ini diharapkan mahasiswa mampu:

1. Mampu memahami dan menjelaskan struktur, jenis dan fungsi karbohidrat
2. Mampu memahami dan menjelaskan metabolisme karbohidrat
3. Mampu memahami dan menjelaskan akibat kekurangan dan kelebihan karbohidrat

1. Struktur dan Jenis Karbohidrat

Karbohidrat dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori berdasarkan jumlah unit gula yang dimiliki. Jenis karbohidrat terdiri dari:

1) Karbohidrat Sederhana

Karbohidrat sederhana terdiri dari monosakarida dan disakarida.

a. Monosakarida ($C_6H_{12}O_6$)

Monosakarida adalah bentuk karbohidrat paling sederhana terdiri dari satu unit gula dan tidak dapat dihidrolisis menjadi gula yang lebih kecil. Monosakarida memiliki rumus umum $C_n(H_2O)_n$, dengan tiga elemen utama yaitu karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O). Contoh monosakarida meliputi glukosa, fruktosa dan galaktosa (1–3).

a) Glukosa

Glukosa adalah monosakarida heksosa (mengandung enam atom karbon) yang sangat penting dalam metabolisme tubuh. Dengan rumus kimia $C_6H_{12}O_6$, glukosa merupakan sumber utama energi untuk sel-sel tubuh dan esensial dalam berbagai proses biokimia. Glukosa juga dikenal sebagai "gula darah" karena beredar di aliran darah manusia, di mana kadar glukosa dipantau dan diatur oleh hormon insulin dan glukagon (1–3).

Secara struktur, glukosa memiliki enam atom karbon dengan gugus aldehida (aldosa) pada karbon pertama. Dalam larutan, glukosa dapat berbentuk rantai lurus atau cincin (α -glukosa dan β -glukosa), di mana bentuk cincin lebih stabil dan umum ditemukan. Glukosa larut dalam air karena keberadaan gugus hidroksil yang membentuk ikatan hidrogen, sehingga mudah didistribusikan ke sel-sel tubuh. Selain itu, glukosa memiliki rasa manis, meskipun tidak semanis fruktosa, dan dapat bereaksi dengan protein atau lipid melalui proses glikasi, yang jika berlebihan, dapat menyebabkan kerusakan jaringan dan penyakit kronis. Glukosa dihasilkan melalui pencernaan pati, yang pertama dipecah menjadi dekstrin, lalu maltosa, dan akhirnya menghasilkan dua molekul glukosa dengan bantuan enzim (1–3).

Fungsi utama glukosa adalah sebagai sumber energi melalui proses glikolisis yang menghasilkan ATP, energi utama bagi sel. Jika tidak segera digunakan, glukosa disimpan sebagai glikogen. Selain itu, glukosa juga berperan dalam pembentukan struktur biokimia seperti glikoprotein dan glikolipid yang penting untuk komunikasi antar sel. Makanan yang mengandung glukosa dapat ditemukan pada madu, buah-buahan, jagung manis dan sejumlah akar (1–3).

b) Fruktosa

Fruktosa adalah jenis monosakarida (gula sederhana) dengan enam atom karbon yang tergolong dalam kelompok ketosa. Dengan rumus kimia $C_6H_{12}O_6$, fruktosa memiliki struktur yang sedikit berbeda dari glukosa, karena gugus karbonilnya berada di posisi kedua (keton), menjadikannya ketosa, bukan aldosa seperti glukosa. Fruktosa memiliki tingkat kemanisan yang lebih tinggi dibandingkan glukosa dan sukrosa, sehingga hanya sedikit yang dibutuhkan untuk menghasilkan rasa manis yang sama. Secara kimia, fruktosa termasuk dalam

kelompok ketosa karena memiliki gugus karbonil pada atom karbon kedua, membedakannya dari glukosa yang merupakan aldosa. Fruktosa juga sangat larut dalam air, membuatnya mudah digunakan dalam berbagai produk makanan dan minuman (1–3).

Sebagai sumber energi, fruktosa dimetabolisme terutama di hati setelah diserap di usus halus. Tidak seperti glukosa, metabolisme fruktosa tidak memerlukan insulin, sehingga tidak langsung mempengaruhi kadar gula darah. Di hati, fruktosa dapat diubah menjadi glukosa, glikogen, asam lemak, atau dimetabolisme langsung untuk energi. Meskipun metabolisme fruktosa tidak memerlukan insulin, konsumsi fruktosa yang berlebihan dapat berkontribusi pada resistensi insulin dalam jangka panjang, sehingga perlu diperhatikan asupannya dalam pola makan sehari-hari. Fruktosa juga banyak digunakan sebagai pemanis dalam makanan dan minuman karena tingkat kemanisannya yang tinggi. Selain itu, fruktosa sering dimanfaatkan dalam produk diet rendah kalori untuk mengurangi jumlah kalori sambil tetap memberikan rasa manis (1–3).

c) Galaktosa

Galaktosa adalah monosakarida yang sering ditemukan sebagai bagian dari laktosa, yaitu gula utama dalam susu. Galaktosa dapat diubah menjadi glukosa di dalam tubuh melalui serangkaian reaksi enzimatik. Dalam proses ini, enzim galaktokinase memfasilitasi fosforilasi galaktosa menjadi galaktosa-1-fosfat. Kemudian, galaktosa-1-fosfat bereaksi dengan uridina difosfat glukosa (UDPG), membentuk uridina difosfat galaktosa (UDPGal) dan glukosa-1-fosfat melalui enzim galaktosa-1-fosfat uridil transferase. UDPGal kemudian dapat diubah menjadi UDPG melalui aksi enzim UDP-galaktosa 4-epimerase. UDPG inilah yang akhirnya dapat

diubah menjadi glukosa-1-fosfat dan masuk ke dalam jalur metabolisme glukosa (1–3).

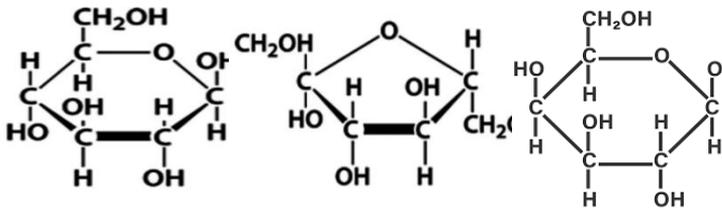
Secara fungsional, galaktosa sangat penting dalam pembentukan laktosa, serta berbagai glikolipid dan glikoprotein, yang memiliki peran penting dalam fungsi dan struktur sel, termasuk dalam myelin pada sistem saraf. Defisiensi enzim yang terlibat dalam metabolisme galaktosa, seperti pada kasus galaktosemia, dapat menyebabkan masalah kesehatan serius seperti kerusakan pada hati, sistem saraf, dan katarak (1–3).

d) Manitol

Manitol berasal dari manosa atau fruktosa dengan rumus $C_6H_{14}O_6$. Memiliki sifatnya non-higroskopik dan stabil terhadap kelembapan, sehingga digunakan dalam pembuatan tablet farmasi, permen, dan makanan bebas gula. Tingkat kemanisan sekitar 50-60% dibandingkan sukrosa. Dalam medis, manitol digunakan sebagai diuretik osmotik untuk mengurangi tekanan intrakranial dan intraokular. Namun, konsumsi berlebihan dapat menyebabkan efek laksatif (1–4).

e) Sorbitol

Sorbitol berasal *dari* glukosa, memiliki rumus $C_6H_{14}O_6$ dan bersifat higroskopik, sehingga membantu menjaga kelembapan produk seperti permen karet, makanan panggang, dan kosmetik. Dengan rasa manis 60% dibanding sukrosa, sorbitol juga digunakan sebagai pemanis rendah kalori dalam makanan dan sirup obat. Sama seperti manitol, sorbitol dapat menyebabkan efek laksatif jika dikonsumsi dalam jumlah besar (1–4).



Glukosa

Fruktosa

Galaktosa

Gambar 4.1. Struktur Monosakarida

b. Disakarida (C₁₂H₂₂O₁₁)

Disakarida adalah jenis karbohidrat yang terbentuk dari dua molekul monosakarida yang terikat melalui ikatan glikosidik. Disakarida dapat dipecah menjadi monosakarida penyusunnya melalui proses hidrolisis dengan bantuan enzim.

a) Sukrosa

Sukrosa dikenal sebagai gula meja dan ditemukan dalam tebu, bit gula, buah dan sorgum. Di dalam usus halus, sukrosa dipecah menjadi fruktosa dan glukosa. Sukrosa adalah salah satu pemanis alami yang paling umum digunakan di dunia (1–4).

b) Maltosa

Maltosa dikenal sebagai gula malt atau gula biji dan tidak terdapat dalam bentuk bebas di alam. Maltosa merupakan produk pemecahan pati dengan bantuan enzim diastase, suatu enzim yang diperoleh dari biji-bijian yang berkecambah. Di dalam usus halus, maltose dipecah menjadi 2 molekul glukosa (1–4).

c) Laktosa

Laktosa adalah gula utama dalam susu dan produk olahannya. Pencernaan laktosa di dalam tubuh melibatkan enzim laktase, yang memecahnya menjadi glukosa dan galaktosa. Defisiensi

enzim ini dapat menyebabkan intoleransi laktosa, kondisi di mana tubuh sulit mencerna susu dan produk turunannya. ASI mengandung 5-8% laktosa, sedangkan susu sapi mengandung 4-6% laktosa (1-4).

2) Karbohidrat Kompleks

Karbohidrat kompleks jenis karbohidrat yang terdiri dari rantai panjang molekul monosakarida yang terhubung melalui ikatan glikosidik. Karbohidrat ini membutuhkan waktu lebih lama untuk dicerna karena struktur molekulnya yang lebih rumit dibandingkan dengan karbohidrat sederhana.

a) Oligosakarida

Oligosakarida adalah jenis karbohidrat dengan 3-10 molekul monosakarida yang saling terhubung. Jenis utama oligosakarida meliputi frukto-oligosakarida (FOS) dan galakto-oligosakarida (GOS). FOS, yang terdiri dari rantai fruktosa berakhir dengan glukosa, ditemukan dalam bawang, asparagus, gandum utuh, pisang, dan ASI. Sementara itu, GOS, yang terdiri dari rantai galaktosa dengan glukosa di ujungnya, ditemukan dalam ASI, susu sapi, yogurt, keju, dan makanan fermentasi seperti tempe dan kimchi. Keduanya berfungsi sebagai prebiotik yang mendukung pertumbuhan bakteri baik seperti *Bifidobacteria*, memperkuat sistem imun, dan menekan bakteri patogen.

Selain itu, terdapat rafinosa, stakiosa, dan verbakosa yang ditemukan dalam kacang-kacangan seperti kedelai dan kacang polong. Rafinosa terdiri dari glukosa, fruktosa, dan galaktosa, sedangkan stakiosa terdiri dari 1 molekul glukosa, 1 molekul fruktosa, dan 2 molekul galaktosa. Meskipun tidak dapat dicerna di usus halus, oligosakarida ini difermentasi di usus besar untuk menghasilkan asam lemak rantai pendek (SCFA) yang bermanfaat bagi kesehatan usus. Inulin,

meskipun sering dianggap sebagai polisakarida, memiliki rantai pendek yang masuk dalam kategori oligosakarida, ditemukan dalam akar chicory dan artichoke. Oligosakarida ini mendukung kesehatan pencernaan dan metabolisme tubuh, terutama melalui perannya sebagai sumber energi bagi mikrobiota usus (1–4).

b) Polisakarida (C₆H₁₀O₅)

Polisakarida adalah karbohidrat kompleks yang terdiri dari lebih dari 10 unit monosakarida yang terhubung melalui ikatan glikosidik. Molekul memiliki struktur linier atau bercabang, tergantung pada jenisnya. Polisakarida ditemukan melimpah dalam biji-bijian, kacang-kacangan, dan sayuran berakar seperti kentang. Secara umum, polisakarida dibagi menjadi dua jenis utama: penyimpan energi dan structural (1,3).

Polisakarida penyimpan energi meliputi pati pada tumbuhan dan glikogen pada hewan. Pati terdiri dari dua komponen: amilosa, rantai linier glukosa yang larut dalam air, ditemukan dalam nasi putih, kentang, dan gandum; dan amilopektin, rantai bercabang glukosa yang larut dalam air panas, ditemukan dalam jagung dan beras ketan. Glikogen, sebagai bentuk penyimpanan energi pada hewan termasuk manusia, tersimpan di hati dan otot dengan struktur bercabang, memungkinkannya cepat terpecah menjadi energi saat tubuh membutuhkan (1,3).

Serat digolongkan menjadi 2 jenis yaitu serat larut dan serat tidak larut air. Serat larut air bersifat kental, membentuk gel saat basah, dapat difermentasi dan dicerna oleh bakteri di usus besar. Serat larut air terdiri dari (1,3):

- Pektin: ditemukan dalam dinding sel tumbuhan, terutama pada buah-buahan, terdiri dari rantai panjang asam galakturonat, yaitu monosakarida yang berasal dari galaktosa, yang saling terhubung melalui ikatan α -1,4-

glikosidik. Selain asam galakturonat, pektin juga mengandung gugus metil ester, residu rhamnosa, dan sedikit monosakarida lain seperti arabinosa, galaktosa, dan xilosa, yang membentuk struktur bercabang. Komposisi ini memberikan pektin sifat larut air dan kemampuan membentuk gel, yang sering dimanfaatkan dalam industri pangan, seperti pembuatan selai dan jeli. Sebagai serat larut air, pektin juga membantu menyerap air selama proses pencernaan, meningkatkan volume feses, dan berkontribusi dalam menurunkan kadar kolesterol darah.

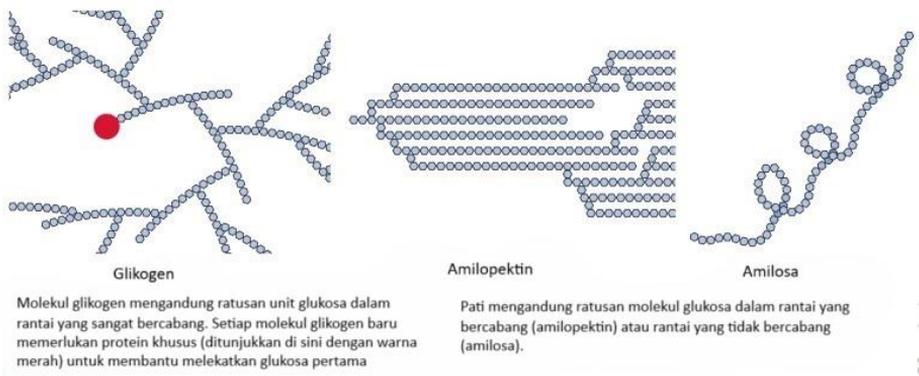
- Fruktan: terdiri dari rantai molekul fruktosa dengan satu molekul glukosa di ujungnya. Fruktan ditemukan dalam makanan seperti daun bawang, bawang Bombay, bawang putih, asparagus, dan gandum, serta berperan sebagai prebiotik yang mendukung pertumbuhan bakteri baik di usus.
- Gum: terdiri dari galaktosa, asam glukuronat, dan monosakarida lainnya. Gum digunakan sebagai agen pengental, penstabil, dan pembentuk gel dalam industri makanan, serta memiliki sifat larut air yang membantu meningkatkan viskositas produk.

Serat tidak larut air tidak dapat difermentasi oleh bakteri pada usus besar. Serat yang tergolong tidak larut air yaitu (1,3):

- Selulosa: terdiri dari rantai panjang glukosa yang dihubungkan oleh ikatan β -1,4-glikosidik. Serat ini merupakan komponen utama dinding sel tumbuhan, memberikan kekuatan dan struktur pada jaringan tumbuhan, termasuk buah, sayuran, tangkai, daun, dan lapisan luar biji-bijian. Manusia tidak dapat mencerna selulosa karena tubuh tidak memiliki enzim yang dapat

memecah ikatan β -glikosidik. Namun, serat ini berperan penting dalam kesehatan pencernaan dengan membantu meningkatkan volume feses danmemperlancar pergerakan usus.

- Hemiselulosa: terdiri dari glukosa, manosa, asam galakturonat, dan monosakarida lain. Serat ini ditemukan pada dinding sel tumbuhan dan menyelubungi selulosa, komponen serat utama pada sereal yang terkandung dalam biji-bijian utuh dan sayuran. Berfungsi sebagai serat pangan yang membantu meningkatkan kesehatan pencernaan dengan memperbaiki pergerakan usus dan mendukung fermentasi mikroba di usus besar.



Gambar 4.2. Rantai Struktur Glikogen, Amilopektin dan Amilosa (3)

Sumber gambar: Diterjemahkan dari Whitney, 2019

1. Fungsi Karbohidrat di Dalam Tubuh

Karbohidrat memiliki beberapa fungsi penting dalam tubuh (1–3,5):

1) Sumber Energi Utama

Glukosa adalah bahan bakar utama bagi sebagian besar sel tubuh, terutama otak dan sel darah merah.

2) Penyimpanan Energi

Glikogen, bentuk penyimpanan glukosa, ditemukan di hati dan otot. Ketika tubuh membutuhkan energi, glikogen dipecah menjadi glukosa.

3) Komponen Struktural

Karbohidrat adalah bagian dari membran sel dan berperan dalam sinyal seluler serta pengenalan molekuler. Karbohidrat juga membentuk komponen struktural dalam molekul biologis tertentu, seperti glikoprotein dan glikolipid.

4) Menghindari Penggunaan Protein dan Lemak sebagai Energi

Karbohidrat mencegah protein digunakan sebagai sumber energi, memungkinkan protein untuk menjalankan fungsi utamanya, seperti perbaikan jaringan. Karbohidrat juga membantu metabolisme lemak dengan menyediakan sumber oksaloasetat bagi siklus Krebs

2. Sumber Karbohidrat

Sumber karbohidrat ditemukan pada biji-bijian, sayuran, polong-polongan, buah-buahan dan juga susu. Karbohidrat umumnya ditemukan pada tumbuhan, dimana klorofil tumbuhan akan menyerap cahaya matahari untuk menyediakan energi dalam bentuk glukosa atau kita sebut sebagai proses fotosintesis. Berikut adalah bahan makanan sumber karbohidrat (1):

- Biji-bijian dan olahannya: beras, sagu, gandum, jagung, oat, havermut dan produk olahannya (tepung, roti, mie, pasta, dan lain-lain).
- Umbi-umbian dan olahannya: kentang, ubi, dan talas.
- Akar tanaman dan olahannya: singkong, tepung singkong.
- Sayuran: wortel, brokoli, bayam, labu
- Polong-polongan: kacang hijau, kacang merah, dan kacang polong.

- Buah-buahan: pisang, manga, apel, jeruk, semangka, kurma, melon, nanas, papaya, anggur, dan pir

3. Metabolisme Karbohidrat

1) Pencernaan Karbohidrat

Berikut adalah Langkah-langkah pencernaan karbohidrat (1,3,5):

a. Di mulut

Pencernaan karbohidrat dimulai di mulut, di mana enzim *salivary amylase* memecah pati menjadi maltosa. Proses ini terjadi selama makanan dikunyah dan bercampur dengan air liur, tetapi hanya berlangsung sebentar sebelum makanan mencapai lambung.

b. Di lambung

Tidak ada pencernaan karbohidrat yang terjadi di lambung karena lingkungan asam menonaktifkan *salivary amylase*. Karbohidrat yang belum tercerna diteruskan ke usus halus melalui proses peristaltik.

c. Di usus halus

Pankreas mengeluarkan *pancreatic amylase* ke dalam lumen usus halus, yang melanjutkan pemecahan pati menjadi disakarida maltosa. Pada permukaan mikrovilus, enzim maltase, sukrase, dan laktase memecah disakarida menjadi monosakarida, yaitu glukosa, fruktosa, dan galaktosa, sehingga siap untuk diserap oleh sel-sel usus.

d. Absorpsi monosakarida

Monosakarida diserap di usus halus melalui mekanisme yang berbeda: glukosa dan galaktosa melalui transport aktif yang memerlukan natrium, sedangkan fruktosa melalui difusi difasilitasi. Setelah masuk ke sel usus, monosakarida diangkut ke hati melalui vena porta, di mana galaktosa dan fruktosa diubah menjadi glukosa.

e. Di usus besar

Karbohidrat yang tidak tercerna, seperti serat, mencapai usus besar. Di sini, bakteri usus memfermentasi sebagian karbohidrat menjadi asam lemak rantai pendek dan gas. Serat yang tidak dapat dicerna sepenuhnya dikeluarkan bersama feses, membantu meningkatkan volume feses dan memperlancar pergerakan usus.

2) Katabolisme Karbohidrat

Katabolisme adalah reaksi kimia atau enzimatik yang melibatkan pemecahan material organik atau anorganik untuk menghasilkan energi. Katabolisme karbohidrat terdiri dari 4 tahap; 1) glikolisis, 2) dekarboksilasi oksidatif (produksi asetil-KoA), 3) siklus asam sitrat (oksidasi asetil-KoA), dan 4) fosforilasi transfer elektron (1,3,5,6).

a. Katabolisme Karbohidrat Tahap Pertama: Produksi Asetil-KoA

Pada reaksi ini molekul glukosa mengalami: glikolisis untuk menghasilkan piruvat yang kemudian mengalami dekarboksilasi oksidatif untuk menghasilkan Asetil-KoA (5,6).

a) Glikolisis

Glikolisis proses metabolisme di sitoplasma yang mengubah glukosa menjadi 2 molekul piruvat melalui 10 reaksi enzimatik. Proses ini menghasilkan energi bersih berupa 2 ATP dan 2 NADH serta dapat berlangsung baik dalam kondisi aerobik maupun anaerobik. Berikut tahapan glikolisis (5,6):

1) Tahap 1: Fosforilasi Glukosa

Reaksi: Glukosa \rightarrow Glukosa-6-Fosfat

Enzim: Hexokinase (atau Glucokinase di hati)

Proses: Glukosa difosforilasi menggunakan 1 ATP, menghasilkan glukosa-6-fosfat. Reaksi ini bersifat tidak reversible.

2) Tahap 2: Isomerisasi Glukosa-6-Fosfat

Reaksi: Glukosa-6-Fosfat \rightarrow Fruktosa-6-Fosfat

Enzim: Fosfoheksoisomerase

Proses: Glukosa-6-fosfat (aldosa) mengalami isomerisasi menjadi fruktosa-6-fosfat (ketosa). Reaksi ini bersifat reversible dan dikatalisis oleh enzim Fosfoheksoisomerase.

3) Tahap 3: Fosforilasi Fruktosa-6-Fosfat

Reaksi: Fruktosa-6-Fosfat \rightarrow Fruktosa-1,6-Bisfosfat

Enzim: Fosfofruktokinase-1 (PFK-1)

Proses: Fruktosa-6-fosfat difosforilasi menggunakan 1 ATP, menghasilkan fruktosa-1,6-bisfosfat. Ini adalah langkah pengaturan utama glikolisis.

4) Tahap 4: Pembelahan Fruktosa-1,6-Bifosfat

Reaksi: Fruktosa-1,6-Bisfosfat \rightarrow Gliceraldehida-3-Fosfat (G3P) + Dihidroksiaseton Fosfat (DHAP)

Enzim: Aldolase

Proses: Fruktosa 1,6-bisfosfat dipecah untuk menghasilkan gliseraldehida-3-fosfat yang merupakan aldosa dan dihidroksiaseton fosfat yang merupakan ketosa. Reaksi ini bersifat reversible dan dikatalis oleh enzim fruktosa 1,6-bisfosfat aldolase atau terkadang disebut aldolase saja.

5) Tahap 5: Isomerisasi DHAP

Reaksi: Dihidroksiaseton Fosfat \rightarrow Gliceraldehida-3-Fosfat (G3P)

Enzim: Triosa fosfat isomerase

Proses: Dihidroksiaseton fosfat dikonversi menjadi gliseraldehida-3-fosfat oleh enzim triosa fosfat

isomerase. Reaksi ini bersifat reversible dan dilakukan karena hanya gliseraldehida-3-fosfat yang dapat masuk ke tahap glikolisis berikutnya.

6) Tahap 6: Oksidasi G3P

Reaksi: $G3P + NAD^+ + Pi \rightarrow 1,3\text{-Bisfosfogliserat} + NADH$

Enzim: Gliceraldehida-3-fosfat dehidrogenase

Proses: G3P dioksidasi, menghasilkan 1,3-bisfosfogliserat dan 1 NADH per molekul G3P.

7) Tahap 7: Fosforilasi Tingkat Substrat I

Reaksi: $1,3\text{-Bisfosfogliserat} + ADP \rightarrow 3\text{-Fosfogliserat} + ATP$

Enzim: Fosfogliserat kinase

Proses: Gugus fosfat dari 1,3-bisfosfogliserat dipindahkan ke ADP (*Adenosine Diphosphate*), sehingga terbentuk 3-fosfogliserat dan ATP (*Adenosine Triphosphate*). Reaksi ini bersifat reversible dan dikatalisis oleh fosfogliserat kinase.

8) Tahap 8: Isomerase 3-Fosfogliserat

Reaksi: $3\text{-Fosfogliserat} \rightarrow 2\text{-Fosfogliserat}$

Enzim: Fosfogliserat mutase

Proses: Fosfat pada 3-fosfogliserat dipindahkan ke atom karbon ke-2 dengan bantuan enzim fosfogliserat mutase yang memerlukan Mg^{2+} , menghasilkan 2-fosfogliserat. Reaksi ini bersifat reversible.

9) Tahap 9: Dehidrasi 2-Fosfogliserat

Reaksi: $2\text{-Fosfogliserat} \rightarrow \text{Phosphoenolpyruvate (PEP)}$

Enzim: Enolase

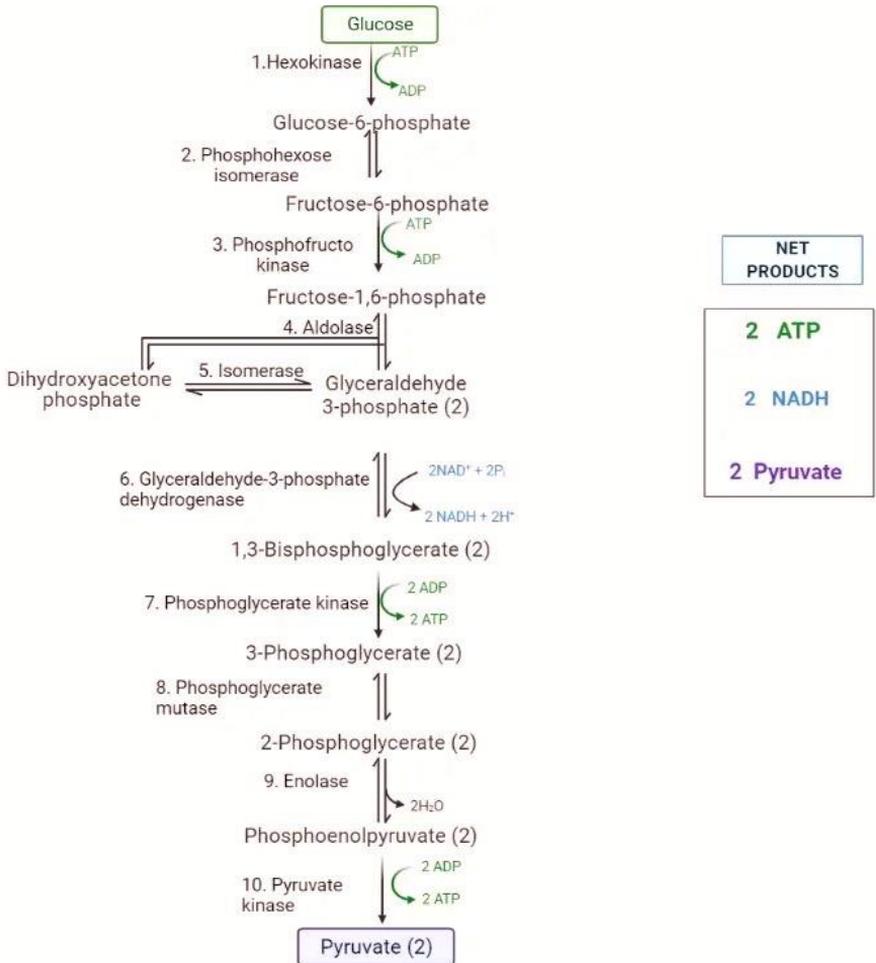
Proses: Molekul air dikeluarkan dari 2-fosfogliserat, dengan bantuan enzim enolase menghasilkan PEP (*Phosphoenolpyruvate*), senyawa energi tinggi. Reaksi ini bersifat reversible.

10) Tahap 10: Fosforilasi Tingkat Substrat II

Reaksi: $\text{PEP} + \text{ADP} \rightarrow \text{Piruvat} + \text{ATP}$

Enzim: Piruvat kinase

Proses: Gugus fosfat dari PEP dipindahkan ke ADP, menghasilkan ATP dan piruvat sebagai produk akhir glikolisis.



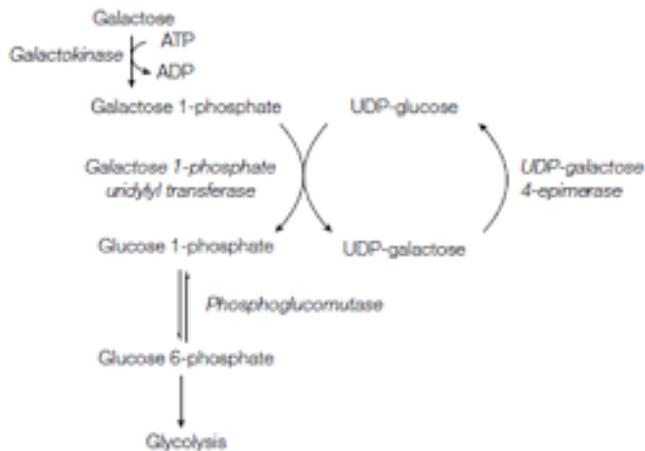
Gambar 4.3. Sepuluh Tahapan Glikolisis

Sumber gambar: <https://microbeonline.com/glycolysis-enzymes-steps-and-products/>

Galaktosa, fruktosa, dan manosa dapat masuk ke jalur glikolisis setelah mengalami konversi menjadi senyawa perantara glikolisis. Berikut penjelasannya:

a) Galaktosa

Galaktosa masuk ke jalur glikolisis melalui konversi menjadi glukosa-6-fosfat dalam jalur Leloir. Pertama, galaktosa difosforilasi menjadi galaktosa-1-fosfat oleh enzim galaktokinase. Selanjutnya, galaktosa-1-fosfat bereaksi dengan UDP-glukosa, menghasilkan glukosa-1-fosfat dan UDP-galaktosa melalui enzim galaktosa-1-fosfat uridil transferase. Glukosa-1-fosfat kemudian diubah menjadi glukosa-6-fosfat oleh fosfoglukomutase, yang langsung masuk ke jalur glikolisis untuk menghasilkan energi (5).



Gambar 4.4. Jalur glikolisis galaktosa

Sumber gambar:: <https://www.expertsmind.com/topic/glycolysis/metabolism-of-galactose-95879.aspx>

b) Fruktosa

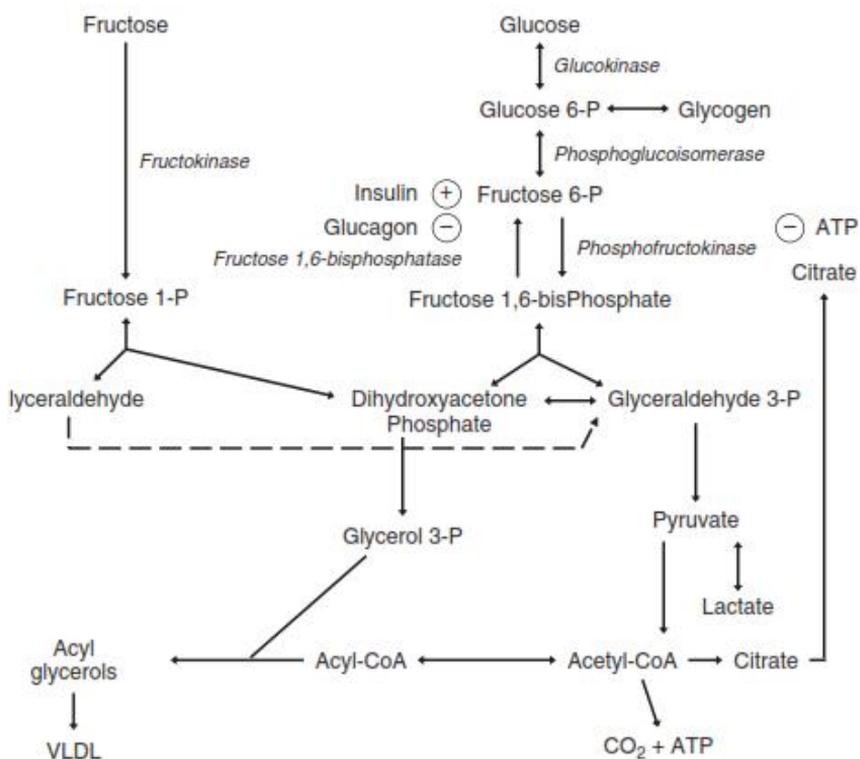
Fruktosa masuk ke jalur glikolisis melalui dua jalur yang berbeda, tergantung pada lokasinya: di hati atau jaringan non-hati. Di hati, fruktosa diubah menjadi fruktosa-1-fosfat oleh enzim fruktokinase. Reaksi ini menggunakan ATP sebagai sumber energi. Fruktosa-1-fosfat kemudian dipecah oleh enzim aldolase B menjadi dua senyawa: dihidroksiaseton fosfat (DHAP) dan gliseraldehida. Gliseraldehida selanjutnya difosforilasi menjadi gliseraldehida-3-fosfat (G3P) oleh enzim triosa kinase, menggunakan ATP. DHAP dan G3P, sebagai senyawa perantara glikolisis, langsung masuk ke jalur glikolisis untuk menghasilkan energi.

Pada jaringan non-hati, seperti otot, fruktosa diubah menjadi fruktosa-6-fosfat oleh enzim heksokinase menggunakan ATP. Fruktosa-6-fosfat ini kemudian masuk langsung ke jalur glikolisis sebagai senyawa perantara, tanpa melalui langkah-langkah tambahan seperti di hati (5,7).

c) Manosa

Manosa masuk ke jalur glikolisis melalui konversi menjadi fruktosa-6-fosfat. Proses ini dimulai dengan fosforilasi manosa menjadi manosa-6-fosfat oleh enzim heksokinase dengan bantuan ATP. Selanjutnya, manosa-6-fosfat diubah menjadi fruktosa-6-fosfat melalui reaksi isomerisasi yang dikatalisis oleh enzim fosfomanosa isomerase.

Fruktosa-6-fosfat yang terbentuk kemudian bergabung dengan jalur glikolisis sebagai senyawa perantara, di mana ia melanjutkan reaksi metabolisme untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP dan piruvat (5).



Gambar 4.5. Metabolisme Fruktosa di Hati (7)

b) Dekarboksilasi Oksidatif

Setelah glikolisis selesai, piruvat memasuki mitokondria untuk mengalami dekarboksilasi oksidatif yang mengubahnya menjadi asetil-KoA, yang akan melanjutkan ke siklus asam sitrat (Krebs). Proses ini melalui serangkaian tahapan yang melibatkan enzim dan molekul pembawa electron. Berikut tahapannya (2,5,6):

- 1) Tahap ke-1, yaitu aktivasi piruvat oleh enzim piruvat dehidrogenase, yang mengidentifikasi dan mempersiapkan piruvat untuk mengalami perubahan menjadi asetil-KoA. Enzim ini bekerja dengan merekrut koenzim NAD^+ dan Koenzim A (CoA).
- 2) Tahap ke-2, yaitu dekarboksilasi, di mana piruvat melepaskan satu gugus karbon dalam bentuk karbon dioksida (CO_2).

Proses ini mengurangi jumlah karbon dari piruvat dan membentuk senyawa yang lebih sederhana, yang disebut sebagai asetil-KoA.

- 3) Tahap ke-3, melibatkan reduksi NAD^+ menjadi NADH. Selama proses oksidasi piruvat, NAD^+ menerima dua elektron dari substrat piruvat, membentuk NADH sebagai agen pembawa elektron. NADH akan digunakan dalam rantai transport elektron untuk produksi ATP.
- 4) Tahap ke-4, adalah konversi piruvat menjadi asetil-KoA melalui reaksi penggabungan dengan koenzim A (CoA) setelah dekarboksilasi selesai. Asetil-KoA adalah senyawa aktif yang memasuki siklus asam sitrat untuk melanjutkan metabolisme energi lebih lanjut.
- 5) Tahap ke-5, adalah asetil-KoA yang siap masuk ke dalam siklus asam sitrat (Krebs Cycle) untuk melanjutkan proses produksi energi melalui jalur oksidasi dan fosforilasi.



b. Katabolisme Karbohidrat Tahap Kedua: Siklus Asam Sitrat

Siklus asam sitrat disebut juga siklus Krebs atau siklus asam trikarboksilat. Proses ini bertujuan untuk mengubah asetil-KoA menjadi energi, karbon dioksida (CO_2), dan air (H_2O) melalui jalur metabolisme aerobik yang menggunakan oksigen. Energi yang dihasilkan disimpan dalam bentuk ATP. Satu molekul asetil-KoA mengalami satu siklus, mulai dari produksi asam sitrat sampai pembentukan asam oksaloasetat. Setiap molekul glukosa menghasilkan 2 molekul asetil-KoA dalam 2 siklus asam sitrat. Setiap molekul glukosa akan menghasilkan 6 molekul NADH, 6 ion H^+ , 2 molekul FADH_2 , serta 2 molekul ATP (2–4,6).

Siklus asam sitrat terdiri 8 tahapan yaitu (2–4,6):

1) Pembentukan Sitrat

Asetil-KoA berikatan dengan oksaloasetat untuk membentuk asam sitrat (6 karbon). Proses ini dikatalisis oleh enzim **asetil-KoA sintase**. Ini adalah langkah awal siklus asam sitrat yang penting sebagai langkah pengenalan awal.

2) Pembentukan isositrat

Setelah sitrat terbentuk maka akan diubah menjadi **cis-akonitat** oleh enzim **akotinase** yang mengandung kofaktor Fe^{2+} . Selanjutnya, enzim yang sama menambahkan air (H_2O) pada ikatan rangkap cis-akonitat, membentuk **isositrat**. Isositrat kemudian melanjutkan reaksi dalam siklus asam sitrat untuk dioksidasi menjadi alfa-ketoglutarat.

3) Pembentukan alfa-ketoglutarat

Isositrat mengalami oksidasi oleh enzim isositrat dehidrogenase dengan bantuan NAD^+ , membentuk oksalosuksinat, lalu mengalami dekarboksilasi menjadi alfa-ketoglutarat. Selama proses ini, NAD^+ direduksi menjadi NADH, dan CO_2 dilepaskan sebagai produk sampingan.

4) Pembentukan suksinil-KoA

Pada tahap ini alfa-ketoglutarat mengalami dekarboksilasi oksidatif menjadi suksinil-KoA. Proses ini dikatalisis oleh kompleks enzim alfa-ketoglutarat dehidrogenase, yang membantu pelepasan satu molekul karbon dioksida (CO_2) dari alfa-ketoglutarat. Selama reaksi ini, NAD^+ berperan sebagai penerima elektron dan direduksi menjadi NADH, sedangkan KoA (Koenzim A) bertindak sebagai pembawa gugus suksinil yang berikatan dengan hasil reaksi, membentuk suksinil-KoA.

5) Pembentukan ATP dari Suksinil-KoA

Pada tahap ini, suksinil-KoA diubah menjadi suksinat sambil membentuk ATP melalui proses fosforilasi tingkat substrat. Enzim yang terlibat dalam reaksi ini adalah suksinil-KoA

sintetase dengan bantuan Mg^{2+} dan GDP. Reaksi ini mengubah suksinil-KoA menjadi suksinat, dan dalam proses tersebut, GDP berikatan dengan fosfat untuk membentuk GTP, yang kemudian diubah menjadi ATP.

6) Pembentukan fumarat

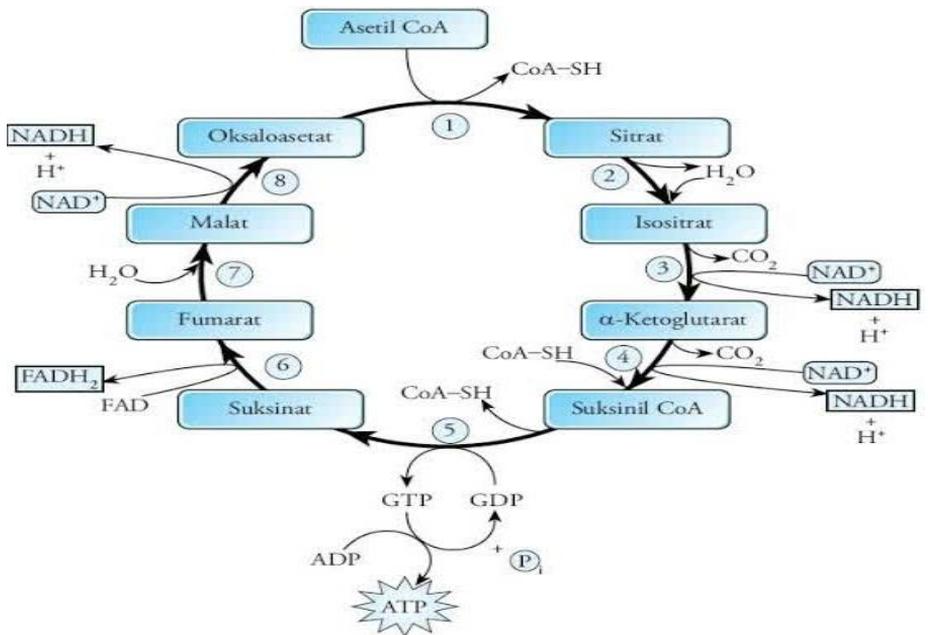
Suksinat dioksidasi menjadi fumarat oleh enzim suksinat dehidrogenase. Selama reaksi ini, FAD direduksi menjadi $FADH_2$, yang berfungsi sebagai pembawa elektron dalam jalur rantai transport elektron untuk produksi ATP.

7) Pembentukan malat

Fumarat diubah menjadi **L-malat** melalui proses hidrasi yang dikatalisis oleh enzim **fumarase (fumarat hidratase)**. Reaksi ini bersifat reversibel dan melibatkan keadaan transisi berupa karbanion sebelum terbentuknya L-malat. Tahap ini menambahkan molekul air (H_2O) ke ikatan rangkap dalam fumarat, menghasilkan malat yang siap dioksidasi pada tahap berikutnya.

8) Pembentukan oksaloasetat

Malat dioksidasi menjadi **oksalasetat** dengan bantuan enzim **malat dehidrogenase**. Selama proses ini, molekul NAD^+ direduksi menjadi **NADH**, yang akan digunakan dalam rantai transport elektron untuk menghasilkan ATP. Oksaloasetat yang terbentuk kemudian bergabung dengan **asetil-KoA** untuk memulai kembali siklus asam sitrat, menjadikannya proses yang berulang dan terus menerus berlangsung selama ada substrat dan oksigen yang cukup.



Gambar 4.6. Siklus Asam Sitrat

c. Katabolisme Karbohidrat Tahap Ketiga: Transfer Elektron

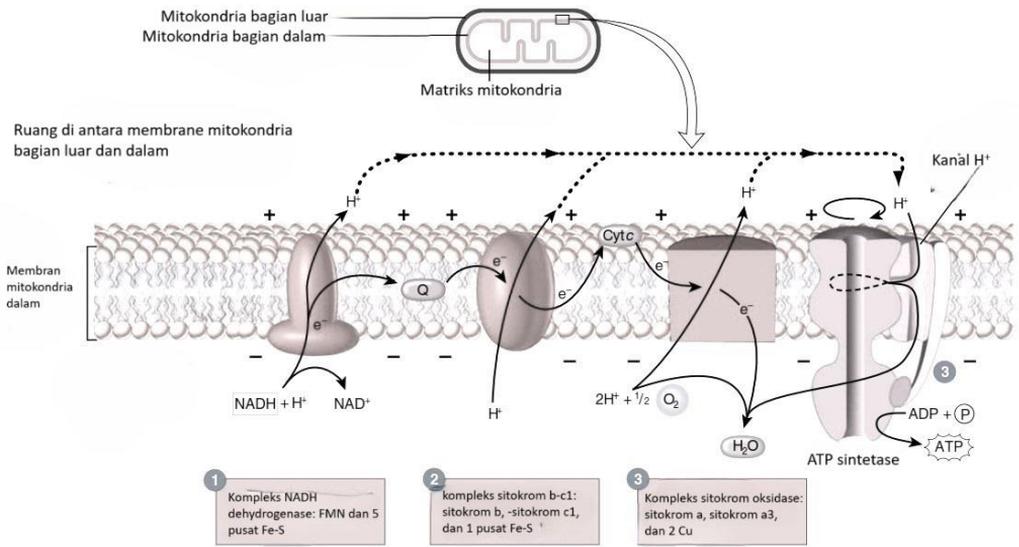
Transport elektron adalah tahapan akhir dari proses respirasi seluler yang terjadi di membran dalam mitokondria. Proses ini berperan penting dalam produksi energi (ATP) melalui pemindahan elektron dari molekul pembawa energi seperti NADH dan FADH₂ ke oksigen sebagai penerima elektron terakhir (3,5,6).

Berikut tahapan transfer electron (3,5,6):

- 1) Masuknya NADH dan FADH₂ ke Rantai Transport Elektron
NADH dan FADH₂ adalah molekul pengangkut elektron yang dihasilkan dari glikolisis dan siklus asam sitrat.
 - NADH menyerahkan elektronnya ke Kompleks I (NADH Dehidrogenase).
 - FADH₂ menyerahkan elektronnya ke Kompleks II (Suksinat Dehidrogenase).
- 2) Koenzim Q (CoQ) sebagai Pengantar Elektron

Koenzim Q berfungsi mengangkut elektron dari kompleks I dan kompleks II ke kompleks III. Koenzim ini memiliki peran sebagai jalur perantara dalam transport elektron.

- 3) Pergerakan Elektron melalui Kompleks III (Sitokrom b-c₁)
Elektron dari Koenzim Q diteruskan ke kompleks ini. Selama proses ini, sejumlah proton dipindahkan dari matriks mitokondria ke ruang antar membran untuk membentuk gradien proton.
- 4) Kompleks IV (Sitokrom Oksidase)
Elektron yang berasal dari kompleks sebelumnya diteruskan ke kompleks IV, di mana mereka bertemu dengan oksigen (akseptor akhir). Di sini, oksigen menerima elektron, bereaksi dengan proton, dan membentuk air (H₂O).
- 5) Sintesis ATP melalui ATP Sintase
Terbentuknya gradien proton berkat pemindahan H⁺ dari matriks ke ruang antar membran, proton kembali ke matriks melalui saluran H⁺ di ATP sintase. Proses ini memutar ATP sintase dan mengubah ADP menjadi ATP melalui fosforilasi oksidatif. Total ATP yang dihasilkan dari 1 molekul glukosa adalah 36 ATP.



Gambar 4.7. Transfer Elektron (6)

Sumber gambar: Diterjemahkan dari Tortora, 2020

Tabel 4.1. Hasil Metabolisme Karbohidrat (8)

Proses	Reaksi	Metode Pembentukan ATP	ATP yang dihasilkan (per mol glukosa)
Glikolisis	Gliseraldehid-3-fosfat dehidrogenase	Oksidasi rantai respirasi dari 2 NADH	6 ATP
	Fosfoglisarat kinase	Fosforilasi tingkat substrat I	2 ATP
	Piruvat kinase	Fosforilasi tingkat substrat II	2 ATP
	Digunakan untuk memulai glikolisis	-	-2
Total bersih glikolisis			8
Dekarboksilasi oksidatif	Piruvat dehidrogenase	Oksidasi rantai respirasi dari 2 NADH	6 ATP

Siklus asam sitrat dan transfer elektron	Isositrat dehidrogenase	Oksidasi rantai respirasi dari 2 NADH	6
	Alfa-ketoglutarat dehidrogenase	Oksidasi rantai respirasi dari 2 NADH	6
	Suksinat tiokinase	Fosforilasi tingkat substrat	2
	Suksinat dehidrogenase	Oksidasi rantai respirasi dari 2 FADH ₂	4
	Malat dehidrogenase	Oksidasi rantai respirasi 2 NADH	6
Total bersih Siklus asam sitrat dan transfer elektron			30
Total ATP (aerobik)			36
Total ATP (anaerobik)			2

Reaksi keseluruhan:



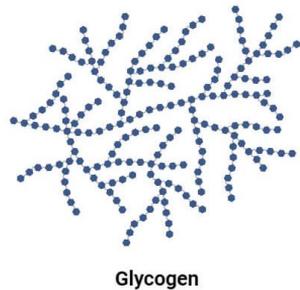
Satu molekul glukosa (C₆H₁₂O₆) dioksidasi sempurna dengan oksigen (O₂) melalui rangkaian proses metabolisme, yaitu glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, siklus asam sitrat, dan transfer elektron. Proses ini menghasilkan karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O) sebagai produk samping, serta 36 ATP yang digunakan sebagai energi untuk fungsi-fungsi seluler (8).

3) Anabolisme Karbohidrat

Anabolisme karbohidrat adalah proses metabolisme untuk membentuk karbohidrat kompleks dari molekul sederhana seperti glukosa atau prekursor lainnya dengan memanfaatkan energi dalam bentuk ATP dan reduktan seperti NADPH. Proses utama dalam anabolisme karbohidrat meliputi: 1) **glikogenesis**, 2) glikogenolisis, dan 3) glukoneogenesis.

a. Glikogenesis

Glikogenesis adalah proses sintesis glikogen dari molekul glukosa. Terjadi ketika kadar glukosa dalam darah berlebih, terutama setelah konsumsi makanan. Glukosa yang tidak langsung digunakan sebagai sumber energi akan disimpan dalam bentuk glikogen, yang

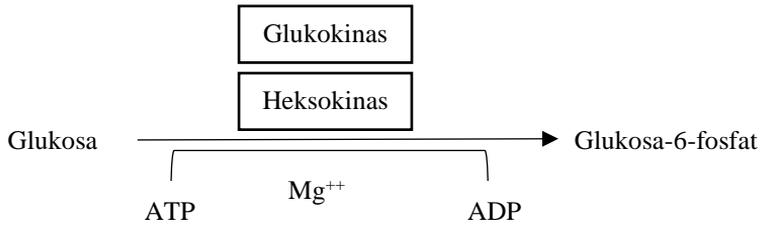


merupakan bentuk cadangan energi utama pada hewan, termasuk manusia. Penyimpanan ini berlangsung di hati dan otot rangka (2–5).

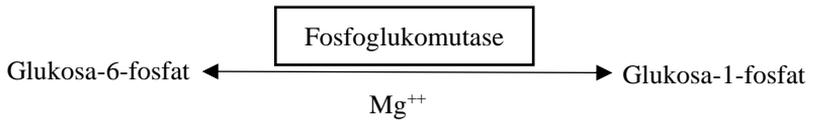
Pada hati, glikogen berfungsi sebagai cadangan energi yang dapat digunakan untuk mempertahankan kadar glukosa darah saat tubuh sedang tidak menerima asupan makanan. Sementara itu, pada otot, glikogen digunakan sebagai sumber energi langsung selama aktivitas fisik. Proses glikogenesis ini dikendalikan oleh hormon insulin, yang merangsang penyimpanan glukosa menjadi glikogen setelah makan (4–6).

Berikut adalah tahapan glikogenesis (4–6)(4,5):

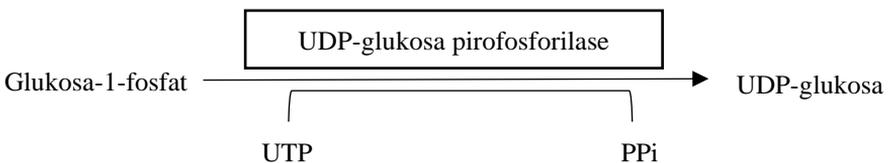
- a) **Fosforilasi Glukosa:** Glukosa yang memasuki sel diubah menjadi glukosa-6-fosfat dengan bantuan enzim heksokinase pada otot atau glukokinase pada hati (tergantung jaringan) serta kofaktor ion Mg^{++} . Glukosa-6-fosfat diperlukan sebagai aktivasi glikogen sintase yang merupakan enzim penting dalam pembentukan glikogen



- b) **Konversi Glukosa-6-Fosfat menjadi Glukosa-1-Fosfat:** enzim fosfoglukomutase mengkatalisis glukosa-6-fosfat diubah menjadi glukosa-1-fosfat.

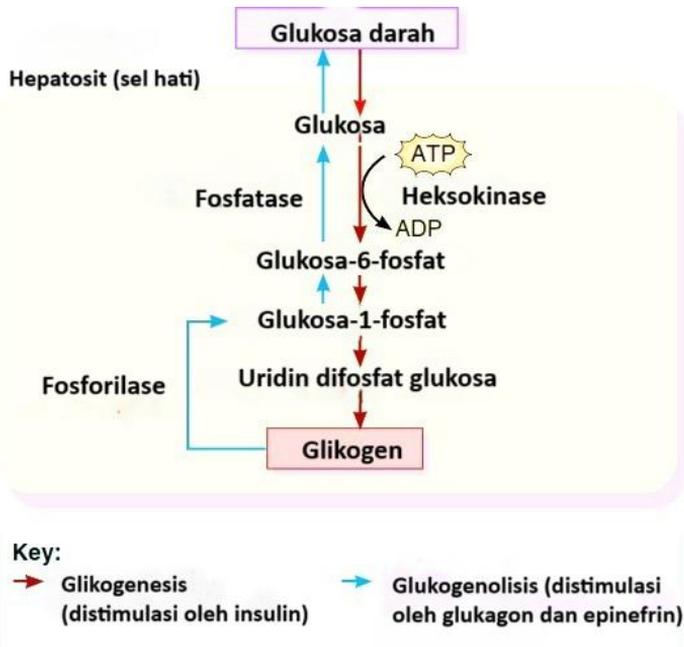


- c) **Pembentukan UDP-Glukosa:** Glukosa-1-fosfat berinteraksi dengan uridin trifosfat (UTP) membentuk UDP-glukosa, suatu molekul aktif yang menjadi substrat untuk pembentukan glikogen. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim UDP-glukosa pirofosforilase. Pada reaksi ini terjadi eliminasi molekul pirofosfat (PPi).



- d) **Pembentukan Rantai Primer Glikogen:** UDP-glukosa berikatan dengan glikogen primer atau protein glikogenin untuk memulai sintesis rantai glikogen. Enzim glikogen sintase kemudian memperpanjang rantai glikogen dengan menambahkan residu glukosa ke ujung rantai non-reduksi.
- e) **Pembentukan Cabang Glikogen:** Cabang pada glikogen dibuat oleh enzim glikogen branching enzyme, yang memindahkan segmen rantai glikogen ke lokasi lain untuk membentuk struktur bercabang. Cabang ini penting untuk meningkatkan kelarutan glikogen dan efisiensi pemecahannya saat energi dibutuhkan.

Selain dari glukosa, glikogen di hati dapat juga dibentuk dari asam laktat melalui proses yang dikenal sebagai siklus Cori. Asam laktat dihasilkan selama aktivitas fisik intensif akibat metabolisme anaerob di otot, kemudian diangkut ke hati untuk diubah kembali menjadi glikogen atau glukosa .



Gambar 4.8. Jalur glikogenesis dan glikogenolisis (6)

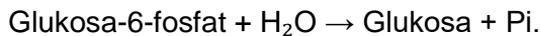
Sumber gambar: Diterjemahkan dari Tortora, 2020

b. Glikogenolisis

Glikogenolisis adalah proses pemecahan glikogen (bentuk simpanan glukosa di dalam tubuh) menjadi glukosa-1-fosfat dan akhirnya menjadi glukosa-6-fosfat. Proses ini terjadi untuk memenuhi kebutuhan energi tubuh ketika kadar glukosa darah menurun, seperti saat puasa atau aktivitas fisik. Glikogenolisis terjadi terutama di otot dan hati (6).

Di otot, glikogenolisis bertujuan untuk menyediakan energi selama aktivitas fisik. Glikogen dipecah menjadi glukosa-1-fosfat oleh enzim glikogen fosforilase. Selanjutnya, glukosa-1-fosfat diubah menjadi glukosa-6-fosfat melalui enzim fosfoglukomutase, lalu memasuki jalur glikolisis untuk membentuk piruvat. Jika kondisi anaerobik, piruvat akan diubah menjadi laktat untuk tetap memproduksi energi (2).

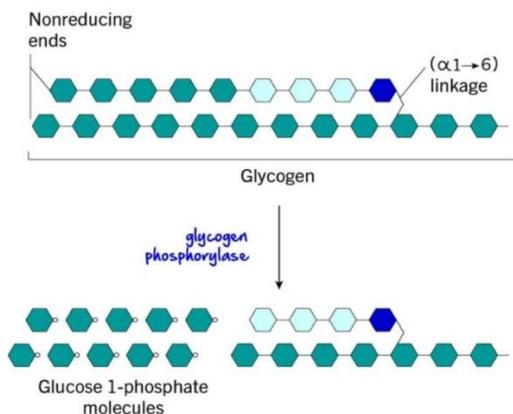
Di hati, glikogenolisis bertujuan mempertahankan kadar glukosa darah antara dua waktu makan. Glikogen dipecah menjadi glukosa-1-fosfat, kemudian menjadi glukosa-6-fosfat. Enzim glukosa-6-fosfatase mengubah glukosa-6-fosfat menjadi glukosa bebas yang dilepaskan ke darah untuk menjaga kadar glukosa darah tetap stabil (2,6). Reaksinya adalah sebagai berikut:



Berikut ini Langkah-langkah glikogenolisis (2–5)

1) Tahap 1: Pemecahan Ikatan α -1,4

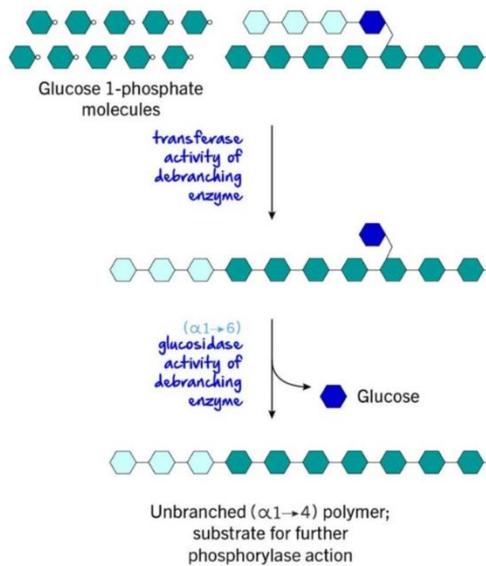
Enzim glikogen fosforilase memecah ikatan glikosidik α -1,4 pada rantai glikogen untuk melepaskan residu glukosa-1-fosfat dari ujung non-reduksi glikogen. Proses ini berlangsung dengan bantuan fosfat anorganik (Pi) sebagai donor fosfat.



2) Tahap 2: Pemecahan Ikatan α -1,6

Enzim debranching bekerja untuk memutus cabang glikogen dengan dua aktivitas: (1) Transferase, yaitu memindahkan tiga residu glukosa dari cabang ke rantai utama glikogen, (2) α -1,6-

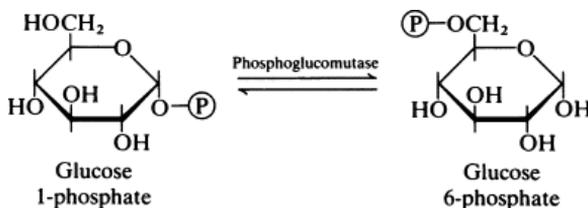
glukosidase, yaitu memecah ikatan α -1,6 pada titik cabang, sehingga menghasilkan satu molekul glukosa bebas.



Sumber gambar: <https://www.medschoolcoach.com/glycogen-structure-glycogenolysis-mcat-biochemistry/>

3) Tahap 3: Isomerisasi Glukosa-1-Fosfat

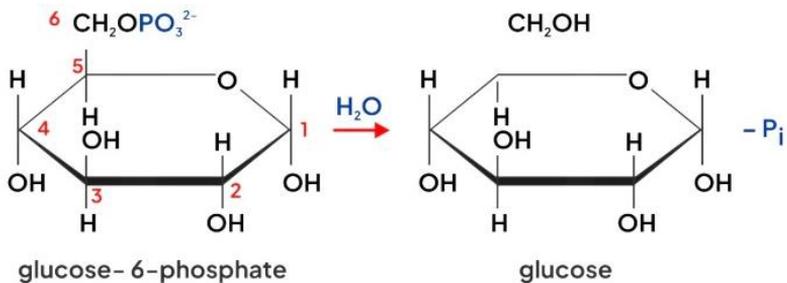
Enzim fosfoglukomutase mengubah glukosa-1-fosfat menjadi glukosa-6-fosfat. Perubahan ini penting karena glukosa-6-fosfat siap untuk memasuki jalur glikolisis atau dikonversi menjadi glukosa bebas di hati.



Sumber gambar: <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/glucose-1-phosphate>

4) Tahap 4: Hidrolisis Glukosa-6-Fosfat

Di hati, enzim glukosa-6-fosfatase mengubah glukosa-6-fosfat menjadi glukosa bebas.



Sumber ambar: <https://allen.in/neet/biology/gluconeogenesis>

c. Glukoneogenesis

Glukoneogenesis adalah proses pembentukan glukosa dari prekursor non-karbohidrat seperti laktat, gliserol, dan asam amino. Proses ini melibatkan serangkaian reaksi yang berlangsung terutama di hati dan ginjal (4,5).

Berikut adalah langkah-langkah glukoneogenesis (4,5):

1) Karboksilasi Piruvat

Proses dimulai dengan karboksilasi piruvat menjadi oksaloasetat di mitokondria. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim piruvat karboksilase, yang menggunakan ATP sebagai sumber energi dan biotin sebagai kofaktor. Reaksi ini memastikan piruvat dapat masuk ke jalur glukoneogenesis.

2) Dekarboksilasi Oksaloasetat dan Fosforilasi Ion Piruvat Enolat

Oksaloasetat diubah menjadi fosfoenolpiruvat (PEP) melalui dekarboksilasi dan fosforilasi oleh enzim fosfoenolpiruvat karboksikinase (PEPCK). Proses ini berlangsung di sitoplasma setelah oksaloasetat diangkut keluar dari mitokondria. GTP menyediakan energi untuk reaksi ini, yang juga menghasilkan pelepasan CO_2 .

- 3) Hidrasi Fosfoenolpiruvat
Fosfoenolpiruvat dihidrasi menjadi 2-fosfoglisarat oleh enzim enolase. Penambahan molekul air pada PEP menghasilkan molekul yang lebih stabil untuk langkah selanjutnya.
- 4) Isomerisasi 2-Fosfoglisarat
Enzim fosfoglisarat mutase mengkatalisasi isomerisasi 2-fosfoglisarat menjadi 3-fosfoglisarat. Perubahan ini mempersiapkan molekul untuk tahap fosforilasi berikutnya.
- 5) Fosforilasi 3-Fosfoglisarat
3-Fosfoglisarat difosforilasi menjadi 1,3-bisfosfoglisarat oleh enzim fosfoglisarat kinase dengan menggunakan ATP. Reaksi ini merupakan salah satu langkah yang membutuhkan energi tinggi dalam glukoneogenesis.
- 6) Reduksi Thioester
1,3-Bisfosfoglisarat direduksi menjadi gliseraldehid-3-fosfat oleh enzim gliseraldehid-3-fosfat dehidrogenase. Reaksi ini menggunakan NADH sebagai donor elektron dan menghasilkan molekul energi tinggi.
- 7) Tautomerisasi Gliseraldehid-3-Fosfat
Enzim ini mengatur molekul gliseraldehid-3-fosfat menjadi konfigurasi yang siap untuk reaksi kondensasi selanjutnya, menghasilkan molekul yang lebih stabil secara kimia.
- 8) Reaksi Aldol pada Dihidroksiaseton Fosfat
Gliseraldehid-3-fosfat bergabung dengan dihidroksiaseton fosfat (DHAP) untuk membentuk fruktosa-1,6-bisfosfat melalui reaksi aldol yang dikatalisis oleh enzim aldolase. Reaksi ini menghubungkan dua molekul kecil menjadi molekul yang lebih besar dalam jalur glukoneogenesis.
Hidrolisis Fruktosa-1,6-Bisfosfat
Fruktosa-1,6-bisfosfat dihidrolisis menjadi fruktosa-6-fosfat oleh enzim fruktosa-1,6-bisfosfatase. Langkah ini merupakan salah satu bypass penting yang mengatasi reaksi ireversibel

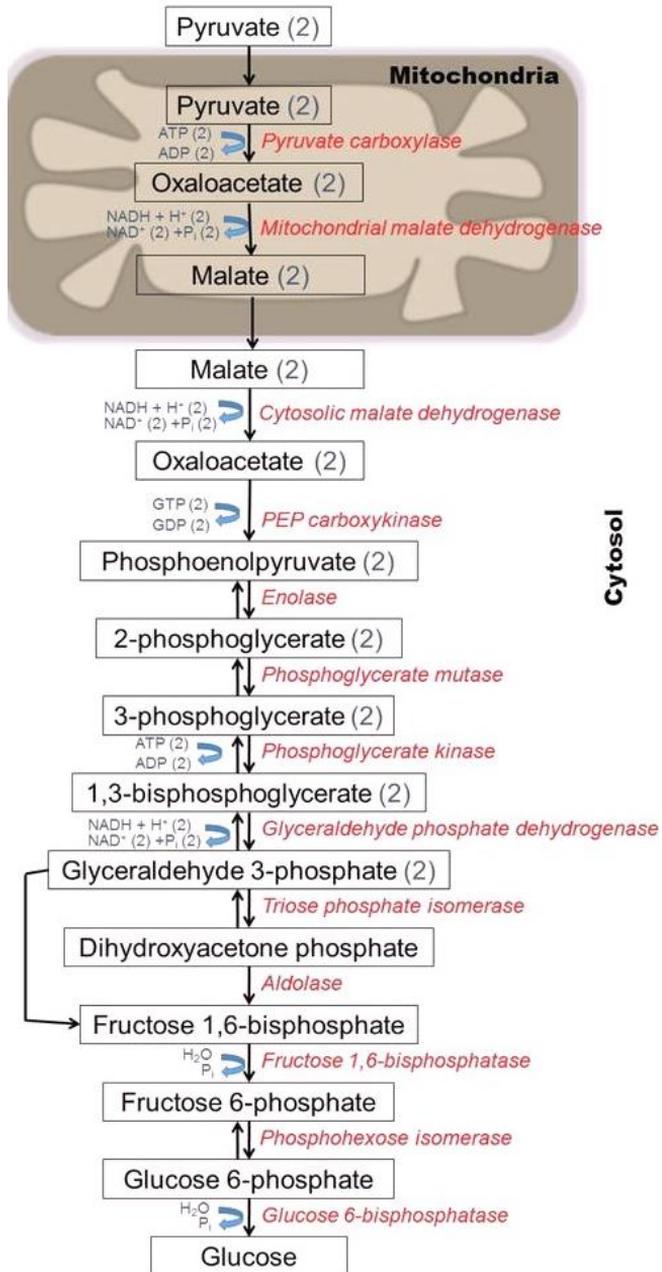
glikolisis. Reaksi ini diatur secara ketat oleh AMP dan fruktosa-2,6-bisfosfat.

9) Isomerisasi Fruktosa-6-Fosfat

Tahap **isomerisasi fruktosa-6-fosfat** melibatkan konversi fruktosa-6-fosfat menjadi glukosa-6-fosfat melalui enzim **fosfoheksoisomerase**. Proses ini melibatkan tautomerisasi gugus karbonil, di mana atom karbon pada posisi kedua berpindah ke atom karbon pertama, mengubah struktur molekul dari ketosa (fruktosa) menjadi aldosa (glukosa).

10) Hidrolisis Glukosa-6-Fosfat

Molekul glukosa-6-fosfat diubah menjadi glukosa bebas oleh enzim **glukosa-6-fosfatase**. Reaksi ini terjadi di hati dan ginjal, tetapi tidak di otot karena tidak memiliki enzim ini. Hidrolisis melibatkan pemutusan gugus fosfat dari glukosa-6-fosfat dengan menggunakan air (H_2O), menghasilkan glukosa bebas dan fosfat anorganik (Pi). Glukosa yang dihasilkan dilepaskan ke aliran darah untuk menjaga kadar gula darah tetap stabil, terutama selama kondisi puasa atau kekurangan karbohidrat.



Gambar 4.9. Tahapan Gluconeogenesis

Sumber gambar: <https://www.intechopen.com/chapters/53886>

4. Akibat Kelebihan dan Kekurangan Asupan Karbohidrat

1) Akibat Kelebihan Asupan Karbohidrat

a. Peningkatan berat badan

Konsumsi karbohidrat yang berlebihan dapat menyebabkan penambahan berat badan, karena kelebihan glukosa yang tidak digunakan segera sebagai energi akan disimpan dalam bentuk lemak. Hal ini meningkatkan risiko kegemukan/obesitas (9,10).

b. Gangguan sensitivitas insulin dan diabetes melitus tipe 2

Pola makan tinggi karbohidrat sederhana dan gula dapat menyebabkan resistensi insulin, di mana sel-sel tubuh tidak merespons insulin dengan baik. Ini dapat menyebabkan peningkatan kadar gula darah dan akhirnya diabetes melitus tipe 2 (11).

c. Penyakit jantung dan hipertensi

Diet tinggi karbohidrat olahan dan gula dapat berkontribusi pada peningkatan kadar trigliserida dalam darah, yang merupakan faktor risiko untuk penyakit jantung dan hipertensi (12).

d. Gangguan Pencernaan

Kelebihan karbohidrat, terutama yang rendah serat, dapat menyebabkan gangguan pencernaan seperti sembelit. Makanan tinggi serat membantu menjaga kesehatan saluran pencernaan (13).

e. Karies gigi

Karbohidrat jenis monosakarida dan disakarida bersifat kariogenik dibandingkan polisakarida. Karies gigi terjadi ketika karbohidrat yang dikonsumsi tetap berada di permukaan gigi dan diuraikan oleh bakteri dalam rongga mulut, terutama *Streptococcus mutans*. Proses ini

menghasilkan asam yang merusak enamel gigi dan menyebabkan lubang atau rongga pada gigi (14).

2) Akibat Kekurangan Asupan Karbohidrat

a. Gizi buruk

Kekurangan karbohidrat yang parah dapat menyebabkan kondisi kurang energi-protein seperti marasmus. Kondisi ini memaksa tubuh memecah cadangan lemak dan protein sebagai sumber energi alternatif, yang dapat mengakibatkan penurunan berat badan, kehilangan massa otot, dan kelemahan tubuh. Gizi buruk akibat kekurangan karbohidrat juga berisiko menyebabkan gangguan pertumbuhan pada anak-anak dan penurunan imunitas, sehingga tubuh lebih rentan terhadap infeksi dan penyakit (2,3).

b. Hipoglikemia

Kekurangan karbohidrat dapat menyebabkan kadar glukosa darah turun (hipoglikemia), sehingga tubuh kekurangan sumber energi utama. Gejala hipoglikemia meliputi lemas, pusing, keringat dingin, dan bahkan kehilangan kesadaran (2,3).

c. Ketosis

Ketika karbohidrat tidak mencukupi, tubuh menggunakan lemak sebagai sumber energi utama. Proses ini menghasilkan senyawa keton, yang jika berlebihan dapat menyebabkan ketosis. Ketosis dapat menyebabkan bau napas tidak sedap, mual, dan gangguan keseimbangan asam-basa tubuh (2,3).

5. Jumlah Karbohidrat yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AKG)

Tabel 4.2. Angka Kecukupan Karbohidrat yang Dianjurkan (Per Orang Per Hari) (15)

Kelompok Umur	AKG Karbohidrat (g/hari)	
0-5 bulan	59	
6-11 bulan	105	
1-3 tahun	215	
4-6 tahun	220	
7-9 tahun	250	
	Laki-laki	Perempuan
10-12 tahun	300	280
13-15 tahun	350	300
16-18 tahun	400	300
19-29 tahun	430	360
30-49 tahun	415	340
50-64 tahun	340	280
65-80 tahun	275	230
80+ tahun	235	200
Hamil trimester I		+25
Hamil trimester II		+40
Hamil trimester III		+40
Menyusui 6 bulan pertama		+45
Menyusui 6 bulan kedua		+55

6. Rangkuman

Karbohidrat adalah sumber energi utama bagi tubuh yang terbagi menjadi karbohidrat sederhana (monosakarida dan disakarida) dan kompleks (oligosakarida dan polisakarida). Monosakarida seperti glukosa, fruktosa, dan galaktosa merupakan unit gula

paling sederhana, sementara disakarida meliputi sukrosa, maltosa, dan laktosa. Karbohidrat kompleks mencakup oligosakarida seperti FOS dan GOS yang berperan sebagai prebiotik, serta polisakarida seperti pati, glikogen, dan serat.

Metabolisme karbohidrat melibatkan pencernaan di saluran cerna, mulai dari pemecahan di mulut hingga penyerapannya di usus halus, serta pemecahan lanjut melalui jalur glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, siklus asam sitrat, dan transfer elektron untuk menghasilkan energi (ATP). Selain itu, glikogenesis menyimpan kelebihan glukosa dalam bentuk glikogen, sedangkan glikogenolisis dan glukoneogenesis menjaga kadar glukosa darah saat tubuh membutuhkan energi.

Kekurangan karbohidrat dapat menyebabkan hipoglikemia, ketosis, hingga malnutrisi seperti marasmus, sementara kelebihan dapat memicu obesitas, resistensi insulin, dan gangguan kesehatan seperti karies gigi. Dengan demikian, konsumsi karbohidrat yang seimbang sesuai Angka Kecukupan Gizi (AKG) sangat penting untuk kesehatan tubuh secara optimal.

7. Latihan dan Jawaban

- 1) [Apa yang dimaksud dengan karbohidrat sederhana?](#)
 - A. Karbohidrat yang terdiri dari unit monosakarida dan disakarida yang mudah dicerna dan cepat diserap tubuh
 - B. Karbohidrat kompleks yang memerlukan waktu lama untuk dicerna dan diserap
 - C. Karbohidrat yang hanya terdapat pada tumbuhan
 - D. Karbohidrat yang terbentuk dari polimer glukosa dengan banyak cabang
 - E. Karbohidrat yang hanya terdapat pada hewan
- 2) [Enzim yang berperan dalam konversi glukosa menjadi glukosa-6-fosfat pada glikolisis adalah:](#)
 - A. Glukosa-6-fosfatase

- B. Heksokinase
 - C. Glikogen fosforilase
 - D. Aldolase
 - E. Amilase
- 3) Apa nama jalur metabolisme karbohidrat apabila glukosa di dalam tubuh berlebih sehingga perlu disimpan di dalam hati dan jaringan otot disebut...
- A. Glikogenolisis
 - B. Glikogenesis
 - C. Glikolisis
 - D. Glukoneogenesis
 - E. Salah semua
- 4) Selama proses glikolisis, glukosa diubah menjadi piruvat. Pada kondisi aerob, piruvat selanjutnya akan diubah menjadi:
- A. Asam laktat
 - B. Asetil-KoA
 - C. Glukosa
 - D. Fruktosa
 - E. Glikogen
- 5) Di rongga mulut, karbohidrat mengalami pencernaan awal oleh enzim amilase (ptialin). Enzim ini mengubah pati menjadi:
- A. Glukosa
 - B. Maltosa
 - C. Laktosa
 - D. Sukrosa
 - E. Galaktosa
- 6) Berapa jumlah ATP bersih yang dihasilkan dari satu molekul glukosa dalam kondisi aerobik?
- A. 30 ATP
 - B. 32 ATP

- C. 34 ATP
 - D. 36 ATP
 - E. 38 ATP
- 7) Pada glukoneogenesis, prekursor utama yang digunakan untuk membentuk glukosa adalah:
- A. Gliserol, laktat, dan asam amino glukogenik
 - B. Fruktosa, galaktosa, dan glikogen
 - C. Laktat, glukosa-6-fosfat, dan oksaloasetat
 - D. Glukosa-1-fosfat, fruktosa-6-fosfat, dan malat
 - E. Glikogen, fruktosa-1,6-bisfosfat, dan gliserol
- 8) Selama latihan intensitas tinggi, seorang atlet merasa kelelahan lebih cepat dari biasanya dan mengalami sensasi terbakar pada ototnya. Hal ini diduga terjadi karena tubuhnya kekurangan oksigen sehingga metabolisme glukosa berjalan secara anaerob. Akibatnya, proses glikolisis menghasilkan produk yang berbeda dari kondisi aerob. Dalam kondisi anaerob seperti pada kasus di atas, piruvat hasil dari glikolisis akan diubah menjadi:
- A. Glikogen
 - B. Glukosa
 - C. Asam laktat
 - D. Asetil-KoA
 - E. Asam sitrat
- 9) Siklus Asam Sitrat (Siklus Krebs) merupakan tahap lanjutan dalam metabolisme karbohidrat yang berlangsung di mitokondria. Hasil utama dari proses ini yang penting untuk menghasilkan energi bagi sel adalah:
- A. Glukosa, NADH, dan CO₂
 - B. ATP, H₂O, dan CO₂
 - C. Asam laktat, ATP, dan H₂O
 - D. Piruvat, FADH₂, dan O₂

- E. NADH, FADH₂, dan glukosa
- 10) Selama puasa atau asupan karbohidrat yang rendah, tubuh mengandalkan jalur alternatif untuk menghasilkan glukosa demi menjaga kadar gula darah. Jalur metabolisme manakah yang terutama bertanggung jawab untuk menghasilkan glukosa dari sumber non-karbohidrat seperti asam amino dan gliserol?
- A. Glikolisis
 - B. Glikogenesis
 - C. Glikogenolisis
 - D. Glukoneogenesis
 - E. Lipogenesis

Kunci Jawaban:

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

8. Daftar Pustaka

1. Smith AS, Collene AL. Wardlaw's Contemporary Nutrition. 10th ed. New York: McGraw-Hill eDUCATION; 2016.
2. Gropper SS, Smith JL, Carr TP. Advanced Nutrition and Human Metabolism. 8th ed. New York: Cengage Learning; 2022.
3. Whitney E, Rolfes SR. Understanding Nutrition. 15th ed. New York: Cengage Learning; 2019.
4. Kennelly PJ, Botham KM, McGuinness OP, Ridwell VW, Weil A. Harper's Illustrated Biochemistry. 30th ed. New York: McGraw-Hill; 2023.
5. Sartika RAD, Firdauzy NA. Gizi Makro dan Implikasinya Terhadap Kesehatan. Depok: PT Raja Grafindo Persada; 2023.
6. Tortora GJ, Derrickson B. Principles of Anatomy and Physiology 12th ed. 16th ed. Vol. 24, Biosystems and Biorobotics. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc; 2020.
7. Allen LH, Prentice A, Caballero B. Encyclopedia of Human Nutrition. 3rd ed. New York: Elsevier; 2013.
8. Martini FH, Nath JL, Bartholomew EF. Fundamentals of

- Anatomy and Physiology. 10th ed. Pearson Education, editor. New York; 2015.
9. Rathnayake KM, Roopasingam T, Dibley MJ. High Carbohydrate Diet and Physical Inactivity Associated with Central Obesity Among Premenopausal Housewives in Sri Lanka. *BMC Res Notes*. 2014;7(564):1–7.
 10. Aller EEJG, Abete I, Astrup A, Martinez JA, Baak MA Van. Starches, Sugars and Obesity. *Nutrients*. 2011;3(3):341–69.
 11. Sakurai M, Nakamura K, Miura K, Takamura T, Yoshita K, Nagasawa S, et al. Dietary Carbohydrate Intake , Presence of Obesity and The Incident Risk of Type 2 Diabetes in Japanese Men. *J Diabetes Investig*. 2016;7(3):343–51.
 12. Clar C, Loveman E, Sam K, Hartley L, Flowers N, Germanò R, et al. Low Glycaemic Index Diets for The Prevention of Cardiovascular Disease (Review). *Cochrane Database Syst Rev*. 2017;31(7).
 13. Liu Q, Kang Y, Yan J. Association Between Overall Dietary Quality and Constipation in American Adults : a Cross-Sectional Study. *BMC Public Health*. 2022;22(1971):1–10.
 14. Palacios C, Rivas-Tumanyan S, Morou-Bermúdez E, Colón AM, Torres RY, Elías-Boneta AR. Association Between Type, Amount and Pattern of Carbohydrate Consumption with Dental Caries in 12-year-olds in Puerto Rico. *Caries Res*. 2017;50(6):560–70.
 15. Kementerian Kesehatan RI. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No 28 Tahun tentang Angka Kecukupan Gizi yang Dianjurkan Bagi Masyarakat Indonesia. 2019.

Tujuan Instruksional Khusus

Setelah mengikuti bab ini diharapkan mahasiswa mampu:

1. Mampu memahami dan menjelaskan pengertian lemak dan asam lemak
2. Mampu memahami dan menjelaskan Struktur dan Penamaan Asam Lemak
3. Mampu memahami dan menjelaskan jenis asam lemak
4. Mampu memahami dan menjelaskan fungsi asam lemak
5. Mampu memahami dan menjelaskan akibat kelebihan dan kekurangan asam lemak
6. Mampu memahami dan menjelaskan jumlah asam lemak yang dibutuhkan dalam tubuh (RDA/AKG)
7. Mampu memahami dan menjelaskan transport dan absorpsi asam lemak
8. Mampu memahami dan menjelaskan biosintesis asam lemak
9. Mampu memahami dan menjelaskan tahapan oksidasi asam lemak
10. Mampu memahami dan menjelaskan pembentukan keton bodies
11. Mampu memahami dan menjelaskan bahaya keton bodies yang berlebih

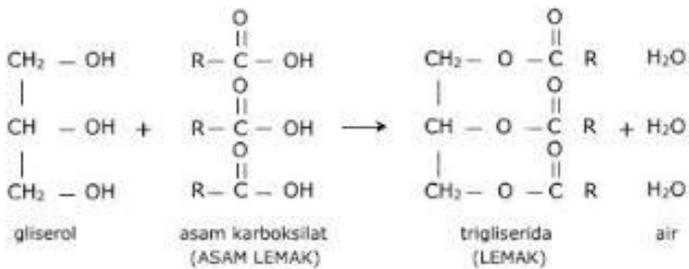
1. Pengertian Lemak dan Asam Lemak

Lemak merupakan salah satu zat gizi yang termasuk ke dalam golongan lipida. Di dalam ilmu gizi, sebenarnya dikenal senyawa

lipida lain selain lemak, seperti minyak yang dibedakan dengan lemak karena wujudnya dalam bentuk cair pada suhu ruang (1). Lemak dan minyak sering digunakan pada produk pangan karena fungsinya yang dapat memberikan kontribusi kalori yang tinggi sebesar 9 kalori per gramnya dan memberikan rasa enak pada makanan. Selain itu, dikenal pula senyawa steroid, lilin, fosfolipida, sterol, dan senyawa turunan lemak lainnya yang memiliki banyak peran dalam fungsi biologi.

Senyawa ini bersifat tidak larut air, namun larut dalam pelarut organik seperti eter dan kloroform. Lemak dan minyak memiliki sifat fisikokimia yang unik, yang tergantung dari jenis dan jumlah asam lemak penyusunnya, panjang pendeknya asam lemak, ketidakterjenuhannya, serta kombinasinya dengan senyawa non-lemak lainnya. Asam lemak juga memiliki sifat mudah teroksidasi, terutama asam lemak tidak jenuh. Makin banyak ikatan rangkap pada asam lemak tidak jenuh, makin mudah asam lemak teroksidasi.

Lemak dan minyak terutama disusun oleh atom karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O). Lemak dan minyak disusun dari satu molekul gliserol dan tiga molekul asam lemak. Adapun reaksi pembentukan lemak dari asam lemak dan gliserol dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 5.1. Reaksi pembentukan lemak dari asam lemak dan gliserol

Ketiga asam lemak yang menyusun lemak dapat menyebabkan perbedaan jenis dan sifat lemak yang disusunnya. Jika ketiga asam lemak sama jenisnya, maka digolongkan sebagai lemak atau trigliserida sederhana, namun jika salah satu atau lebih dari asam lemak yang menyusun berbeda, maka digolongkan sebagai lemak atau trigliserida campuran (*mixed triglyceride*).

Trigliserida atau lemak dapat terbentuk jika 3 molekul asam lemak berkondensasi dengan gliserol. Jika yang terlibat dalam proses kondensasi adalah 2 molekul asam lemak, maka terbentuk senyawa digliserida dan terbentuk monogliserida jika hanya satu molekul asam lemak yang berkondensasi dengan gliserol. Sementara itu, jika asam lemak tidak berikatan dengan senyawa apapun disebut asam lemak bebas. Trigliserida, digliserida, dan monogliserida ini termasuk ke dalam lipid sederhana, karena hanya mengandung dua komponen utama yaitu asam lemak dan alkohol. Termasuk ke dalam kelompok lipid sederhana lainnya yaitu *waxes* yang merupakan ester dari asam lemak dengan alkohol berantai panjang.

Lipida kompleks atau *compound lipids* merupakan golongan lipida yang tidak hanya mengandung lipida sederhana, namun juga mengandung senyawa lain seperti karbohidrat pada glikolipida, protein pada lipoprotein, fosfat pada fosfolipida (asam fosfatidat, plasmalogen, dan sfingomielin). Golongan lipida lain yang tersedia di alam yaitu lipida turunan (*derived lipid*) yang terbentuk dari pemecahan atau hidrolisis lipida kompleks atau lipida sederhana yang masih memiliki sifat-sifat lipida, contohnya: sterol, vitamin a, D, E, K, karotenoid, serta asam lemak, monogliserida, dan digliserida.

Lipida berdasarkan sumbernya juga dapat digolongkan menjadi lipida hewani dan lipida nabati (2). Pada umumnya,

golongan lipida hewani berbentuk padat, misalnya gajih atau lemak sapi, dan lemak babi. Sementara itu, lipida nabati biasanya berbentuk cair, seperti minyak zaitun, minyak kelapa, minyak inti kelapa sawit, dan masih banyak lagi contoh lainnya. Di antara golongan lipida hewani, terdapat anomaly pada minyak ikan yang berbentuk cair dan di antara golongan lipida nabati, ada juga yang berbentuk padat, contohnya adalah lemak coklat.

Berdasarkan wujudnya, lemak dibagi menjadi lemak tidak terlihat (*invisible fat*) dan lemak terlihat (*visible fat*). Lemak tidak terlihat ditemukan pada lemak yang dimakan Bersama dengan makanan, misalnya lemak pada buah alpukat, gorengan, pizza, dan lain-lain. Lain halnya lemak terlihat digunakan untuk menamai lemak yang berasal dari ekstraksi atau lemak dalam bentuk aslinya, seperti minyak kelapa, minyak goreng, dll.

2. Struktur dan Penamaan Asam Lemak

a. Struktur Asam Lemak

Asam lemak termasuk ke dalam senyawa asam karboksilat yang disusun atas rantai hidrokarbon dan gugus karboksil. Rantai hidrokarbon merupakan serangkaian atom C yang saling terikat, bisa dihubungkan dengan ikatan kovalen tunggal maupun ikatan kovalen rangkap dengan panjang rantai antara 4-36 atom karbon (C_4-C_{36}) (3). Rantai hidrokarbon ini bersifat hidrofobik, sementara gugus karboksil bersifat hidrofilik. Rantai karbon juga seringkali digambarkan dengan garis zig zag dengan atom C yang berada di titik-titik sudut struktur.

Pada rantai atom C di ujung rantai hidrokarbon biasanya sering disebut sebagai ujung metil, sementara ujung yang terdapat gugus karboksil ($-COOH$) disebut sebagai ujung karboksil. Gugus karboksil ini yang akan menjadikan senyawa bersifat asam atau penciri dari senyawa asam karboksilat. Struktur asam lemak secara detil dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 5.2. Struktur asam lemak jenuh (a) dan gambaran zigzag asam lemak (b)

b. Penamaan Asam Lemak

(i) Sistem *International Union Of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC)

Penamaan system IUPAC ini didasarkan atas aturan sistematis berdasarkan rumus kimianya, mencakup jumlah karbon dalam rantai utamanya dan posisi ikatan rangkapnya dilihat dari ujung karboksil. Langkah penamaan system IUPAC sebagai berikut:

- Untuk asam lemak jenuh, penamaan disamakan dengan golongan senyawa asam karboksilat yaitu diawali dengan kata:

“asam + nama hidrokarbon (alkana, sesuai dengan panjang atom karbon)+oat”

Contoh: untuk asam lemak dengan panjang karbon 4 tanpa ikatan rangkap diberi nama asam butanoat, jika panjang atom karbon 6 dinamakan asam heksanoat, dst.

- Untuk asam lemak yang memiliki ikatan rangkap tunggal, maka penamaannya:

“asam+posisi ikatan rangkap+nama hidrokarbon (sesuai panjang atom karbon)+oat”

Contoh: asam lemak dengan panjang atom karbon 18 dengan ikatan rangkap di nomor 9 dihitung dari ujung

karboksilat, maka penamaannya menjadi asam 9-oktadekanoat.

- Untuk asam lemak yang memiliki ikatan rangkap ganda, maka penamaan mirip dengan asam lemak ikatan rangkap tunggal dengan penambahan jumlah ikatan rangkap sebelum enoat, missal dua ikatan rangkap ditambah di-, tiga ditambah tri, empat tetra-, dst. Adapun rumus penamaannya sbb:

“asam+posisi ikatan rangkap+nama hidrokarbon (sesuai panjang atom karbon)+jumlah ikatan rangkap+oat”

Contoh: **asam** lemak dengan panjang atom karbon 18 dengan ikatan rangkap di nomor 9 dan 12 dihitung dari ujung karboksilat, maka penamaannya menjadi asam 9,12-oktadekadienoat.

Secara lebih rinci, penamaan asam lemak dapat dilihat pada Tabel 4.1.

(ii) Sistem penamaan umum

Sistem penamaan umum asam lemak mengacu pada penamaan tradisional atau lebih dikenal dalam kehidupan sehari-hari. Biasanya penamaan lebih pendek. Adapun penamaan umum asam lemak dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 5.1. Penamaan Asam Lemak Menurut *International Union Of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)* dan Nama Umum

Jumlah atom karbon	Jumlah ikatan rangkap	Nama <i>International Union Of Pure and Applied Chemistry</i> (IUPAC)	Nama Umum
4	0	Asam butanoat	Asam butirat
6	0	Asam heksanoat	Asam kaproat
8	0	Asam oktanoat	Asam kaprilat
10	0	Asam dekanoat	Asam kaprat
12	0	Asam dodekanoat	Asam laurat
14	0	Asam tetradekanoat	Asam miristat
16	0	Asam heksadekanoat	Asam palmitat
16	1	Asam heksadekanoat	9-Asam palmitoleate
18	0	Asam oktadekanoat	Asam stearate
18	1	Asam oktadekanoat	9-Asam oleat
18	1	12-hidroksi-9-oktadekanoat	Asam ricinoelat
18	1	Asam oktadekanoat	11-Asam vaksenat

18	2	Asam 9,12- oktadekadienoat	Asam linoleate
18	3	Asam 9,12,15 oktadekatrienoat	Asam alfa linoleate (ALA)
18	3	Asam 6,9,12 oktadekatrienoat	Asam gama linolenat (GLA)
20	0	Asam eikosanoat	Asam arakidat
20	1	Asam 9-eikosanoat	Asam gadoleat
20	4	Asam 5,8,11,14- eikosatetraenoat	Asam arakidonat (AA)
20	5	Asam 5,8,11,14- eikosatetraenoat	EPA
22	0	Asam dokosanoat	Asam behenate
22	1	Asam 13- dokosanoat	Asam erukat
22	6	Asam 4,7,10,13,16,19 dokosaheksaenoat	DHA
24	0	Asam tetraekosanoat	Asam licnocerat

(iii) Sistem penamaan delta (Δ)

Sistem penamaan didasarkan atas panjang senyawa hidrokarbon, jumlah ikatan rangkap, dan posisi ikatan

rangkap yang dihitung dari ujung karboksilat. Adapun rumus penamaan system ini adalah:

“Asam+cis/trans+ Δ +posisi ikatan rangkap dihitung dari ujung karboksilat+panjang hidrokarbon+oat”

Contoh: Asam cis,cis Δ -9,12-oktadekadienoat (asam linoleat)

(iv) Sistem penamaan n-minus

Sistem penamaan n-minus ini diawali dengan menuliskan panjang hidrokarbon, jumlah ikatan rangkap, dan letak ikatan rangkap dari ujung metil. Adapun rumus penamaan system ini sbb:

“panjang hidrokarbon:jumlah ikatan rangkap+n+-angka (letak ikatan rangkap dari sisi metil)”

Contoh: 18:2(n-6)

(v) Sistem penamaan omega (ω)

Sistem penamaan omega seringkali disebut dalam produk-produk komersial. Cara penamaan mirip dengan system n, namun huruf n diganti dengan ω . Adapun rumus penamaan system sbb:

“panjang hidrokarbon:jumlah ikatan rangkap+ ω +-angka (letak ikatan rangkap dari sisi metil)”

Contoh: 18:2(ω -6)

3. Jenis Asam Lemak

Asam lemak berdasarkan panjang rantainya dibagi menjadi:

- 1) Asam lemak rantai pendek (*short chain fatty acids*) yang memiliki panjang rantai karbon 3-7, contohnya: asam butirat pada *butter fat*.
- 2) Asam lemak rantai sedang (*medium chain fatty acids*) yang memiliki panjang rantai karbon 8-13, contohnya: asam

kaprilat dan kaproat pada minyak kelapa dan asam linoleat pada minyak inti sawit.

- 3) Asam lemak rantai panjang (*long chain fatty acids*) yang memiliki panjang rantai karbon 14-20, contohnya: minyak kelapa, asam palmitoleate pada lemak hewani, asam linoleate pada minyak biji anggur, asam alfa linolenat pada minyak biji rami, dan asam gadoleat, asam milonelat dari minyak ikan, asam arakidonat (AA) dari lemak hati, dan lain-lain.
- 4) Asam lemak rantai sangat panjang (*very long chain fatty acids*) yang memiliki panjang rantai hidrokarbon > 20, contohnya: asam dokosaheksanoat (DHA) pada minyak ikan, asam behenate dan erukat pada minyak lobak.

Asam lemak berdasarkan derajat kejenuhannya dibagi menjadi:

- 1) Asam lemak jenuh (*saturated fatty acid*), merupakan asam lemak yang ikatan atom karbonnya semua merupakan ikatan kovalen tunggal, tidak ada yang berikatan rangkap. Asam lemak jenuh ini banyak di alam dengan panjang rantai karbon 12-22, contoh asam palmitat dan asam stearate dalam gajih dau lemak hewani dan minyak kelapa.
- 2) Asam lemak tak jenuh tunggal (*monounsaturated fatty acid* atau MUFA), merupakan asam lemak yang memiliki satu ikatan kovalen ganda atau rangkap antar atom karbonnya. Asam lemak ini banyak ditemukan pada pada asam lemak dengan panjang rantai karbon 16-22, contoh asam oleat dari minyak zaitun dan buah alpukat.
- 3) Asam lemak tak jenuh ganda (*polyunsaturated fatty acid* atau PUFA), merupakan asam lemak yang memiliki ikatan kovalen rangkap 2 atau lebih. Asam lemak ini banyak ditemukan di alam pada tanaman dan fitoplankton. Hal ini disebabkan adanya enzim desaturase yang bertugas membentuk ikatan

rangkap yang hanya dimiliki oleh tanaman, bukan hewan. Asam lemak ini seringkali juga ditemukan pada hewan seperti asam linoleate (omega-9) yang disebabkan konsumsi makanan yang tinggi PUFA, asam arakidonat (omega-6) terutama di bagian membrane fosfolipid hewan, asam eikosapentanoat (EPA) yang banyak ditemukan pada alga serta lemak dan minyak ikan.

4. Fungsi Asam Lemak

Asam lemak memiliki banyak fungsi bagi tubuh, antara lain (1):

- 1) Sebagai sumber energi yang tinggi, yaitu mencapai 37 kJ/g lemak.
- 2) Sebagai bentuk energi yang bisa dipindahkan/didistribusikan, seperti: trigliserida, kolesterol yang dipindahkan oleh lipoprotein.
- 3) Sebagai bentuk simpanan energi, seperti di dalam jaringan adiposa dan otot kerangka.
- 4) Komponen dari membrane sel, yaitu fosfolipid.
- 5) Dapat berperan dalam insulasi, disebabkan lemak disimpan di bawah kulit, sehingga dapat melindungi tubuh dari suhu lingkungan yang rendah (pengahangat), melindungi dari bahaya elektrik, dan mekanis.
- 6) Dapat berperan sebagai signal terutama pada proses transkripsi (regulasi gen), contohnya eikosanoid.
- 7) Pengatur hormon reproduksi seperti estrogen dan testoteron.
- 8) Menjaga kesehatan kulit dengan menjaga agar kulit tetap lembab dan mencegah dari dehidrasi yang dipengaruhi oleh adanya lapisan lemak di bawah kulit.
- 9) Lemak berperan dalam penyerapan vitamin A, D, E, dan K.
- 10) Lemak tak jenuh tunggal yang terdapat di dalam beberapa buah seperti alpukat dan ikan dapat menjaga keseimbangan

kadar kolesterol dalam darah, sehingga berpengaruh terhadap kesehatan jantung.

5. Akibat Kelebihan dan Kekurangan Asam Lemak

Peran lemak telah diuraikan pada sub bab 4. Jika tubuh mengalami kekurangan lemak, akan timbul masalah-kesehatan, antara lain:

- 1) Kekurangan lemak mengurangi asupan energi. Pada anak dengan status gizi kurang, kurangnya asupan lemak menyebabkan kebutuhan energi untuk tumbuh tidak tercukupi. Hal ini dapat berakibat pada berat badan yang rendah, tinggi badan tidak sesuai usia, dan dapat mengalami gangguan perkembangan fisik.
- 2) Lipoprotein berperan sebagai pendistribusi lemak melalui aliran darah di dalam tubuh. Kekurangan lipoprotein dapat menyebabkan gangguan keseimbangan lemak di dalam tubuh, sehingga beberapa organ penting tidak cukup mendapat asupan lemak.
- 3) Kekurangan lemak di jaringan adiposa dan otot dapat mengurangi simpanan lemak di bawah jaringan kulit (subkutan), sehingga perannya sebagai penghangat badan, serta penyimpan energi dan metabolisme otot menjadi berkurang.
- 4) Kurangnya asupan lemak dapat mengurangi pembentukan fosfolipid yang merupakan bahan dasar dari membran sel, sehingga bisa memengaruhi kinerja sel. Jika sel tersebut terdapat di otak, dapat mengurangi daya ingat dan konsentrasi.
- 5) Lemak jenis eikosanoid berperan dalam pembentukan senyawa prostaglandin, leukotrien, tromboksan, dan lipoksin. Senyawa tersebut berperan dalam transkripsi gen yang berkaitan dengan peradangan.

- 6) Kinerja hormon yang tidak seimbang, sehingga dapat berpengaruh terhadap siklus menstruasi, kesuburan, dan kesehatan reproduksi.
- 7) Lemak tubuh di bawah kulit mengandung enzim aromatase yang dapat mengubah hormon androgen menjadi estrogen. Kekurangan hormon ini menyebabkan tingkat kesuburan berkurang.
- 8) Kekurangan lemak di bawah kulit dapat mengurangi kelembaban kulit, sehingga kulit menjadi kasar, kering, dan rentan terhadap iritasi.
- 9) Kurangnya lemak dapat mengurangi tingkat penyerapan vitamin A, D, E, dan K, sehingga dapat berakibat lebih jauh terhadap defisiensi vitamin.
- 10) Konsumsi lemak jenuh yang tinggi dan lemak tak jenuh yang rendah dapat berakibat pada ketidakseimbangan komposisi lemak di dalam darah yang mengakibatkan penumpukan lemak di jantung.

Kekurangan lemak dapat menimbulkan risiko kesehatan. Namun demikian, kelebihan konsumsi lemak juga dapat menimbulkan gangguan kesehatan. Gangguan-gangguan tersebut dijelaskan sebagai berikut.

- a. Obesitas atau kegemukan dapat terjadi karena kelebihan konsumsi lemak akan mengakibatkan kalori yang berlebih. Kalori yang tidak habis digunakan untuk energi akan disimpan dalam jaringan lemak. Makin banyak tumpukan lemak berakibat pada obesitas atau kegemukan.
- b. Lemak jenuh dan lemak trans yang dikonsumsi dalam jumlah berlebih dapat menyebabkan kadar kolesterol jahat (*LDL/low density lipoprotein*) meningkat dan berisiko terhadap penumpukan plak di bagian jantung.

- c. Penumpukan lemak juga dapat terjadi di bagian hati yang dikenal dengan penyakit hati berlemak non-alkohol. Penyakit ini lama kelamaan dapat menyebabkan steatohepatitis dan sirosis hati.
- d. Peradangan kronis juga dapat terjadi di dalam tubuh yang mengganggu metabolisme lemak. Gangguan metabolisme lemak ini dapat berakibat pada terjadinya resistensi insulin, sehingga berisiko terhadap diabetes mellitus.
- e. Adanya lemak di dalam tubuh mampu menstimulasi empedu untuk menghasilkan garam-garam empedu untuk membantu proses pencernaan lemak, yaitu proses emulsifikasi lemak. Jika lemak atau kolesterol yang masuk ke dalam saluran cerna lebih banyak dibanding garam empedu yang dihasilkan, maka kolesterol yang berlebih dapat mengendap dan lama-lama mengeras membentuk batu empedu.

6. Jumlah Asam Lemak yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK)

Angka kecukupan gizi untuk lemak diatur dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 28 tahun 2019 tentang angka kecukupan gizi (AGK) yang dianjurkan untuk Masyarakat Indonesia (4). Lemak yang dicantumkan tersebut berbentuk lemak total, asam lemak omega 3, dan asam lemak omega 6. Adapun ringkasan angka kecukupan gizi untuk ketiga senyawa tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 5.2. Angka Kecukupan Lemak untuk Lemak Total, Omega 3, dan Omega 6 yang Dianjurkan (Per Orang Per Hari)

Kelompok umur	Berat badan (kg)	Tinggi badan	Lemak total (g)	Omega 3 (g)	Omega 6 (g)
---------------	------------------	--------------	-----------------	-------------	-------------

		n			
		(cm)			
Bayi/anak					
0-5 bulan	6	60	31	0,5	4,4
6-11	9	72	35	0,5	4,4
bulan	13	92	45	0,7	7
1-3	19	113	50	0,9	10
tahun	27	130	55	0,9	10
4-6					
tahun					
7-9					
tahun					
Laki-laki					
10-12	36	145	65	1,2	12
tahun	50	163	80	1,6	16
13-15	60	168	85	1,6	16
tahun	60	168	75	1,6	17
16-18	60	166	70	1,6	17
tahun	60	166	60	1,6	14
19-29	58	164	50	1,6	14
tahun	58	164	45	1,6	14
30-49					
tahun					
50-64					
tahun					
65-80					
tahun					

80+					
tahun					
Perempuan					
10-12	38	147	65	1,0	10
tahun	48	156	70	1,1	11
13-15	52	159	70	1,1	11
tahun	55	159	65	1,1	12
16-18	56	158	60	1,1	12
tahun	56	158	50	1,1	11
19-29	53	157	45	1,1	11
tahun	53	157	40	1,1	11
30-49					
tahun					
50-64					
tahun					
65-80					
tahun					
80+					
tahun					
Hamil					
(tambahan)			+2,3	+0,3	+2
Trimester 1			+2,3	+0,3	+2
Trimester 2			+2,3	+0,3	+2
Trimester 3					
Menyusui					
(tambahan)			+2,2	+0,2	+2

6 bulan pertama	+2,2	+0,2	+2
6 bulan kedua			

7. Transport dan Absorpsi Asam Lemak

Proses pencernaan lemak di saluran cerna dimulai dari usus halus. Hal ini disebabkan di bagian mulut dan lambung tidak ada enzim lipase yang dapat mencerna lemak. Selain itu, lemak tidak bisa dicerna karena tidak dapat larut dalam air, sementara lipase merupakan enzim yang bersifat larut air.

Lemak yang masuk ke usus halus kemudian akan diemulsifikasi oleh garam-garam empedu yang dihasilkan oleh organ empedu. Proses emulsifikasi ini berguna untuk pembentukan misel lemak yang dapat larut di dalam air. Bentuk misel ini memungkinkan lemak untuk dihidrolisis oleh enzim lipase usus sehingga membentuk asam lemak bebas dan molekul gliserida yang lebih kecil, seperti digliserida atau monogliserida. Dengan pengecilan ukuran ini, asam lemak dan gliserida dapat melewati mukosa intestinal/usus dengan mudah. Setelah melewati mukosa usus halus, asam lemak bebas dan gliserida tadi akan disintesis menjadi trigliserida kembali dan diikorporasi dengan kolesterol dan lipoprotein membentuk kilomikron. Kilomikron ini merupakan bentuk lipoprotein yang dapat didistribusikan ke sel dan jaringan melalui sistem limfatik dan aliran darah. Kilomikron kemudian dapat menuju sel setelah dihidrolisis menjadi asam lemak bebas oleh lipoprotein lipase. Asam lemak bebas inilah yang kemudian dapat digunakan oleh jaringan untuk proses oksidasi asam lemak dan menghasilkan energi. Jika asam lemak bebas tersebut berlebih dan tidak

dioksidasi menjadi energi, maka disimpan dalam bentuk jaringan adiposa di dalam sel.

Komposisi lemak di dalam kilomikron sangat tinggi, sehingga densitasnya sangat rendah. Setelah proses hidrolisis, asam lemak bebas yang dilepas menyebabkan densitas lemak meningkat pada lipoprotein tersebut. Lipoprotein yang sudah kehilangan sebagian asam lemak bebas sehingga densitasnya meningkat disebut dengan *very low-density lipoprotein (VLDL)*. Jika VLDL dihidrolisis lagi sehingga asam lemak bebasnya berkurang lagi, maka densitas meningkat dan lipoprotein disebut dengan nama *low density lipoprotein (LDL)*, kemudian LDL yang berkurang lagi asam lemak bebasnya akan membentuk lipoprotein HDL (*high density-lipoprotein*).

Dalam pencernaan lemak dan asam lemak, terlibat beberapa hormon di antaranya hormon sekretin pankreozimin yang memacu keluarnya cairan pankreas, yaitu cairan yang mengandung lipase pancreas. Selain itu, terdapat juga hormon kolesistokinin yang menyebabkan keluarnya cairan empedu yang mengandung garam-garam empedu. Hormon ini dirangsang oleh keberadaan lemak dari makanan di usus halus.

8. Biosintesis Asam Lemak

Biosintesis asam lemak merupakan proses pembentukan asam lemak di dalam sitoplasma hati yang disintesis oleh enzim asam lemak sintase. Sintesis dimulai dari ujung metil dengan cara memanjangkan asetil-KoA (jumlah 2 atom karbon) paling ujung atau nomor paling akhir dari senyawa asam lemak yang dibentuk, kemudian diperpanjang dengan tambahan 2 atom karbon tiap siklus. Perpanjangan 2 atom karbon ini didapatkan dari senyawa malonil-KoA yang memiliki 3 atom karbon.

Secara lebih rinci, proses biosintesis asam lemak dijelaskan sebagai berikut (3).

a. Biosintesis malonil-KoA

Malonil-KoA merupakan senyawa yang memiliki 3 atom karbon sebagai bahan antara yang digunakan untuk memanjangkan asetil-KoA. Asetil-KoA berperan sebagai bahan dasar untuk proses biosintesis asam lemak. Bahan baku untuk biosintesis malonil-KoA sendiri adalah asetil-KoA. Pada awalnya, asetil-KoA yang banyak terdapat di mitokondria dipindahkan ke sitoplasma hati, yaitu tempat terjadinya proses biosintesis malonil-KoA. Proses pemindahan asetil-KoA harus melalui 2 lapis membran, yaitu membran dalam dan membran luar. Untuk dapat melewati membran ini, asetil perlu diubah ke dalam bentuk aktif sitrat yang dikatalisis oleh enzim sitrat sintase. Sitrat yang telah melalui membrane luar kemudian akan dikembalikan ke bentuk asetil-KoA dengan membutuhkan energi sebanyak 1 ATP.

Asetil-KoA yang telah sampai di sitoplasma kemudian dikarboksilasi atau penambahan 1 atom karbon menjadi malonil-KoA dengan bantuan senyawa enzim asetil-KoA karboksilase dengan koenzim biotin dan memerlukan energi sebesar 1 ATP. Satu atom karbon yang digunakan untuk perpanjangan diperoleh dari senyawa asam karbonat (HCO_3) atau CO_2 .

b. Biosintesis asam palmitat

Proses pemanjangan asetil-KoA dengan menggunakan senyawa antara malonil-KoA dijalankan dalam beberapa siklus biosintesis asam lemak, tergantung dari panjang asam lemak yang akan dibentuk. Namun demikian, batasan akhir biosintesis ini hanya dapat membentuk senyawa asam lemak palmitat dengan panjang rantai karbon 16. Tiap siklus biosintesis ini mampu memanjangkan asetil-KoA (2 atom

karbon) dengan dua atom karbon yang berasal dari malonil-KoA. Jumlah siklus dan proses pemanjangan yang terlibat dalam pembentukan asam palmitat dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 5.3. Proses pemanjangan asetil-KoA dengan bahan antara malonil-KoA menjadi asam lemak

Siklus Biosintesis	Bahan baku	Produk jadi	Produk samping
1	1 asetil-KoA (2 atom C) +1 malonil KoA (3 atom C)	1 asam butanoat (4 atom C)	CO ₂
2	1 asam butanoat (4 atom C) +1 malonil KoA (3 atom C)	1 asam heksanoat (6 atom C)	CO ₂
3	1 asam heksanoat (6 atom C)+ 1 malonil-KoA	1 asam oktanoat (8 atom C)	CO ₂
4	1 asam oktanoat (8 atom C)+ 1 malonil-KoA	1 asam dekanoat (10 atom C)	CO ₂
5	1 asam dekanoat (10 atom C)+ 1 malonil-KoA	1 asam dodekanoat (12 atom C)	CO ₂
6	1 asam dodekanoat (12 atom C)+ 1 malonil-KoA	1 asam tetradekanoat (14 atom C)	CO ₂

7	1 asam tetradekanoat (14 atom C)+ 1 malonil KoA	1 asam heksadekanoat (16 atom C)	CO ₂
---	---	--	-----------------

Biosintesis asam palmitat ini melibatkan beberapa reaksi enzimatik yang secara rinci dijelaskan sebagai berikut.

- a. Asetil-KoA (C₂H₃OSCoA) berkondensasi dengan malonil-KoA (C₃H₂O₃SCoA) dengan bantuan enzim β-ketoasil-ACP-sintase menghasilkan β-ketoasil-ACP (C₄H₅O₂SCoA).
- b. β-ketoasil-ACP (C₄H₅O₂SCoA) mengalami reduksi menjadi D3-hidroksiasil-ACP (C₄H₆O₂SCoA) dengan bantuan enzim β-ketoasil-ACP reduktase. Pada tahap ini dibutuhkan energi sebanyak 1 NADPH.
- c. D3-hidroksiasil-ACP (C₄H₆O₂SCoA) mengalami dehidrasi menjadi trans-Δ²-enoil-ACP (C₄H₅OSCoA) dengan bantuan enzim 3-hidroksiasil-ACP-dehidrase.
- d. Trans-Δ²-enoil-ACP (C₄H₅OSCoA) mengalami reduksi menjadi butiril-ACP (C₄H₇OSCoA) dengan bantuan enzim enoil-ACP-reduktase. Pada proses ini dibutuhkan energi sebesar 1 NADPH. Butiril-ACP (C₄H₇OSCoA) ini merupakan produk akhir dari 1 siklus biosintesis asam lemak yang nantinya akan menghasilkan asam butanoat.
- e. Siklus ke-2 mengalami reaksi yang sama menghasilkan asam heksanoat, dan seterusnya seperti ditunjukkan oleh Tabel 4.2.

Pada reaksi biosintesis asam palmitat ini, secara keseluruhan dapat dihitung besaran energi yang dibutuhkan melalui persamaan reaksi:

- a. Pembentukan malonil KoA.

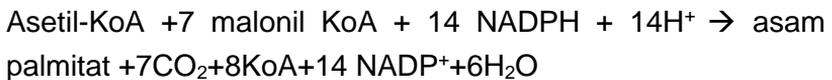
Tiap siklus membutuhkan 1 asetil KoA untuk pembentukan malonil-KoA. Pada pembuatan asam palmitat, dibutuhkan 7

siklus biosintesis, sehingga dibutuhkan 7 asetil-KoA untuk membentuk 7 malonil-KoA dan energi sebesar 7 ATP.



b. Pembentukan asam palmitat

Energi dibutuhkan pada reaksi kondensasi dan reduksi. Asetil-KoA yang merupakan bahan baku utama pada biosintesis asam palmitat diperpanjang oleh 7 malonil-KoA. Pada 7 siklus pembentukan asam palmitat dapat digambarkan persamaan reaksi sbb.



Dengan demikian, persamaan reaksi total digambarkan sebagai berikut.



Berdasarkan persamaan reaksi total tersebut, dapat dihitung energi yang dibutuhkan sebesar 7 ATP + 14 NADPH (1 NADPH setara dengan 3 ATP) = 49 ATP. Jika proses pemindahan asetil-KoA dari mitokondria ke sitoplasma juga diperhitungkan, maka dibutuhkan 8 pemindahan asetil-KoA dengan energi tiap pemindahan 1 ATP. Total energi yang dibutuhkan menjadi 49 ATP + 8 ATP = 57 ATP.

c. Elongasi

Tahap elongasi dilakukan jika asam lemak yang akan dibentuk memiliki panjang rantai atom karbon lebih dari 16. Oleh karena

itu tahapan ini dilakukan setelah reaksi pembentukan asam palmitat dan prosesnya dilakukan dengan pemanjangan atom karbon dari asam palmitat yang tidak membutuhkan energi. Senyawa yang digunakan untuk pemanjangan malonil-KoA, namun tidak melibatkan reaksi enzimatik seperti tahap biosintesis asam palmitat. Proses elongasi terjadi di retikulum endoplasma dan mitokondria.

d. Desaturasi

Proses desaturasi artinya adalah pengurangan kejenuhan atau pembentukan ikatan rangkap pada asam lemak. Proses ini dapat dilakukan dengan reaksi enzimatik dengan katalisis enzim *fatty acyl-CoA desaturase*. Proses desaturasi tidak dapat dilakukan oleh hewan karena di hewan tidak memiliki enzim desaturase, sementara pada tumbuhan terdapat enzim desaturase. Oleh karena itu, hewan tidak bisa memproduksi asam lemak esensial, seperti: asam α -linolenat (ALA), Asam eikosapentaenoat (EPA), asam dokosaheksaenoat (DHA), dan asam lemak Omega-6, seperti misalnya asam linoleat. Ditemukannya asam lemak esensial pada beberapa hewan seperti ikan laut disebabkan konsumsi makanan hewan berupa tumbuhan.

e. Pembentukan asam lemak berantai ganjil

Asam lemak pada umumnya memiliki panjang rantai karbon dengan jumlah genap, namun ada juga jenis asam lemak dengan jumlah rantai karbon ganjil. Di alam, asam lemak ganjil biasanya dimiliki oleh tanaman, beberapa organisme laut, dan ruminansia. Asam pentadekanoat (C15:0) terkandung di dalam lemak susu dan daging, asam heptadekanoat (C17:0) terkandung di dalam minyak hewani, asam nonadekanoat (C19:0) terkandung di dalam minyak nabati dan hewani.

Pembentukan asam lemak rantai ganjil pada prinsipnya sama dengan asam lemak rantai genap, hanya saja berbeda pada senyawa dasar yang digunakan, yaitu propionil-KoA, bukan asetil-KoA. Propionil-KoA akan diperpanjang oleh malonil-KoA.

9. Tahapan Oksidasi Asam Lemak

Oksidasi asam lemak dapat berkontribusi terhadap 80% ketersediaan energi di dalam tubuh atau mencapai 38 kJ/g, dua kali lebih tinggi dibanding protein dan karbohidrat. Adapun cara penyediaan energi dari proses oksidasi asam lemak yaitu (5):

- 1) Transfer elektron dari asam lemak selama proses oksidasi melalui jalur respirasi yang menghasilkan energi dalam bentuk ATP (*adenosine triphosphate*).
- 2) Asetil-KoA yang diperoleh akan dioksidasi melalui karbondioksida melalui siklus asam sitrat.
- 3) Asetil-KoA dipindah ke hati membentuk badan keton, yaitu energi larut air pengganti glukosa.

Proses oksidasi asam lemak dikenal dengan istilah beta (β)-oksidasi. Penamaan tersebut didasarkan atas letak pemotongan karbon tiap siklus selama proses oksidasi yang berada pada posisi karbon beta atau karbon kedua dari ujung karboksil pada rantai asam lemak. Secara umum, tahapan lengkap proses oksidasi lemak ini meliputi: tahapan beta-oksidasi, oksidasi asetil-KoA menjadi karbondioksida dalam siklus asam sitrat, serta transfer elektron ke jalur pernafasan mitokondrial.

1) Tahapan beta-oksidasi

Tahapan beta oksidasi terjadi di mitokondria, yaitu organel sel eukariotik sebagai tempat produksi energi utama. Karena asam lemak tidak berada di dalam mitokondria, melainkan ada

di sitoplasma (tempat terjadinya biosintesis asam lemak), maka asam-asam lemak yang akan dioksidasi harus dipindahkan terlebih dahulu dari bagian sitoplasma ke mitokondria.

Cara pemindahan asam lemak berbeda, tergantung dari panjang rantai karbonnya. Jika asam lemak memiliki rantai karbon kurang dari atau sama dengan 12, maka asam lemak langsung dipindahkan tanpa perlu bantuan protein transporter. Sebaliknya, asam lemak dengan rantai karbon lebih dari 14 harus melalui tiga tahapan reaksi enzimatik untuk dapat melalui 2 lapis membran, yaitu membrane dalam dan membrane luar mitokondria. Sebelum melewati mitokondria luar, asam lemak akan dikondensasi dengan KoA (koenzim A) sehingga membentuk asam lemak-KoA dengan bantuan enzim asil-KoA sintetase. Tahapan ini dibutuhkan energi sebesar 2 ATP.

Asam lemak-KoA kemudian diikat oleh protein karnitin dengan bantuan enzim karnitin asiltransferase I. Karnitin ini berperan sebagai protein transporter yang membawa asam lemak menembus membran mitokondria. Setelah karnitin-asam lemak sampai di bagian dalam mitokondria, asam lemak-KoA akan dilepas dari karnitin kembali dengan bantuan enzim karnitin asiltransferase II. Asam lemak-KoA kemudian siap dioksidasi di dalam mitokondria.

Oksidasi asam lemak terdiri dari beberapa proses reaksi, yaitu: dehidrogenasi I, hidratisasi, dehidrogenasi II, dan asetiltransferasi (tiolasi). Pada tiap siklus beta oksidasi, akan dipotong 2 atom karbon (asetil-KoA), sehingga asam lemak yang dihasilkan memiliki panjang rantai karbon yang lebih pendek (berkurang 2 atom karbon).

a. Dehidrogenasi I

Asam lemak-KoA pada tahapan pertama siklus oksidasi akan didehidrogenasi. Perumpamaan asam lemak palmitat yang akan dioksidasi. Palmitoyl-KoA (panjang rantai karbon 16) mengalami proses dehidrogenasi asil-KoA menghasilkan energi FADH_2 dengan dibantu enzim asil-KoA dehidrogenase. Pada tahapan ini, satu molekul hidrogen (proton dan elektron) dilepaskan dari ikatan C-C antara karbon α dan β (karbon yang berdekatan dengan gugus koenzim A) dan membentuk ikatan tioester antara rantai karbon dengan KoA menghasilkan *trans- Δ^2 -enoyl-CoA*.

b. Hidratasi

Pada tahapan hidratasi ini, *trans- Δ^2 -enoyl-CoA* akan mengalami penambahan molekul air ke ikatan rangkap dengan bantuan enzim enoyl-KoA hidratase menghasilkan *L- β -hidroxiacyl-CoA*. Posisi penambahan air adalah pada posisi alfa dan beta rantai karbon.

c. Dehidrogenasi II

Pada tahapan dehidrogenasi yang kedua ini, *L- β -hidroxiacyl-CoA* akan didehidrogenasi menjadi *β -ketoacyl-CoA* menghasilkan energi 1 NADH dibantu oleh enzim *β -hidroxiacyl-CoA dehydrogenase*.

d. Transferase

β -ketoacyl-CoA kemudian akan berkondensasi dengan CoA-SH melepas asil (asetil-KoA) dengan bantuan *acyl-CoA acetyltransferase* (thiolase) dan menyisakan asam lemak dengan panjang rantai karbon 14 (*acyl-CoA myristoyl-CoA*). Pada tahapan ini, tidak ada energi yang dilepas atau dibutuhkan.

Berdasarkan penjelasan tersebut, maka dapat diringkas proses beta oksidasi asam lemak palmitat (rantai karbon 16) menjadi bentuk paling sederhana atau asetil-KoA (rantai karbon 2) melalui reaksi berikut.

Siklus beta-oksidasi 1: $C_{16} \rightarrow C_{14} + C_2$ (asetil-KoA)
Siklus beta-oksidasi 2: $C_{14} \rightarrow C_{12} + C_2$
Siklus beta-oksidasi 3: $C_{12} \rightarrow C_{10} + C_2$
Siklus beta-oksidasi 4: $C_{10} \rightarrow C_8 + C_2$
Siklus beta-oksidasi 5: $C_8 \rightarrow C_6 + C_2$
Siklus beta-oksidasi 6: $C_6 \rightarrow C_4 + C_2$
Siklus beta-oksidasi 7: $C_4 \rightarrow C_2 + C_2$

Dengan demikian, asam lemak palmitat dapat mengalami 7 siklus beta-oksidasi menghasilkan asetil KoA sebanyak 8, 7 $FADH_2$ dan 7 NADH. Konversi 7 $FADH_2$ dan 7 NADH menghasilkan masing-masing $7 \times 2 = 14$ ATP dan $7 \times 3 = 21$ ATP dengan total 35 ATP.

2) Tahapan oksidasi asetil-KoA dalam siklus asam sitrat

Asetil-KoA yang dihasilkan dari oksidasi asam lemak akan memasuki siklus asam sitrat menghasilkan energi tinggi, karbondioksida, dan air. Jika 1 kali siklus asam sitrat menghasilkan 12 ATP, maka 8 asetil-KoA yang dihasilkan dari oksidasi asam lemak palmitat akan menghasilkan energi sebanyak 96 ATP. Dengan demikian total energi dari 8 siklus beta oksidasi dan 8 siklus asam sitrat adalah $35 + 96 \text{ ATP} = 131$ ATP, kemudian dikurangi dengan proses aktivasi asam lemak menjadi asam lemak-KoA membutuhkan 2 ATP dan bersisa sejumlah 129 ATP.

3) Tahapan transfer electron ke jalur pernafasan mitokondrial

Molekul $FADH_2$ dan NADH yang dihasilkan dari jalur siklus asam sitrat akan membawa electron ke tahapan transfer electron ini. Electron akan dipindahkan melalui kompleks 1 (NADH dehidrogenasi), 2 (suksinat dehidrogenasi), 3 (sitokrom bc 1), 4 (sitokrom bc 2).

10. Pembentukan Badan Keton

Badan keton merupakan senyawa organik sampingan yang dihasilkan selain dari proses oksidasi asam lemak. Badan keton biasanya terbentuk karena asetil-KoA yang dihasilkan dari siklus beta oksidasi tidak bisa diteruskan atau diproses dalam jalur siklus asam sitrat. Hal ini disebabkan tidak tersedianya oksaloasetat sebagai produk antara pada siklus asam sitrat. Kejadian kekurangan oksaloasetat banyak terjadi pada seseorang yang menderita diabetes mellitus dan orang yang kelaparan. Pada penderita diabetes, glukosa di dalam darah tidak dapat diserap tubuh dan digunakan untuk proses glikolisis, sehingga tubuh mengalami kekurangan energi. Begitu pula pada orang yang kelaparan atau berpuasa atau melakukan diet makanan non-lemak, maka ketidakhadiran karbohidrat pada waktu yang panjang menyebabkan tubuh menyediakan energi melalui jalur selain glikolisis, salah satunya yaitu membentuk glukosa melalui proses glukoneogenesis dan proses oksidasi asam lemak. Pada proses glukoneogenesis, diperlukan oksaloasetat. Jika proses glukoneogenesis terjadi terus menerus, dapat menyebabkan oksaloasetat berkurang atau tidak cukup lagi untuk pembongkaran asetil-KoA menjadi energi tinggi pada siklus asam sitrat. Dalam kondisi tersebut, asetil-KoA yang banyak terbentuk dari proses gluconeogenesis atau beta oksidasi asam lemak harus melalui jalur selain siklus asam sitrat untuk pengubahan energi. Jalur alternatif pembentukan energi tersebut adalah pembentukan badan-badan keton, seperti asetoasetat, D- β -hidroksibutirat, aseton, keton total (3).

11. Bahaya Keton Bodies yang Berlebih

Badan-badan keton dapat digunakan oleh tubuh sebagai bentuk energi untuk jantung, otot rangka, ginjal, dan otak. Badan keton

ini diperlukan tubuh dalam jumlah yang sangat kecil, yaitu < 3 mg/100 mL, sehingga kelebihan badan keton di dalam tubuh dapat menyebabkan gangguan bagi tubuh. Aseton merupakan bentuk alkohol yang bersifat volatile atau mudah menguap. Kejadian aseton berlebih biasanya muncul pada bau nafas penderita diabetes. Asetoasetat dan D- β -hidroksibutirat yang jumlahnya berlebih dapat menurunkan pH darah dan berakibat asidosis. Sementara itu, keton total yang berlebih dapat menyebabkan ketosis dan ketoasidosis yang juga menurunkan pH darah.

12. Rangkuman

Lemak dan minyak disusun dari satu molekul gliserol dan tiga molekul asam lemak. Ketiga asam lemak yang menyusun lemak dapat menyebabkan perbedaan jenis dan sifat lemak yang disusunnya. Asam lemak termasuk ke dalam senyawa asam karboksilat yang disusun atas rantai hidrokarbon dan gugus karboksil. Rantai hidrokarbon merupakan serangkaian atom C yang saling terikat, bisa dihubungkan dengan ikatan kovalen tunggal maupun ikatan kovalen rangkap dengan panjang rantai antara 4-36 atom karbon (C₄-C₃₆). Penamaan asam lemak yang utama yaitu asam + nama hidrokarbon (alkana, sesuai dengan panjang atom karbon)+oat. Asam lemak memiliki peran utama sebagai sumber energi dan bentuk energi yang bisa ditransportasikan di dalam tubuh. Kekurangan lemak dalam kondisi panjang dapat menyebabkan anak mengalami status gizi kurang, sebaliknya jika berlebihan dapat menyebabkan status gizi lebih. Proses tranportasi lemak mulai dilakukan di usus halus dengan bantuan cairan empedu yang membantu proses emulsifikasi lemak, sehingga mudah diakses oleh enzim lipase yang dapat bekerja jika substrat atau asam lemak larut air.

Biosintesis asam lemak merupakan proses pembentukan asam lemak yang memerlukan energi. Proses terjadi di dalam sitoplasma, dengan tahapan pembentukan malonil-KoA, biosintesis asam palmitat, elongasi, dan desaturase. Sementara itu, oksidasi asam lemak merupakan proses pembongkaran asam lemak yang terjadi di dalam mitokondria dengan tahapan dehidrogenasi 1, hidratisasi, hidrogenasi 2, dan transferasi.

Badan keton merupakan senyawa organik sampingan yang berfungsi sebagai sumber energi yang dihasilkan selain dari proses oksidasi asam lemak. Badan keton biasanya terbentuk karena asetil-KoA yang dihasilkan dari siklus beta oksidasi tidak bisa diteruskan atau diproses dalam jalur siklus asam sitrat yang disebabkan tubuh kekurangan oksaloasetat. Hal ini banyak terjadi pada penderita diabetes mellitus dan orang yang kelaparan. Badan keton berlebih seperti aseton, hidroksibutirat, keton dapat menyebabkan gangguan asidosis yang menyebabkan keracunan darah dan munculnya bau nafas alcohol pada penderita diabetes.

13. Latihan dan Jawaban

- 1) Apa perbedaan lemak dan asam lemak?

Jawaban: Asam lemak merupakan penyusun dari senyawa lemak. Lemak dibentuk dari 3 senyawa asam lemak yang berkondensasi dengan gliserol.

- 2) Apa peran lemak di dalam tubuh?

Jawaban: Lemak berperan sebagai sumber energi terbesar di dalam tubuh, sebagai bentuk energi yang bisa dipindahkan/didistribusikan, sebagai bentuk simpanan energi, komponen dari membrane sel, berperan dalam insulasi, berperan sebagai signal eicosanoid, mengatur hormon reproduksi seperti estrogen dan testoteron, menjaga kesehatan kulit, berperan dalam penyerapan

vitamin A, D, E, dan K, menjaga keseimbangan kadar kolesterol dalam darah.

3) Bagaimana proses biosintesis asam lemak?

Jawaban: Biosintesis asam lemak merupakan proses pembentukan asam lemak yang membutuhkan energi. Proses terjadi di dalam sitoplasma, dengan tahapan pembentukan malonil-KoA, biosintesis asam palmitat, elongasi, dan desaturase.

4) Bagaimana proses oksidasi asam lemak?

Jawaban: Sementara itu, oksidasi asam lemak merupakan proses pembongkaran asam lemak yang terjadi di dalam mitokondria dengan tahapan dehidrogenasi 1, hidratisasi, hidrogenasi 2, dan transferasi.

5) Apa yang dimaksud badan keton dan apa bahayanya bagi tubuh?

Jawaban: Badan keton merupakan senyawa organik sampingan yang berfungsi sebagai sumber energi yang dihasilkan selain dari proses oksidasi asam lemak. Badan keton biasanya terbentuk karena asetil-KoA yang dihasilkan dari siklus beta oksidasi tidak bisa diteruskan atau diproses dalam jalur siklus asam sitrat yang disebabkan tubuh kekurangan oksaloasetat. Hal ini banyak terjadi pada penderita diabetes mellitus dan orang yang kelaparan. Badan keton berlebih seperti aseton, hidrosibutirat, keton dapat menyebabkan gangguan asidosis yang menyebabkan keracunan darah dan munculnya bau nafas alcohol pada penderita diabetes.

14. Daftar Pustaka

1. Destiana I, Mukminah N. Teknologi Minyak Lemak [Internet]. 2021. 1–113 p. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/351491961>

2. Hardinsyah, Supariasa. I Dewa Nyoman. Ilmu Gizi Teori & Aplikasi. Jakarta, Indonesia: Penerbit Buku Kedokteran EGC; 2016.
3. Closs LG. Principles of Biochemistry (Fourth Edition). *Geochim Cosmochim Acta*. 1983;47(3):661–2.
4. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia. Angka Kecukupan Gizi Yang Dianjurkan Untuk Masyarakat Indonesia. Menteri Kesehatan Republik Indonesia. 2019. 1–33 p.
5. Kennelly PJ, Botham KM, Mcguinness OP, Rodwell VW, Weil PA, York N, et al. *Illustrated Biochemistry a LANGE medical book Harper's* [Internet]. 2022. Available from: www.mhprofessional.com.

BAB VI PR

PROTEIN

Herwinda Kusuma Rahayu
Lisana Shidiq Aliya

Tujuan Instruksional Khusus

Setelah mengikuti bab ini diharapkan mahasiswa mampu :

1. Memahami dan menjelaskan struktur protein
2. Memahami dan menjelaskan jenis protein
3. Memahami dan menjelaskan fungsi Protein
4. Memahami dan menjelaskan akibat kelebihan dan kekurangan protein
5. Memahami dan menjelaskan jumlah protein yang dibutuhkan dalam tubuh (RDA/AKG)
6. Memahami dan menjelaskan tahap penguraian protein dalam tubuh
7. Memahami dan menjelaskan metabolisme asam amino
8. Memahami dan menjelaskan siklus urea
9. Memahami dan menjelaskan tahapan biosintesis protein

1. Struktur Protein

Struktur protein merupakan salah satu aspek paling menarik dalam biokimia. Susunan unik dari asam amino dalam protein menentukan bentuk tiga dimensi yang kompleks, yang pada akhirnya menentukan fungsi protein tersebut (1).

1) Struktur Primer

Struktur Primer adalah urutan linear asam amino dalam suatu protein, dihubungkan oleh ikatan peptida. Urutan ini seperti kode genetik yang menentukan struktur dan fungsi protein. Perubahan satu asam amino saja (mutasi) dapat

menyebabkan perubahan drastis pada fungsi protein, seperti pada penyakit sickle cell anemia(2).

2) Struktur Sekunder

Struktur sekunder adalah stuktur tiga dimensi lokal dari rantai polipeptida, terbentuk akibat ikatan hidrogen antara atom-atom dalam tulang punggung polipeptida(2).

Jenis Struktur Sekunder:

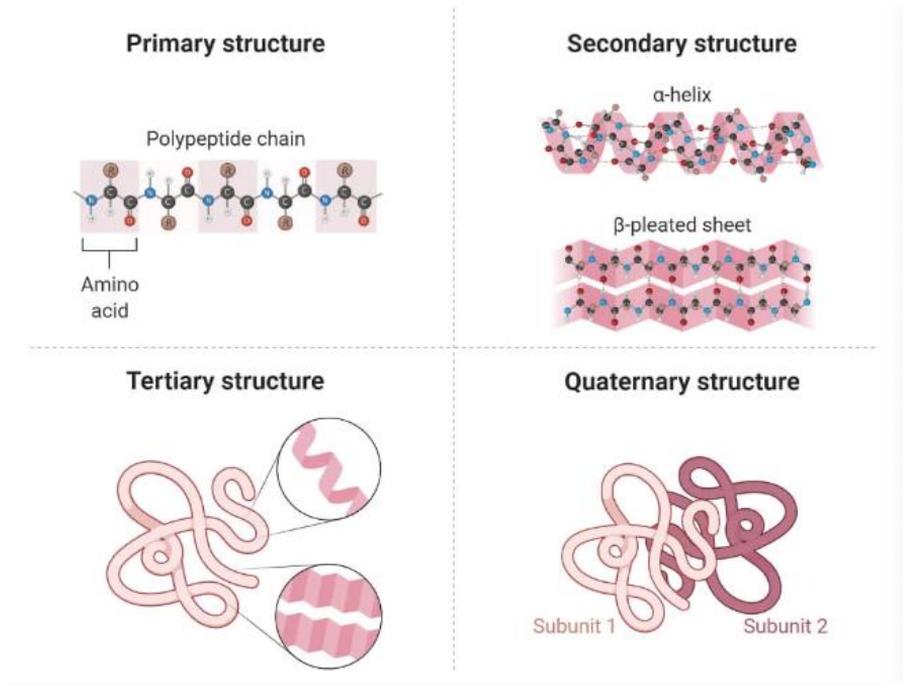
- α -helix: Struktur spiral yang stabil, distabilkan oleh ikatan hidrogen antara gugus karbonil (C=O) dan amida (N-H).
- β -sheet: Struktur lembaran yang terbentuk dari beberapa rantai polipeptida atau bagian dari rantai tunggal yang terbentang sejajar satu sama lain.
- Random coil: Bagian rantai polipeptida yang tidak membentuk struktur α -helix atau β -sheet.

3) Struktur Tersier

Struktur tersier adalah struktur tiga dimensi keseluruhan dari satu rantai polipeptida. Stabilisasiya dibentuk oleh berbagai jenis ikatan, termasuk ikatan hidrogen, ikatan ionik, ikatan disulfida, dan interaksi hidrofobik. Struktur tersier menentukan bentuk globular atau fibrosa protein, yang berkaitan erat dengan fungsinya(2).

4) Struktur Kuartener

Struktur kuartener adalah susunan spasial subunit-subunit protein yang terdiri dari lebih dari satu rantai polipeptida. Stabilisasinya sama seperti struktur tersier. Contoh struktur kuartener adalah hemoglobin, yang terdiri dari empat subunit globin(2).



Gambar 6.1. Tingkatan Struktur Protein

Faktor yang mempengaruhi struktur protein antara lain (3):

- Urutan asam amino: Urutan asam amino menentukan potensi pembentukan struktur sekunder dan tersier.
- Ikatan kimia: Ikatan hidrogen, ionik, disulfida, dan interaksi hidrofobik.
- Lingkungan: pH, suhu, kekuatan ionik, dan keberadaan pelarut organik dapat mempengaruhi stabilitas struktur protein.

Pentingnya Memahami Struktur Protein (4):

- Pengembangan obat: Memahami struktur protein target dapat membantu dalam merancang obat yang efektif.
- Rekayasa protein: Mengubah struktur protein untuk mendapatkan sifat yang diinginkan.

- Pemahaman penyakit: Banyak penyakit disebabkan oleh kelainan struktur protein.

Contoh Protein dengan Struktur yang Berbeda(5):

- Insulin: Protein hormon dengan struktur kuartener yang terdiri dari dua rantai polipeptida.
- Kolagen: Protein struktural dengan struktur fibrosa yang kaya akan struktur β -sheet.
- Enzim: Protein katalitik dengan struktur yang sangat spesifik untuk substratnya.

2. Jenis Protein

Jenis protein dibedakan berdasarkan fungsi, komposisi, dan sumber. Berikut pejelasanannya:

1) Berdasarkan fungsi (6):

- Enzim: Merupakan katalisator biologis yang mempercepat reaksi kimia dalam tubuh. Contoh: amilase (mencerna karbohidrat), protease (mencerna protein), lipase (mencerna lemak).
- Hormon: Molekul pembawa pesan yang mengatur berbagai proses fisiologis. Contoh: insulin (mengatur kadar gula darah), hormon pertumbuhan (merangsang pertumbuhan).
- Protein Struktural: Membentuk komponen sel dan jaringan, memberikan kekuatan dan dukungan. Contoh: kolagen (dalam kulit, tulang, tendon), keratin (dalam rambut, kuku).
- Protein Transport: Mengangkut molekul dan ion di dalam dan di luar sel. Contoh: hemoglobin (mengangkut oksigen dalam darah), albumin (mengangkut asam lemak dalam darah).
- Protein Pertahanan: Melindungi tubuh dari patogen. Contoh: antibodi (menetralkan antigen).

- Protein Kontraktil: Memungkinkan terjadinya gerakan. Contoh: aktin dan miosin (dalam otot).
 - Protein Penyimpanan: Menyimpan nutrisi. Contoh: ferritin (menyimpan zat besi).
- 2) Berdasarkan komposisi (6):
- Protein Sederhana: Hanya terdiri dari rantai asam amino. Contoh: albumin, globulin.
 - Protein Konjugasi: Terdiri dari rantai asam amino dan gugus prostetik non-protein. Contoh: hemoglobin (gugus heme), lipoprotein (gugus lipid).
- 3) Berdasarkan sumber (7):
- Protein Hewani: Berasal dari sumber hewan seperti daging, ikan, telur, susu, dan produk olahannya. Umumnya mengandung semua asam amino esensial yang dibutuhkan tubuh.
 - Protein Nabati: Berasal dari sumber tumbuhan seperti kacang-kacangan, biji-bijian, dan sayuran. Beberapa protein nabati mungkin tidak mengandung semua asam amino esensial dalam jumlah yang cukup.



Gambar 6.2. Berbagai Sumber Protein

Tabel 6.1. Perbandingan Protein Hewani dan Nabati(8)

Karakteristik	Protein Hewani	Protein Nabati
Kualitas asam amino	Umumnya lengkap	Beberapa mungkin tidak lengkap
Kandungan lemak	Lebih tinggi	Lebih rendah
Kandungan kolesterol	Tinggi	Rendah
Sumber	Daging, ikan, telur, susu	Kacang-kacangan, biji-bijian, sayuran

3. Fungsi Protein

Protein memiliki beragam peran penting dalam tubuh manusia. Berikut adalah beberapa fungsi utama protein (6):

- 1) **Pertumbuhan dan perbaikan jaringan:**
Protein adalah komponen utama sel dan jaringan tubuh. Asam amino dari protein digunakan untuk membangun dan memperbaiki jaringan yang rusak, seperti otot, kulit, dan tulang. Terutama penting selama masa pertumbuhan, kehamilan, dan penyembuhan luka.
- 2) **Enzim:**
Hampir semua enzim dalam tubuh adalah protein. Enzim berfungsi sebagai katalisator biologis yang mempercepat reaksi kimia dalam tubuh, seperti pencernaan makanan, metabolisme energi, dan sintesis berbagai senyawa.
- 3) **Hormon:**
Beberapa hormon adalah protein atau peptida (rantai pendek asam amino).

Hormon mengatur berbagai proses fisiologis, seperti pertumbuhan, metabolisme, dan reproduksi. Contohnya, insulin mengatur kadar gula darah, hormon pertumbuhan merangsang pertumbuhan.

4) Transport:

Protein berperan dalam mengangkut berbagai zat di dalam tubuh. Contohnya, hemoglobin mengangkut oksigen dalam darah, albumin mengangkut asam lemak dalam darah.

5) Sistem Imun:

Antibodi adalah protein yang melindungi tubuh dari infeksi dengan mengenali dan menetralkan zat asing (antigen), juga berperan dalam respon imun lainnya.

6) Kontraksi Otot:

Protein aktin dan miosin bekerja sama untuk menghasilkan kontraksi otot yang memungkinkan kita bergerak.

7) Pemeliharaan Keseimbangan Cairan:

Protein dalam darah, seperti albumin, membantu mempertahankan tekanan osmotik darah dan menjaga keseimbangan cairan antara darah dan jaringan.

8) Sumber Energi:

Meskipun bukan sumber energi utama, protein dapat digunakan sebagai sumber energi jika karbohidrat dan lemak tidak mencukupi.

Tabel 6.2. Contoh Protein dan Fungsinya (8)

Protein	Fungsi Utama
Kolagen	Protein struktural dalam kulit, tulang, tendon
Hemoglobin	Mengangkut oksigen dalam darah

Insulin	Mengatur kadar gula darah
Laktase	Mencerna laktosa dalam susu
Aktin dan Miosin	Kontraksi otot
Antibodi	Melindungi tubuh dari infeksi

4. Akibat Kelebihan dan Kekurangan Protein

Asupan protein yang seimbang sangat penting bagi kesehatan tubuh. Baik kekurangan maupun kelebihan protein dapat menimbulkan masalah kesehatan.

1) Akibat Kekurangan Protein

Kekurangan protein dalam jangka panjang dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, antara lain(3):

- Pertumbuhan terhambat: Pada anak-anak, kekurangan protein dapat menghambat pertumbuhan fisik dan mental.
- Penurunan berat badan: Tubuh akan mulai membakar otot untuk mendapatkan energi jika kekurangan protein.
- Kelelahan: Kekurangan protein dapat menyebabkan kelelahan kronis karena tubuh kekurangan energi.
- Sistem imun melemah: Protein berperan penting dalam pembentukan antibodi yang melawan infeksi. Kekurangan protein dapat meningkatkan risiko infeksi.
- Edema: Penumpukan cairan dalam jaringan tubuh, terutama pada kaki dan perut.
- Rambut dan kuku rapuh: Protein adalah komponen utama rambut dan kuku. Kekurangan protein dapat menyebabkan rambut rontok, kuku rapuh, dan kulit kering.

2) Kondisi medis akibat kekurangan protein yang parah:

- Kwashiorkor: Ditandai dengan perut buncit akibat penumpukan cairan, pertumbuhan terhambat, dan perubahan warna rambut.
- Marasmus: Ditandai dengan penurunan berat badan yang ekstrem, otot mengecil, dan pertumbuhan terhambat.

3) Akibat Kelebihan Protein

Meskipun protein penting untuk tubuh, konsumsi protein yang berlebihan juga dapat menimbulkan masalah kesehatan, terutama jika dilakukan dalam jangka panjang(3):

- Beban ginjal: Ginjal bekerja keras untuk memetabolisme protein dan membuang produk limbahnya. Konsumsi protein berlebihan dapat meningkatkan beban kerja ginjal dan meningkatkan risiko penyakit ginjal.
- Dehidrasi: Metabolisme protein menghasilkan produk sampingan berupa urea yang harus dikeluarkan melalui urin. Hal ini dapat meningkatkan kebutuhan cairan tubuh dan meningkatkan risiko dehidrasi.
- Osteoporosis: Beberapa penelitian menunjukkan bahwa konsumsi protein tinggi dalam jangka panjang dapat meningkatkan kehilangan kalsium melalui urin, yang dapat meningkatkan risiko osteoporosis.
- Masalah pencernaan: Konsumsi protein berlebihan dapat menyebabkan masalah pencernaan seperti sembelit, diare, dan kembung.
- Risiko penyakit jantung: Beberapa penelitian menunjukkan hubungan antara konsumsi protein tinggi dengan peningkatan risiko penyakit jantung, terutama jika sumber protein berasal dari daging merah olahan.

5. Jumlah Protein yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK)

RDA atau Angka Kecukupan Gizi adalah jumlah rata-rata zat gizi yang dibutuhkan oleh hampir semua orang sehat (sekitar 97,5%) dalam suatu kelompok umur, jenis kelamin, dan kondisi fisiologis tertentu untuk memenuhi kebutuhan tubuh dan mencegah defisiensi. Angka ini ditetapkan berdasarkan kajian ilmiah dan digunakan sebagai acuan dalam menyusun menu makanan yang sehat (9).

1) Faktor-faktor yang mempengaruhi kebutuhan protein

- Usia: Kebutuhan protein bayi, anak-anak, remaja, dewasa, dan lansia berbeda-beda.
- Jenis kelamin: Pria umumnya membutuhkan protein lebih banyak daripada wanita.
- Tingkat aktivitas fisik: Orang yang aktif secara fisik membutuhkan protein lebih banyak untuk memperbaiki jaringan otot.
- Kondisi kesehatan: Wanita hamil dan menyusui, serta individu dengan kondisi medis tertentu seperti penyakit ginjal, membutuhkan asupan protein yang berbeda.
- Massa otot: Semakin besar massa otot, semakin tinggi kebutuhan protein.

2) Cara menghitung kebutuhan protein

Cara paling umum untuk menghitung kebutuhan protein adalah dengan mengalikan berat badan dengan faktor tertentu. Sebagai contoh, umumnya digunakan perhitungan 0,8 gram protein per kilogram berat badan per hari. Namun, ini hanyalah perkiraan kasar. Untuk mendapatkan angka yang lebih akurat, sebaiknya konsultasikan dengan ahli gizi.

3) Angka Kecukupan Gizi (AKG) Protein di Indonesia

Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2019 tentang Angka Kecukupan Gizi yang Dianjurkan

untuk Masyarakat Indonesia memberikan rincian mengenai AKG protein untuk berbagai kelompok umur dan jenis kelamin (10).

Protein sangat penting untuk pertumbuhan, perbaikan jaringan, pembentukan enzim, hormon, dan antibodi. Kekurangan protein dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan seperti pertumbuhan terhambat, penurunan imunitas, dan kelelahan. Namun, kelebihan protein juga tidak baik karena dapat membebani ginjal.

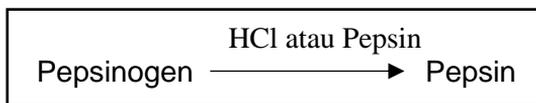
Tabel 6.3. Angka Kecukupan Protein yang Dianjurkan
(Per Orang Per Hari) (9)

Kelompok umur	BB* (kg)	TB* (cm)	Energi (kkal)	Protein (g)
Bayi/Anak				
0 – 6 bulan	6	61	550	12
7 – 11 bulan	9	71	725	18
1-3 tahun	13	91	1125	26
4-6 tahun	19	112	1600	35
7-9 tahun	27	130	1850	49
Laki-laki				
10-12 tahun	34	142	2100	56
13-15 tahun	46	158	2475	72
16-18 tahun	56	165	2675	66
19-29 tahun	60	168	2725	62
30-49 tahun	62	168	2625	65
50-64 tahun	62	168	2325	65
65-80 tahun	60	168	1900	62
80+ tahun	58	168	1525	60
Perempuan				
10-12 tahun	36	145	2000	60
13-15 tahun	46	155	2125	69
16-18 tahun	50	158	2125	59
19-29 tahun	54	159	2250	56
30-49 tahun	55	159	2150	57
50-64 tahun	55	159	1900	57
65-80 tahun	54	159	1550	56
80+ tahun	53	159	1425	55
Hamil (+an)				
Trimester 1			+180	+20
Trimester 2			+300	+20
Trimester 3			+300	+20
Menyusui (+an)				
6 bln pertama			+330	+20
6 bln kedua			+400	+20

6. Penguraian Protein dalam Tubuh

1) Lambung

Pencernaan protein dimulai di lambung yaitu saat hydrochloric acid (HCl) bekerja. Kandungan HCl dalam lambung menyebabkan nilai pH lambung menjadi asam (kurang dari 3), sehingga terjadi denaturasi (pemecahan) struktur protein kuarterner, tersier, dan sekunder. Denaturasi seperti HCl akan memecah ikatan hidrogen dan elektrostatik untuk memecah protein, namun ikatan peptida tidak terpengaruh oleh HCl. Berikutnya, HCl akan mengubah zymogen (bentuk inaktif enzim) yaitu pepsinogen menjadi pepsin. Selain itu, pepsin yang sudah terbentuk juga dapat berfungsi untuk memecah pepsinogen menjadi pepsin (1).



Pepsin berfungsi untuk endopeptidase (yang berarti menghidrolisis ikatan peptida bagian dalam di dalam protein atau polipeptida) pada pH ~3,5. Pepsin akan memecah ikatan peptida yang berdekatan dengan ujung karboksi dari berbagai macam asam amino, seperti: leusin, metionin, asam amino aromatik (fenilalanin, tirosin, dan triptofan), dan asam amino dikarboksilat (glutamat dan aspartat) (2).

Produk akhir dari pencernaan protein pada lambung yaitu polipeptida besar beserta beberapa oligopeptida (rantai pendek peptida asam amino yang terikat satu sama lain) dan asam amino bebas. Selanjutnya produk akhir ini akan dikosongkan dalam chyme asam melalui sfingter pilorus ke dalam duodenum (bagian proksimal atau atas usus halus) untuk pencernaan lebih lanjut (1).

2) Usus halus

Campuran chyme yang dikirim ke duodenum selanjutnya merangsang pelepasan hormon sekretin dan kolesistokinin.

Sekretin dan kolesistokinin dibawa oleh darah ke pankreas, untuk mengeluarkan zymogen (bentuk inaktif enzim) dan jus pankreas yang mengandung bikarbonat, elektrolit, dan air. Selain jus pankreas, kelenjar Brunner di usus halus melepaskan sekresi zat tertentu untuk pencernaan. Zymogen yang disekresikan oleh pankreas ke dalam usus dan selanjutnya bertanggung jawab untuk pencernaan protein dan polipeptida meliputi tripsinogen, kimotripsinogen, prokarboksipeptidase A dan B, dan proelastase. Di dalam usus halus, zimogen ini diubah secara kimiawi untuk diubah menjadi enzim yang mampu menghidrolisis protein. Aktivasi tripsinogen oleh enteropeptidase penting karena pembentukan tripsin memfasilitasi aktivasi zimogen lainnya (1).

3) Penyerapan protein

Penyerapan yaitu adalah proses pengangkutan produk akhir pencernaan dari saluran pencernaan (seperti usus halus), ke dalam tubuh. Agar masuk ke dalam darah untuk diangkut ke jaringan, asam amino harus melewati dua membran usus, membran *brush border* (apikal) dan membran basolateral (serosa). Dari >100 gram asam amino yang ada setiap hari di usus halus, terdapat sekitar 10 gram tidak diserap dan dikeluarkan (menjadi nitrogen feses). Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi penyerapan protein yaitu jenis protein dan kesehatan usus. Protein hewani lebih mudah diserap daripada protein nabati, serta kondisi seperti penyakit celiac atau inflamasi usus dapat mengganggu penyerapan asam amino (1).

Penyerapan intestinal adalah proses utama dalam pencernaan protein, di mana asam amino, dipeptida, dan tripeptida yang merupakan hasil pencernaan protein diserap ke dalam tubuh melalui usus halus. Ini merupakan tahap kritis dalam penggunaan protein oleh tubuh. Setelah protein dipecah menjadi asam amino, dipeptida, dan tripeptida oleh enzim pankreas

(tripsin, chymotrypsin, carboxypeptidase) dan enzim usus (aminopeptidase, dipeptidase), produk akhir pencernaan tersebut siap untuk diserap di bagian jejunum dan ileum dari usus halus (2).

4) Penyerapan Asam Amino:

Asam amino diserap oleh sel epitel usus melalui transporter yang bergantung pada natrium (Na⁺). Ini adalah proses transport aktif sekunder, di mana ion natrium membawa asam amino melintasi membran sel epitel. Beberapa asam amino juga diserap melalui difusi fasilitasi berdasarkan gradien konsentrasi (1).

5) Penyerapan Dipeptida dan Tripeptida:

Dipeptida dan tripeptida diserap melalui transporter spesifik yang disebut PEPT1, yang membawa peptida ini ke dalam sel epitel usus. Di dalam sel epitel, sebagian **besar** peptida dipecah menjadi asam amino oleh enzim peptidase intraseluler sebelum memasuki aliran darah (1).

6) Transpor ke Sirkulasi Darah:

Asam amino dan peptida yang sudah terurai memasuki kapiler darah di vili usus dan kemudian diangkut melalui vena porta ke hati. Di sini, asam amino dapat digunakan untuk sintesis protein atau proses metabolik lainnya seperti deaminasi dan konversi ke energi (1).

Tabel 6.3. Enzim yang Berperan dalam Pencernaan Protein

Zymogen	Enzim/ aktivator	Enzim	Tempat	Substrat	Produk akhir
Pepsinogen	HCl atau pepsin →	Pepsin	Lambung	Asam amino (aromatic, dicarboksil, leu, met)	Peptida
Tripsinogen	Enteropeptidase atau tripsin →	Tripsin	Usus halus	Asam amino sederhana	Peptida kecil, asam amino bebas
Chymotrypsinogen	Tripsin →	Chymotrypsin	Usus halus	Asam amino aromatic, met, asn, his	Peptida kecil, asam amino bebas
Procarboxypeptidase	Tripsin →	Carboxypeptidase A B	Usus halus	Asam amino netral C-terminal Asam amino netral C-terminal	Asam amino bebas Asam amino bebas
		Aminopeptidase	Usus halus	Asam amino N-terminal	Asam amino bebas

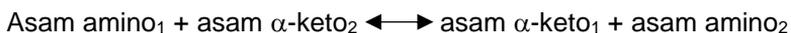
7. Metabolisme asam amino

Hati adalah tempat penyerapan sebagian besar asam amino dari asupan makan yang mengandung protein. Hati dapat mengatur asam amino yang diserap dan menyesuaikan laju metabolisemenya (termasuk katabolisme/ pemecahan dan anabolisme/ sintesis asam amino) sesuai dengan kebutuhan tubuh. Katabolisme asam amino terjadi pada tingkat yang berbeda-beda di berbagai jaringan baik selama periode puasa maupun segera setelah makan (periode *postprandial*). Hati menyerap sekitar 50–65% asam amino dari darah segera setelah makan.

Hepatosit (sel hati) periportal akan mengkatabolisme sebagian besar asam amino, kecuali glutamat dan aspartat, yang lebih banyak dimetabolisme oleh hepatosit perivaskular. Selain itu, hati tidak dapat memecah asam amino rantai cabang seperti yang banyak digunakan di otot dan jantung. Hati memperoleh hingga 50% energinya (ATP) dari oksidasi asam amino dan energi yang dihasilkan dapat digunakan untuk glukoneogenesis atau sintesis urea. Katabolisme asam amino meliputi proses transaminasi dan atau deaminasi asam amino, serta pembuangan ammonia (1).

1) Transaminasi asam amino

Tahap pertama dalam katabolisme protein adalah pemindahan atau penghilangan gugus amino dari suatu asam amino, yaitu disebut dengan transaminasi dan/atau deaminasi. Reaksi transaminasi terjadi dengan adanya pemindahan gugus amino dari satu asam amino ke asam α -keto (kerangka karbon asam amino). Kerangka karbon/asam α -keto yang memperoleh gugus amino menjadi asam amino, dan asam amino yang kehilangan gugus aminonya menjadi asam α -keto, yaitu sebagai berikut:



Reaksi transaminasi dikatalisis oleh enzim yang disebut aminotransferase/transaminase. Enzim-enzim ini biasanya memerlukan vitamin B6 dalam bentuk koenzimnya, piridoksal fosfat (PLP). Beberapa contoh aminotransferase meliputi tirosin aminotransferase, aminotransferase rantai cabang, alanin aminotransferase (ALT)/ glutamat piruvat transaminase (GPT), dan aspartat aminotransferase (AST)/ glutamat oksaloasetat transaminase (GOT) (1).

Aminotransferase ditemukan dalam berbagai konsentrasi di berbagai jaringan. Misalnya, AST ditemukan dalam konsentrasi yang lebih tinggi di jantung daripada di hati, otot, dan jaringan lainnya. Sebaliknya, ALT ditemukan dalam konsentrasi yang lebih tinggi di hati daripada di jantung, dan juga ditemukan dalam jumlah sedang di ginjal dan jumlah kecil di jaringan lainnya. Konsentrasi serum normal enzim ini rendah; namun, dengan cedera atau penyakit pada suatu organ, konsentrasi enzim serum meningkat dan dapat berfungsi sebagai indikator kerusakan organ. Misalnya, konsentrasi AST dan ALT yang lebih tinggi dari normal menandakan kerusakan hati, dan konsentrasi AST tinggi menandakan kerusakan jantung (1).

2) Deaminasi asam amino

Berbeda dengan reaksi transaminasi, reaksi deaminasi hanya melibatkan penghilangan gugus amino dari asam amino, tanpa pemindahan gugus amino ke senyawa lainnya. Gugus amino dilepaskan sebagai ammonia dan ammonia biasanya diubah (reaksi reversibel) menjadi ion amonium. Terdapat beberapa asam amino yang mengalami proses deaminasi yaitu glutamat, histidin, serin, glisin, dan treonin. Beberapa asam amino tersebut juga dapat mengalami transaminase juga. Selain itu enzim yang terlibat dalam reaksi deaminasi yaitu liase, dehidrasi, atau dehidrogenase

dan menghasilkan asam α -keto dan amonia atau ion ammonium (1).

3) Sintesis glutamat dan glutamin

Glutamat dehidrogenase menggunakan ion amonia ($^+NH_4$) dan α -ketoglutarat untuk mensintesis asam amino glutamat. Glutamat yang dihasilkan dalam reaksi reversibel ini kemudian dapat melepaskan ion amonia untuk sintesis urea. Glutamin sintetase juga dapat menggunakan amonia untuk amidasi gugus karboksi gamma glutamat untuk membentuk glutamin dalam reaksi yang bergantung pada ATP yang juga memerlukan magnesium atau mangan (1).

Sel perivaskular hati dan jaringan tubuh lainnya dengan mudah mensintesis glutamat dan glutamin dari ion amonia atau amonium, hepatosit periportal aktif dalam ureagenesis menggunakan (dari darah portal) amonia yang dicerna dalam makanan atau diperoleh dari sintesis bakteri di usus. Sel periportal yang sama ini bertanggung jawab atas hampir semua katabolisme asam amino, sehingga amonia yang dihasilkan selama reaksi degradasi asam amino juga dapat segera digunakan untuk sintesis urea (1).

4) Pembuangan ammonia

Amonia yang dihasilkan oleh reaksi deaminasi bukanlah satu-satunya sumber amonia yang ditemukan dalam tubuh. Sumber utama amonia dalam tubuh meliputi:

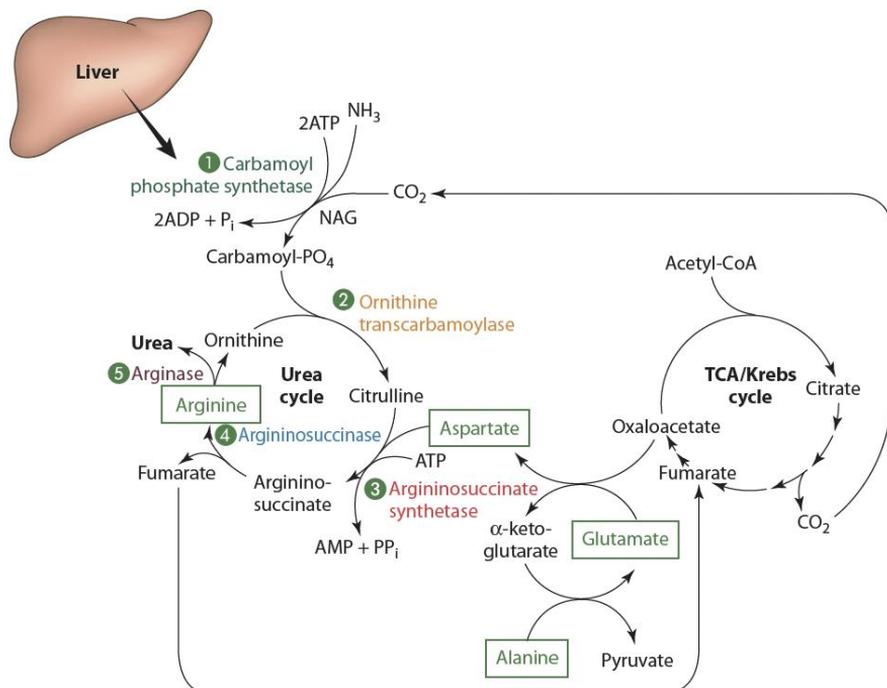
- a. Pembentukan dalam tubuh dari reaksi kimia seperti deaminasi
- b. Pembentukan oleh deaminasi gugus amida dari glutamin dan asparagin
- c. Pencernaan dan penyerapan dari makanan (misalnya, keju, daging olahan)

d. Pembentukan oleh lisis bakteri urea dan asam amino dalam saluran cerna dan penyerapan selanjutnya ke dalam tubuh.

Terdapat tiga enzim, yaitu glutamat dehidrogenase, glutamin sintetase, dan karbamoil fosfat sintetase I (siklus urea) dapat membantu pembuangan amonia dari sel-sel tubuh. Enzim-enzim ini ditemukan dalam konsentrasi tinggi di hati dan di ginjal.

8. Siklus urea

Siklus urea yang berlangsung di hati berfungsi untuk pembuangan amonia dari tubuh. Siklus urea juga berhubungan dengan siklus Krebs. Proses reaksi siklus urea antara lain:



Gambar 6.3. Proses Siklus Urea

- Amonia (NH_3) bergabung dengan CO_2 untuk membentuk karbamoil fosfat dalam reaksi yang dikatalisis oleh

karbamoil fosfat sintetase I mitokondria. N-asetil-glutamat (NAG) mengaktifkan enzim secara alosterik untuk memungkinkan pengikatan ATP.

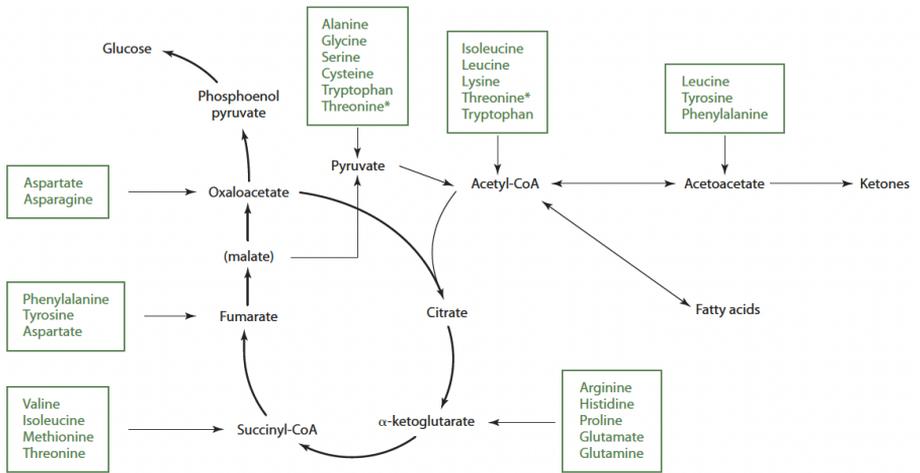
- Karbamoil fosfat bereaksi dengan ornitin menggunakan ornitin transkarbamoilase untuk membentuk sitrulin
- Aspartat bereaksi dengan sitrulin setelah diangkut ke sitosol. Langkah ini dikatalisis oleh argininosuksinat sintetase. ATP (dua ikatan berenergi tinggi) dan Mg^{2+} diperlukan untuk reaksi tersebut, dan argininosuksinat terbentuk.
- Argininosuccinate dibelah oleh argininosuccinase di sitosol untuk membentuk fumarat dan arginin.
- Urea terbentuk dan ornitin dibentuk kembali dari pembelahan arginin oleh arginase, enzim hati yang membutuhkan mangan.

1) Penggunaan kerangka karbon atau asam α -keto

Setelah gugus amino dihilangkan dari asam amino, bagian yang tersisa disebut kerangka karbon atau asam α -keto.

Asam amino \longrightarrow H_2 + rangka karbon asam amino/ asam α - keto

Rangka karbon asam amino dapat dimetabolisme lebih lanjut dalam sel, tergantung pada asam amino asal yang menjadi sumbernya dan kondisi fisiologis atau gizi tubuh. Contohnya, kerangka karbon asam amino dapat digunakan untuk menghasilkan energi, glukosa, benda keton, kolesterol, atau asam lemak.



*Physiological contribution unclear.

Gambar 6.4. Penggunaan kerangka karbon atau asam α -keto

a. Produksi energi

Asam amino digunakan untuk produksi energi ketika makanan tidak mencukupi untuk menghasilkan energi. Oksidasi asam amino dapat menghasilkan menghasilkan energi, air, $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$, dan amonia.

b. Produksi glukosa

Produksi glukosa dari sumber nonkarbohidrat seperti asam amino dikenal sebagai glukoneogenesis. Glukoneogenesis terjadi terutama di hati tetapi juga di ginjal dan usus halus. Kerangka karbon dari beberapa asam amino dapat digunakan untuk mensintesis glukosa.

Misalnya, oksaloasetat (kerangka karbon aspartat) dan piruvat (kerangka karbon alanin) dapat digunakan untuk menghasilkan glukosa dalam sel-sel tubuh. Selain itu, kerangka karbon asparagin dapat diubah menjadi oksaloasetat, dan kerangka karbon glisin, serin, sistein, triptofan, dan treonin dapat diubah menjadi piruvat untuk

produksi glukosa. Valin dan metionin juga bersifat glukogenik, menghasilkan suksinil-CoA. Jadi, untuk dianggap sebagai asam amino glukogenik, katabolisme asam amino harus menghasilkan piruvat atau zat antara dari siklus TCA. Konversi asam amino menjadi glukosa dipercepat oleh rasio glukagon terhadap insulin darah yang tinggi dan oleh konsentrasi kortisol darah yang tinggi.

Konsentrasi glukagon umumnya meningkat dalam darah ketika konsentrasi glukosa darah rendah, seperti yang dapat terjadi di antara waktu makan atau dengan puasa di mana simpanan glikogen hati telah habis. Glukagon darah (dan dalam beberapa kasus kortisol bersama dengan epinefrin) juga meningkat jika terjadi infeksi atau trauma/cedera dan dalam kondisi penyakit tertentu seperti diabetes melitus yang tidak diobati dan penyakit hati, untuk menyebutkan beberapa di antaranya.

c. Produksi benda keton

Katabolisme asam amino harus menghasilkan asetil-KoA atau asetoasetat, yang digunakan untuk pembentukan badan keton (juga disebut keton). Beberapa asam amino bersifat glukogenik dan ketogenik.

- Fenilalanina dan tirosin, misalnya, dapat didegradasi untuk membentuk fumarat (zat antara siklus TCA), yang dapat digunakan untuk membentuk glukosa, tetapi juga asetoasetat, yang dapat digunakan untuk mensintesis badan keton.
- Isoleusin sebagian bersifat glukogenik, menghasilkan suksinil-KoA, tetapi juga ketogenik, menghasilkan asetil-KoA juga setelah katabolismenya.
- Treonina sebagian bersifat glukogenik, menghasilkan suksinil-KoA atau piruvat tergantung pada jalur

degradasinya, dan sebagian bersifat ketogenik ketika didegradasi oleh jalur lain menjadi asetil-KoA.

- Triptofan juga dianggap sebagian ketogenik dan sebagian glukogenik. Triptofan menghasilkan asetil-CoA serta piruvat setelah katabolisme.
- Leusin dan lisin adalah satu-satunya asam amino yang sepenuhnya ketogenik dan setelah katabolisme menghasilkan asetil-CoA.

d. Produksi lipid (asam lemak dan kolesterol)

Oksidasi beberapa asam amino—termasuk isoleusin, leusin, lisin, triptofan, dan treonin—menghasilkan asetil-KoA, yang dapat dimetabolisme untuk menghasilkan kolesterol. Namun, leusin juga merupakan satu-satunya asam amino yang katabolismenya secara langsung menghasilkan b-hidroksi b-metilglutaril-KoA, zat antara dalam sintesis kolesterol.

Selain itu, oksidasi leusin menghasilkan metabolit lain, b-hidroksi b-metilbutirat (HMB), yang tampaknya mendorong sintesis kolesterol de novo di otot, yang memungkinkan pertumbuhan dan fungsi sel. Pada saat asupan energi dan protein berlebih disertai asupan karbohidrat yang cukup, kerangka karbon asam amino dapat digunakan untuk mensintesis asam lemak. Kerangka karbon leusin, misalnya, digunakan untuk mensintesis asam lemak dalam jaringan adiposa.

9. Biosintesis protein

1) Struktur asam nukleat

DNA (Deoxyribonucleic Acid) adalah molekul yang menyimpan informasi genetik penting bagi makhluk hidup. Struktur DNA terdiri dari dua untai polinukleotida yang berpilin membentuk heliks

ganda. DNA membentuk heliks ganda dengan diameter sekitar 2 nm, dan setiap putaran heliks mencakup sekitar 10 pasang basa, dengan panjang satu putaran sebesar 3,4 nm. Dalam struktur heliks ganda, terdapat alur besar (*major groove*) dan alur kecil (*minor groove*) yang merupakan tempat penting bagi pengikatan protein regulasi (3).

Dua untai DNA berjalan berlawanan arah (antiparalel) dan saling berinteraksi melalui ikatan hidrogen antara basa-basa yang saling berpasangan:

- Adenin (A) berpasangan dengan Timin (T) melalui dua ikatan hidrogen
- Guanin (G) berpasangan dengan Sitosin (C) melalui tiga ikatan hidrogen

2) Komponen Dasar DNA

DNA terdiri dari nukleotida yang merupakan unit dasar penyusunnya. Setiap nukleotida terdiri dari tiga komponen utama, yaitu:

a. Gula deoksiribosa

Molekul gula dengan lima atom karbon yang kekurangan satu atom oksigen dibandingkan ribosa pada RNA.

b. Kelompok fosfat

Kelompok ini berperan dalam membentuk tulang punggung (*backbone*) DNA melalui ikatan fosfodiester antara atom karbon 3' dan 5' pada gula deoksiribosa.

c. Basa nitrogen

Terdapat empat jenis basa nitrogen dalam DNA, yaitu adenin (A), guanin (G), sitosin (C), dan timin (T). Basa ini dibagi menjadi dua kategori: Purin (adenin dan guanin) yang memiliki struktur cincin ganda dan pirimidin (sitosin dan timin) yang memiliki struktur cincin tunggal.

3) Sintesis Protein

Sintesis protein adalah proses biologis di mana sel mengubah informasi genetik yang terdapat dalam DNA menjadi protein. Proses ini melibatkan dua tahap utama yaitu transkripsi dan translasi (4).

a. Transkripsi

Transkripsi adalah tahap pertama dalam sintesis protein, di mana informasi genetik yang terdapat dalam DNA dipindahkan ke molekul RNA, terutama mRNA (*messenger* RNA). Proses ini terjadi di dalam inti sel dan bertujuan untuk menghasilkan salinan dari gen yang akan diterjemahkan menjadi protein di ribosom dalam tahap berikutnya, yaitu translasi.

a) Inisiasi Transkripsi

Proses transkripsi dimulai ketika enzim RNA polimerase mengikat diri pada daerah promotor di DNA. Promotor adalah urutan spesifik pada DNA yang menandakan awal dari gen yang akan ditranskripsikan. RNA polimerase berfungsi untuk membuka heliks ganda DNA, memisahkan dua untai DNA, dan memulai sintesis RNA dari untai template DNA. Pada tahap ini, RNA polimerase mengenali urutan tertentu yang dikenal sebagai TATA box (pada banyak eukariot) yang membantu dalam pengikatan polimerase dan inisiasi transkripsi. Setelah RNA polimerase mengikat pada promotor, enzim ini mulai memulai transkripsi dengan membaca untai template DNA dari arah 3' ke 5', sambil menyusun RNA komplementer dari 5' ke 3'. Ini berarti bahwa RNA yang terbentuk akan memiliki urutan basa yang hampir sama dengan untai coding dari DNA, dengan perbedaan bahwa basa timin (T) pada DNA digantikan oleh urasil (U) pada RNA.

b) Elongasi Transkripsi

Selama elongasi, RNA polimerase bergerak sepanjang untai template DNA, membuka heliks ganda lebih jauh dan

menambahkan nukleotida RNA secara berurutan. Nukleotida RNA yang terbentuk adalah komplementer dengan untai template DNA (A dengan U, C dengan G, G dengan C, dan T dengan A). RNA polimerase memfasilitasi ikatan fosfodiester antara nukleotida yang membentuk rantai RNA yang sedang tumbuh. Proses elongasi ini berlanjut sepanjang gen hingga seluruh panjang gen yang akan ditranskripsikan selesai.

c) Terminasi Transkripsi

Transkripsi berakhir ketika RNA polimerase mencapai urutan terminator pada DNA. Terminator adalah urutan spesifik yang menandakan bahwa transkripsi harus dihentikan. Ketika RNA polimerase mencapai terminator, proses transkripsi berhenti, dan RNA polimerase melepaskan molekul mRNA yang baru terbentuk. Molekul mRNA ini kemudian akan menjalani pemrosesan lebih lanjut sebelum dipindahkan ke sitoplasma untuk diterjemahkan dalam proses translasi.

d) Pemrosesan mRNA

Setelah transkripsi selesai, mRNA yang baru terbentuk pada eukariot akan menjalani pemrosesan sebelum dapat digunakan dalam translasi. Pemrosesan ini meliputi penambahan 5' cap (penambahan m⁷G pada ujung 5' mRNA), pemotongan dan penyambungan ekson (splicing), serta penambahan ekor poli-A pada ujung 3'. Proses ini penting untuk stabilitas mRNA, perlindungan dari degradasi, dan pengenalan yang tepat pada ribosom untuk translasi.

b. Translasi

Translasi adalah tahap kedua dalam sintesis protein setelah transkripsi. Pada tahap ini, informasi yang dibawa oleh mRNA diterjemahkan menjadi urutan asam amino untuk membentuk

protein. Translasi berlangsung di ribosom, yang merupakan kompleks besar yang terdiri dari rRNA dan protein. Ribosom bekerja dengan bantuan tRNA (transfer RNA) untuk menyusun asam amino sesuai dengan urutan kodon yang ada pada mRNA. Proses translasi dapat dibagi menjadi tiga tahap utama: inisiasi, elongasi, dan terminasi.

a) Inisiasi Translasi

Proses translasi dimulai dengan pengikatan mRNA ke ribosom. Ribosom terdiri dari dua subunit: subunit kecil (30S pada prokariot dan 40S pada eukariot) dan subunit besar (50S pada prokariot dan 60S pada eukariot). Subunit kecil ribosom mengikat mRNA pada bagian 5'-cap (untuk eukariot) atau pada urutan Shine-Dalgarno (untuk prokariot), yang membantu ribosom untuk menemukan kodon awal (AUG) pada mRNA. Setelah menemukan kodon awal, tRNA yang membawa asam amino metionin (untuk eukariot) atau formilmetionin (untuk prokariot) akan berikatan dengan kodon AUG di mRNA. Kemudian, subunit besar ribosom bergabung dengan subunit kecil, membentuk ribosom yang lengkap dan siap untuk elongasi.

b) Elongasi Translasi

Pada tahap elongasi, ribosom bergerak sepanjang mRNA, membaca kodon satu per satu dan mencocokkan setiap kodon dengan tRNA yang membawa asam amino spesifik. Setiap tRNA memiliki antikodon yang komplementer dengan kodon mRNA. Setiap kali tRNA yang sesuai berikatan dengan kodon di situs A (aminoacyl) ribosom, asam amino yang dibawanya akan dipindahkan dan bergabung dengan rantai polipeptida yang sedang berkembang di situs P (peptidyl). Reaksi ini dibantu oleh enzim peptidil transferase yang ada di dalam ribosom. Setelah pengikatan asam amino, tRNA di situs P akan dipindahkan ke situs E (exit),

dan ribosom bergerak satu kodon lebih jauh, memungkinkan tRNA baru untuk memasuki situs A dan proses penggabungan asam amino berlanjut.

c) Terminasi Translasi

Translasi berakhir ketika ribosom mencapai salah satu dari tiga kodon stop pada mRNA (UAA, UAG, atau UGA). Kodon stop ini tidak memiliki tRNA yang sesuai, yang berarti tidak ada asam amino yang dibawa untuk bergabung dengan rantai polipeptida. Ketika kodon stop terdeteksi, faktor-faktor pelepasan (release factors) akan mengikat ribosom dan menyebabkan pemisahan rantai polipeptida dari tRNA di situs P. Rantai polipeptida yang telah terbentuk kemudian akan dilepaskan, dan ribosom akan terlepas dari mRNA. Proses ini menghasilkan protein yang siap untuk diproses lebih lanjut, seperti pelipatan dan modifikasi pasca-translasi, agar berfungsi sesuai dengan peran biologisnya dalam sel.

10. Rangkuman

Pencernaan protein dimulai di lambung dengan bantuan asam hidroklorat (HCl) yang mengubah lingkungan menjadi asam, memicu denaturasi protein menjadi struktur yang lebih sederhana. HCl juga mengaktifkan enzim pepsinogen menjadi pepsin, yang memecah protein menjadi polipeptida besar dan oligopeptida. Proses ini berlanjut ke usus halus, di mana hormon sekretin dan kolesistokinin merangsang pelepasan enzim pankreas seperti tripsin dan kimotripsin untuk menguraikan polipeptida menjadi asam amino bebas, dipeptida, dan tripeptida.

Produk akhir pencernaan diserap melalui usus halus. Asam amino melintasi membran usus dengan transport aktif yang bergantung pada natrium, sedangkan dipeptida dan tripeptida diserap menggunakan transporter PEPT1. Setelah itu, asam

amino diangkut ke hati melalui darah untuk metabolisme lebih lanjut, seperti sintesis protein, glukoneogenesis, atau energi.

Setelah penyerapan, asam amino dimetabolisme melalui proses transaminasi atau deaminasi untuk menghasilkan energi, glukosa, atau lipid. Gugus amino yang dilepaskan diubah menjadi urea melalui siklus urea untuk dikeluarkan dari tubuh. Rangka karbon asam amino digunakan dalam jalur metabolik seperti glukoneogenesis atau pembentukan badan keton, tergantung pada kebutuhan tubuh. Hati berperan penting dalam pengaturan ini, dengan sebagian besar energinya berasal dari oksidasi asam amino.

Biosintesis protein melibatkan dua tahap utama, yaitu transkripsi dan translasi. Transkripsi terjadi di inti sel, di mana DNA diubah menjadi mRNA melalui tiga langkah: inisiasi, elongasi, dan terminasi. RNA polimerase membuka heliks DNA dan menyusun untai mRNA yang komplementer dengan template DNA, yang kemudian diproses dengan penambahan 5'-cap, ekor poli-A, dan splicing. Translasi berlangsung di ribosom, di mana mRNA dibaca dalam kodon untuk menentukan urutan asam amino. tRNA membawa asam amino yang sesuai dengan kodon mRNA, dan ribosom menyusun rantai polipeptida melalui tiga tahap: inisiasi, elongasi, dan terminasi. Rantai polipeptida yang terbentuk kemudian mengalami pelipatan dan modifikasi pasca-translasi untuk menjadi protein fungsional.

11. Latihan dan Jawaban

- 1) Berikut adalah bagian dari saluran pencernaan yang berfungsi dalam metabolisme protein, yaitu
 - A. Mulut, lambung, usus halus, usus besar
 - B. Mulut, lambung, usus halus,
 - C. Lambung dan usus halus
 - D. Pankreas dan lambung

- 2) Proses penghilangan NH_4^+ untuk mentransfer kerangka karbon disebut dengan
 - A. Aminasi
 - B. Transaminasi
 - C. Deaminasi
 - D. Oksidasi
- 3) Produk sisa akhir dari proses deaminasi asam amino adalah NH_4^+ yang selanjutnya akan diproses melalui proses
 - A. Siklus asam sitrat
 - B. Transaminasi
 - C. Siklus urea
 - D. Glukoneogenesis
- 4) Kerangka karbon pada oksidasi asam amino akan diproses menjadi NADH, FADH, dan GTP dengan kemungkinan tahap yang dilalui, kecuali
 - A. Oksidasi melalui siklus TCA
 - B. Glukogenolisis
 - C. Glukoneogenesis
 - D. Ketogenesis
- 5) Berikut yang terjadi apabila seseorang menjalani diet tinggi protein secara terus menerus dan berlebihan
 - A. Kwasiorkor/ marasmus
 - B. Kekurangan vitamin
 - C. Tidak ada efek samping karena protein baik untuk pertumbuhan
 - D. Terjadi kerusakan pada ginjal
- 6) Produk akhir dari proses transaminasi yang dihasilkan dari transfer NH_4^+ pada alfa-ketoglutarat adalah
 - A. Benda keton
 - B. Piruvat
 - C. Alanin

- D. Glutamat
- 7) Produksi protein dalam sel salah satunya melalui proses transkripsi. Lokasi proses transkripsi pada DNA adalah di
- A. Sitoplasma
 - B. Nukleus
 - C. Ribosom
 - D. Membran sel
- 8) Berikut adalah tahapan dalam proses biosintesis protein
- A. Transkripsi (Inisiasi → elongasi → pembentukan mRNA, tRNA dan rRNA) dan dilanjutkan dengan translasi
 - B. Transkripsi (Elongasi→ inisiasi → pembentukan mRNA, tRNA dan rRNA) dan dilanjutkan dengan translasi
 - C. Translasi (Inisiasi → elongasi → pembentukan mRNA, tRNA dan rRNA) dan dilanjutkan dengan transkripsi
 - D. Translasi (Elongasi→ inisiasi → pembentukan mRNA, tRNA dan rRNA) dan dilanjutkan dengan transkripsi
- 9) RNA polimerase memiliki fungsi sebagai
- A. Mempertahankan untai tunggal DNA
 - B. Pembentukan dan pemanjangan rantai mRNA
 - C. Pemanjangan RNA primer
 - D. Membentuk fragmen Okazaki
- 10) Berikut adalah susunan basa DNA dan basa RNA komplementarinya
- A. G-A, C-T, A-G, T-C
 - B. G-U, C-G, A-U, T-A
 - C. G-C, C-G, A-T, T-A
 - D. G-T, T-G, A-C, C-A

Kunci Jawaban:

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

12. Daftar Pustaka

1. Mayes PA, Murray RK, Rand ML, Varghese J. Harper's Illustrated Biochemistry, 32nd Edition. McGraw Hill Education. 2023;
2. Shine B, Rostom H. Basic metabolism: proteins. *Surgery (Oxford)*. 2021 Jan;39(1):1–6.
3. Marchingo JM, Cantrell DA. Protein synthesis, degradation, and energy metabolism in T cell immunity. *Cell Mol Immunol*. 2022 Mar;19(3):303–15.
4. Harvey Lodish; Arnold Berk; Chris A. Kaiser; Monty Krieger; Anthony Bretscher; Hidde Ploegh; Kelsey C. Martin; Michael Yaffe; Angelika Amon. *Molecular Cell Biology*. W H Freeman. 2021;

BAB VII VIT LEMA

VITAMIN LARUT LEMAK (A, D, E, dan K)

Hastrin Hositanisita

Tujuan Instruksional Khusus

Setelah mengikuti bab ini diharapkan mahasiswa mampu :

1. Memahami dan menjelaskan struktur dan fungsi vitamin larut lemak
2. Memahami dan menjelaskan akibat kelebihan dan kekurangan vitamin larut lemak
3. Memahami dan menjelaskan jumlah vitamin larut lemak yang dibutuhkan dalam tubuh (RDA/AGK)
4. Memahami dan menjelaskan metabolisme vitamin larut lemak

1. VITAMIN A

1) Struktur Vitamin A

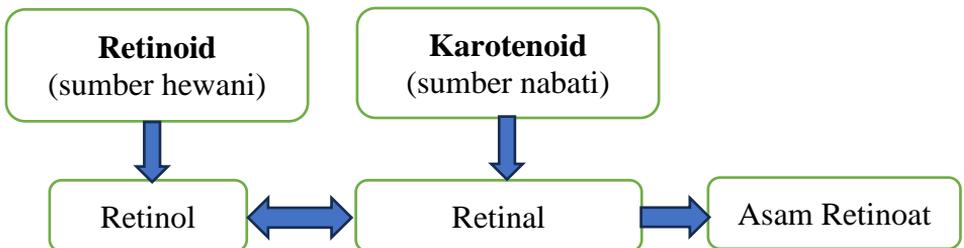
Vitamin A pertama kali diidentifikasi sebagai salah satu jenis vitamin yang esensial sebagai faktor pertumbuhan. Istilah vitamin A secara umum mengacu pada kelompok senyawa yang memiliki aktivitas biologi dari semua jenis trans-retinol. Secara umum vitamin A disebut dengan retinoid yang terdiri dari 3 jenis utama yaitu **retinol, retinal dan asam retinoat**. Senyawa vitamin A lebih banyak ditemukan pada makanan sumber hewani dalam bentuk retinol dan asam retinoat. Sedangkan jika didapatkan dari nabati, disebut karotenoid.

Karotenoid merupakan pigmen larut lemak berwarna merah, oranye dan kuning yang hanya ditemukan dalam makanan nabati atau tanaman. Secara umum terdapat kurang lebih 700 jenis

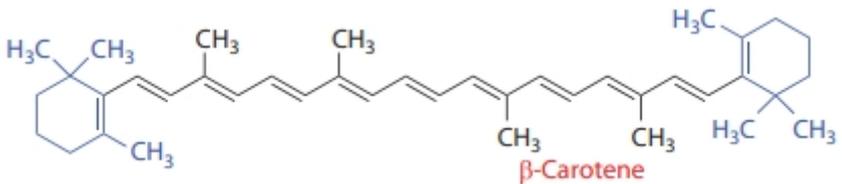
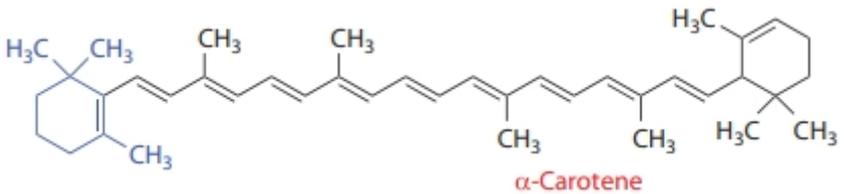
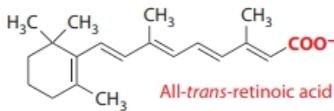
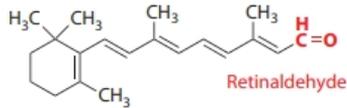
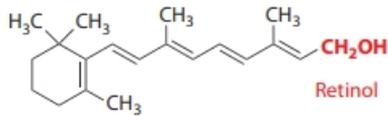
karotenoid, namun hanya sekitar 10% yang dikonsumsi sebagai makanan dan hanya 10 jenis karotenoid yang terdeteksi pada jaringan tubuh dan darah manusia. Jenis karotenoid yang umum dikenal diantaranya b-karoten, a-karoten, likopen, lutein, dan zeaxanthin. Karotenoid banyak ditemukan pada buah dan sayur yang berwarna mencolok seperti kuning, orange, merah, dan ungu.

Tiga jenis karotenoid yang bisa diubah menjadi retinal atau vitamin A di dalam tubuh dikenal dengan **provitamin A** yaitu b-karoten, a-karoten dan b-cryptoxanthin. Dari ketiga jenis provitamin A tersebut, b-karoten memiliki aktivitas tertinggi sebagai provitamin A. Beberapa jenis karotenoid lain yang penting bagi tubuh manusia namun bukan menjadi prekursor vitamin A disebut nonprovitamin A karotenoid yaitu likopen, canthaxanthin, lutein dan zeaxanthin.

Jenis-jenis vitamin A tersebut bisa dikonversi atau diubah menjadi jenis vitamin A yang lain seperti pada gambar 7.1. Retinal di dalam tubuh bisa diubah menjadi retinol dan asam retinoat, sedangkan asam retinoat dan retinol tidak bisa diubah menjadi jenis vitamin A yang lainnya. Adanya jenis vitamin A yang tidak bisa dikonversi menjadi jenis yang lain penting karena setiap jenis vitamin A memiliki fungsi khusus di dalam tubuh.



Gambar 7.1 Konversi retinoid menjadi beberapa bentuk



Gambar 7.2. Perbedaan Struktur Vitamin A

2) Fungsi Vitamin A

a. Penglihatan

Retina mata tersusun dari dua jenis sel utama yaitu rhodopsin dan iodopsin. Sel rhodopsin tersusun dari protein yang disebut dengan opsin dan vitamin A dalam bentuk cis-retinal. Sel rhodopsin berperan dalam menangkap cahaya yang masuk ke mata dan menghantarkan sinyal tersebut ke otak agar mampu melihat dengan jelas, terutama pada lingkungan yang minim cahaya. Ketika cahaya mengenai sel rhodopsin, opsin dilepaskan dan vitamin A dalam bentuk cis-retinal berubah menjadi trans-retinal, sinyal kemudian dikirimkan ke bagian

otak yang bertanggungjawab dalam penglihatan. Untuk kembali melihat dalam kondisi gelap, molekul rhodopsin harus dibentuk lagi menggunakan vitamin A dalam bentuk cis-retinal.

b. Ekspresi gen

Asam retinoat mengikat reseptor nukleus yang terikat

c. Diferensiasi sel, proliferasi dan pertumbuhan

Vitamin A terutama dalam bentuk asam retinoat dibutuhkan untuk proses diferensiasi sel. Diferensiasi sel merupakan proses dimana sel yang belum *mature* atau belum berubah menjadi sel yang lebih

d. Kekebalan tubuh

e. Antioksidan

Karotenoid memiliki fungsi sebagai antioksidan. Karotenoid banyak ditemukan pada membran sel yang tersusun dari lipoprotein.

3) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Vitamin A

Individu yang sehat dan cukup mengonsumsi vitamin A dari diet dan memiliki cadangan simpanan vitamin A di dalam tubuh bisa merasakan dampak kekurangan vitamin A dalam jangka waktu beberapa minggu sampai beberapa bulan jika kekurangan asupan vitamin A dari diet.

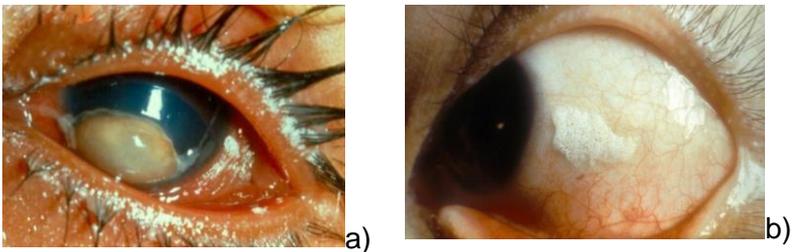
a. Kelebihan vitamin A

Kelebihan vitamin A atau hipervitaminosis A adalah kondisi dimana terlalu banyak vitamin A di dalam tubuh. Kondisi ini jarang terjadi jika hanya mengonsumsi makanan yang tinggi vitamin A, namun hipervitaminosis A lebih sering terjadi jika mengonsumsi suplemen. Kondisi toksisitas vitamin A kronis terjadi dalam jangka panjang jika secara rutin mengonsumsi vitamin A lebih dari 25.000 IU sehari. Gejala yang umum terjadi bervariasi namun yang paling sering diemui adalah penglihatan kabur, pandangan ganda, mual, nyeri tulang, perubahan pada

kesadaran, penurunan nafsu makan, pusing, kehilangan kesadaran dan berubah warna pada kulit termasuk bibir pecah-pecah, dan gatal.

b. Kekurangan Vitamin A

Kekurangan vitamin A sering terjadi karena kekurangan asupan vitamin A dalam jangka waktu panjang. Kondisi kekurangan vitamin A juga sering berhubungan dengan kondisi malnutrisi kurang energi dan protein. Selain kurangnya asupan vitamin A dari makanan, asupan lemak yang tidak adekuat atau malabsorpsi lemak, infeksi saluran pencernaan yang menyebabkan terjadinya diare dan gangguan liver menjadi beberapa faktor penyebab defisiensi vitamin A. Beberapa dampak kekurangan vitamin A adalah rabun senja dan Xerophthalmia.



Gambar 7.2. Xerophthalmia

4) Jumlah Vitamin A yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK)

Rekomendasi asupan vitamin A di dalam tubuh didasarkan pada kebutuhan ditambahkan koefisien variasi sekitar 20%. Kebutuhan vitamin A menurut Angka Kecukupan Gizi (AGK) tahun 2019 berdasarkan pada usia dan jenis kelamin serta kondisi tubuh terlihat pada tabel 1.

Kebutuhan vitamin A dituliskan sebagai satuan RAE (*Retinol Activity Equivalent*s) sebagai satuan terstandar, karena vitamin A

bisa didapatkan dari beberapa jenis aktivitas biologis yang berbeda seperti karotenoid, maka 1 µg RAE setara dengan :

- 1 µg retinol
- 2 µg suplemen b-karoten
- 12 µg b-karoten dari makanan
- 24 µg a-karoten dari makanan atau b-cryptoxanthin

Tabel 7.1. Kebutuhan Vitamin A Menurut AKG 2019

0 - 6 bulan	375
7 - 11 bulan	400
1 - 3 tahun	400
4 - 6 tahun	450
7 -9 tahun	500
Laki - laki (10 - 80th)	600
Perempuan (10 - 18 tahun)	600
Perempuan (19 - 80 tahun)	500
Ibu Hamil trimester 1 dan 2	+ 300
Ibu Hamil trimester 3	+ 350
Ibu Menyusui	+ 350

5) Metabolisme Vitamin A

a. Pencernaan dan Absorpsi

Vitamin A didalam makanan terikat dengan komponen atau senyawa lainnya. Sehingga butuh dicerna dan membutuhkan enzim sebelum bisa diabsorpsi di usus halus. Karotenoid dan retinil ester dihidrolisis dari protein oleh pepsin di lambung. Enzim proteolitik di dalam duodenum juga membantu proses hidrolisis retinil ester dan karotenoid lain yang masih belum dicerna di dalam lambung. Selain itu, beberapa enzim juga berperan dalam proses pelepasan retinil ester dan karotenoid

yang masih terikat dalam makanan yaitu enzim lipase pankreas, retinil ester hidrolase dan enzim fosfolipase.

Absorpsi vitamin A dan karotenoid terdapat pada usus halus dan terjadi penyerapan yang paling cepat di duodenum dan jejunum. Efisiensi absorpsi antara vitamin A dan karotenoid berbeda. Makanan yang mengandung vitamin A atau retinol akan diserap sekitar 70 – 90% selama makanan mengandung lemak (5 – 10 gram). Penyerapan b-karoten di dalam tubuh lebih sedikit, sekitar 20 - 50% bahkan bisa <5%. Penyerapan b-karoten di dalam tubuh bervariasi tergantung dari bentuk makanan tersebut. Beberapa faktor yang meningkatkan penyerapan b-karoten di dalam tubuh adalah faktor pengolahan (makanan dikonsumsi dalam bentuk matang), adanya lemak di dalam makanan, dan tingkat kandungan karoten di dalam makanan. Mengonsumsi sumber b-karoten tanpa dibarengi dengan konsumsi lemak yang cukup mengurangi tingkat penyerapan di dalam tubuh.

b. Metabolisme dan sistem transport

a) Metabolisme vitamin A

b) Metabolisme b-karoten dan karotenoid

Karena karotenoid merupakan prekursor atau bukan bentuk aktif vitamin A di dalam tubuh, maka sintesis vitamin A dari karotenoid melibatkan 2 jenis enzim utama

c) Sistem transport

c. Penyimpanan

Liver menjadi organ utama penyimpanan vitamin A di dalam tubuh. Terdapat dua jenis sel utama yang menyusun liver, yaitu sel parenkim atau sel hepatosit dan sel stromal hepatik. Sel hepatosit menyusun 2/3 sel utama di dalam liver, namun simpanan vitamin A pada sel hepatosit hanya 10% - 10%. Sebagian besar vitamin A (80% - 90%) disimpan di sel stromal hepatik.

d. Ekskresi

Ekskresi vitamin A utamanya melalui urin sekitar 60% dan 40% melalui feses. Sebagian kecil vitamin A juga diekskresi melalui paru-paru dalam CO₂.

6) Sumber Vitamin A

Makanan sumber vitamin A dibagi ke dalam dua jenis, yaitu vitamin A dan b-karoten.

Tabel 7.2. Makanan Sumber Vitamin A

Sumber hewani	Vitamin A (µg RAE)	Sumber nabati	b-karoten (mg)
Hati ayam		Bayam	
Susu		Wortel	
Telur		Ubi kuning	
Hati sapi		Ubi ungu	
		Mangga	
		Pumpkin	
		Pepaya	
		Tomat	

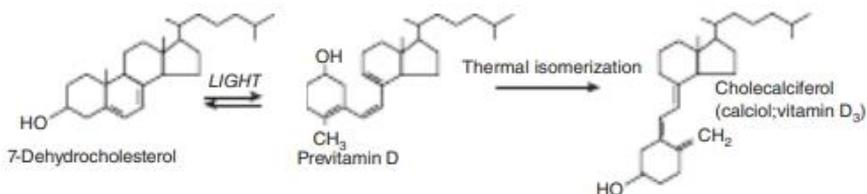
2. VITAMIN D

1) Struktur Vitamin D

Vitamin D memiliki beberapa struktur, vitamin D yang berasal dari sumber nabati atau vitamin D₂ (ergosterol) dan sumber hewani yaitu vitamin D₃ (kolekalsiferol), serta prekusornya yaitu 7-dehidrokolesterol. 7-dehidrokolesterol diturunkan dari kolesterol dan dibuat pada kelenjar minyak (*sebaceous glands*) pada kulit. Beberapa bentuk vitamin D dari makanan, endogen dan bentuk aktif di dalam tubuh diantaranya :

- 7-dehydrocholecalciferol (di dalam kulit)
- 25-hydroxy cholecalciferol (sumber hewani)

- 1, 25-dihydroxycholecalciferol (sumber hewani)
- Vitamin D₂ atau ergocalciferol/pre-vitamin D (sumber nabati)
- 25-hydroxy (25-OH D₃) atau calcidiol (disintesis di liver)
- 1,25 dihydroxyvitamin D₃ (1-25 - (OH)₂D₃) atau calcitriol (bentuk aktif diseintesis di ginjal)



Gambar 7.3 Proses sintesis vitamin D endogen dengan paparan UVB

2) Fungsi Vitamin D

Fungsi utama vitamin D adalah dalam mengontrol dan homeostasis kalsium.

3) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Vitamin D

a. Kelebihan vitamin D

Jumlah *Tolerable Upper Intake* vitamin D adalah 100 µg untuk anak 9 tahun ke atas, remaja dan dewasa. Jumlah vitamin D yang dikonsumsi dari makanan dan diproduksi dari kulit adalah dalam batas yang aman, namun konsumsi dari suplemen perlu diperhatikan.

Kelebihan asupan vitamin D bisa menyebabkan beberapa dampak negatif seperti meningkatnya konsentrasi kalsium dalam darah yang berakibat terbentuknya batu ginjal dan mengerasnya pembuluh darah terutama di arteri otak, jantung, dan paru-paru. Kondisi mengerasnya pembuluh darah ini bisa memicu kematian.

b. Kekurangan vitamin D

Karena vitamin D bisa disintesis secara alami oleh tubuh jika terpapar sinar UVB, maka penggunaan sunblock yang berlebihan dan memiliki gangguan fungsi ginjal bisa berisiko kekurangan vitamin D. Kondisi akibat kekurangan vitamin D :

- Rickets
Rickets atau riketsia adalah kondisi dimana terjadi penurunan mineralisasi tulang epifisel, menyebabkan
- Osteomalacia
Kondisi ini terjadi pada orang dewasa dan anak yang sudah lebih besar. Osteomalasia terjadi karena kegagalan proses mineralisasi atau penurunan mineralisasasi dari tulang yang sudah terbentuk.
- Osteoporosis

4) Jumlah Vitamin D yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGG)

Pada manusia, vitamin D₃ bisa diproduksi dari 7-dehidrokolesterol saat kulit bagian epidermis terkena sinar UVB (290-315 nm). Jika seseorang secara reguler terpapar sinar UVB, maka vitamin D₃ bisa diproduksi secara endogen dan memungkinkan untuk tidak membutuhkan vitamin D dari makanan. Vitamin D yang diproduksi di kulit dilepaskan secara cepat ke sirkulasi darah. Paparan sinar matahari, atau UVB, selama 15 – 30 menit pada kulit antara jam 10.00 – 15.00 bisa memproduksi sekitar 250 – 300 µg. Kadar vitamin D ini setara 100x lipat dari susu yang difortifikasi (2,5 µg).

Kebutuhan vitamin D bervariasi pada beberapa kelompok umur. Selain itu, produksi alami vitamin D dari paparan sinar UVB juga dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti warna kulit dan daerah tempat tinggal. Daerah dengan latitude 40^o lintang utara maupun selatan akan sangat sedikit terpapar sinar UV terutama saat musim dingin.

Jumlah kebutuhan vitamin D tergantung usia, menurut AKG tahun 2019, kebutuhan vitamin D untuk bayi usia 0-12 bulan adalah 5 µg, usia 1 – 64 tahun adalah 15 µg dan usia di atas 64 tahun adalah 20 µg.

Kebutuhan vitamin juga bisa dihitung menggunakan satuan international unit (IU) :

$$1 \text{ IU} = 0,025 \text{ } \mu\text{g cholecalciferol}$$

$$\text{Misal } 100 \text{ IU} = 2,5 \text{ } \mu\text{g} (100 \times 0,025 \text{ } \mu\text{g})$$

5) Metabolisme Vitamin D

a. Pencernaan dan absorpsi

Vitamin D dari makanan tidak membutuhkan proses pencernaan khusus. Vitamin D bisa diabsorpsi langsung setelah terbentuk misel yang terbentuk dari lemak yang dicerna, kemudian melewati lumen dan enerosit usus halus. Proses absorpsi vitamin D terjadi secara difusi pasif pada sel-sel pencernaan. Vitamin D dari makanan akan diabsorpsi sekitar 50%. Proses absorpsi terjadi di duodenum, jejunum dan ileum, namun paling banyak diabsorpsi di jejunum dan ileum. Vitamin D diabsorpsi bersamaan dengan lemak dalam makanan sehingga membutuhkan garam empedu dan enzim-enzim yang berhubungan dengan pencernaan lemak lainnya.

b. Metabolisme

a) Metabolisme dan sistem trasport

Setelah diabsorpsi pada sel pencernaan, vitamin D akan terikat ke dalam kilomikron bersama dengan vitamin larut lemak lainnya. Kilomikron mentransportasikan vitamin D yang berasal dari diet atau makanan ke jaringan nonhepatik di seluruh tubuh. Kulit yang terpapar sinar UVB bisa mengubah 7-dehidrokolesterol pada permukaan kulit menjadi kolekalsiferol dan senyawa ini kemudian dimetabolisme oleh ginjal untuk memproduksi 1,25

dihidroksikalsiferol, senyawa vitamin D dalam bentuk yang lebih aktif.

Setelah diabsorpsi, di dalam sel pencernaan, vitamin D akan bergabung dengan kilomikron kemudian ditransportasikan ke sistem limfatik. Kilomikron menjadi senyawa yang mengangkut 40% kolekalsiferol di dalam darah. Kilomikron remnant (sisa) mengangkut vitamin ke liver, kemudian dihidroksilasi oleh enzim sitokrom P450 hidroksilase untuk membentuk vitamin D dalam bentuk aktif dalam bentuk 25-hydroxy kolekalsiferol (25-OH D₃) atau disebut dengan calcidiol.

Setelah disintesis di liver, calcidiol disekresi dari liver dan sekitar 85-90% calcidiol di dalam darah terikat dan ditransportasikan oleh Vitamin D – *Binding Protein* (VDBP), 10-15% akan terikat pada albumin dan <1% berada dalam kondisi bebas atau tidak terikat.

Dalam sirkulasi darah, 25-OH D-VDBP akan diambil oleh ginjal dan difiltrasi oleh glomerulus. Calcidiol di ginjal akan dikonversi menjadi bentuk aktif lain yaitu 1,25 dihydroxycholecalciferol atau disebut dengan calcitriol. Calcitriol ini kemudian dilepaskan ke dalam darah dan terikat oleh VDBP dan ditransportasikan ke beberapa jaringan tubuh seperti saluran pencernaan, tulang, jantung, otot, sel beta pankreas, otak, kulit, kolom prostat, payudara, sistem syaraf an sistem kekebalan tubuh.

b) Penyimpanan

Vitamin D akan disimpan dalam jaringan adiposa atau jaringan lemak. Seseorang dalam status gizi overweight atau obesitas bisa menyimpan vitamin D di jaringan adiposa dibandingkan yang lebih kurus. Selain itu, vitamin D juga bisa ditemukan di otot dalam jumlah yang lebih sedikit.

c) Ekskresi

Metabolit vitamin D diekskresi utamanya melalui garam empedu kemudian dikeluarkan via feces. Ekskresi melalui urin juga terjadi namun dalam jumlah yang lebih sedikit (<30%).

d) Sumber vitamin D

Seperti dijelaskan sebelumnya, vitamin D bisa diproduksi oleh tubuh dengan paparan sinar UVB. Paparan sinar matahari selama 5 – 10 menit pada tangan, wajah dan lengan saat matahari cerah di siang hari selama 2 – 3x sehari bisa mempertahankan kebutuhan vitamin D.

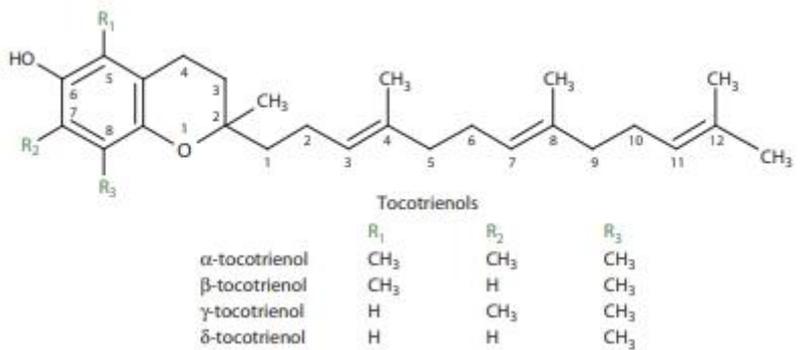
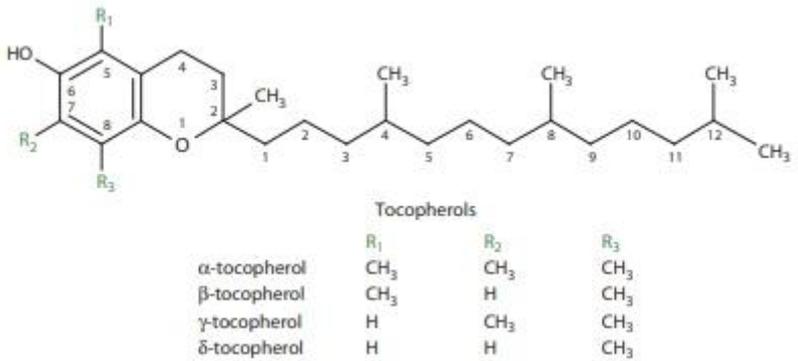
Beberapa jenis makanan yang mengandung vitamin D seperti pada tabel berikut :

Kuning telur	4,9- 5,4
Liver	1,2
Telur	1,8 – 2,05
Dada ayam	0,1

3. VITAMIN E

1) Struktur Vitamin E

Vitamin E terbagi ke dalam dua jenis utama yaitu Tocopherol yang memiliki ikatan jenuh dengan 16 karbon dan Tocotrienol yang tersusun dari ikatan tak jenuh dengan 16 karbon. Setiap jenis vitamin E memiliki lokasi dan jumlah gugus metil yang berbeda, yaitu a, b, g, atau d. Namun, hanya jenis a-tocopherol yang memiliki aktivitas biologis dan bisa digunakan oleh tubuh.



2) Fungsi Vitamin E

3) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Vitamin E

4) Jumlah Vitamin E yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK)

Tabel 7.3. Jumlah Vitamin E yang Dibutuhkan Menurut AGK

Usia	Kebutuhan mg/hari
0 - 6 bulan	4
7 - 11 bulan	5
1 - 3 tahun	6
4 - 6 tahun	7
7 - 9 tahun	7
Laki - laki (10 - 12 th)	1
Laki - laki (13 - 15 th)	12

Laki - laki >16 th	15
Prempuan (10-12 th)	11
Perempuan >12 tahun	15
Menyusui	+4

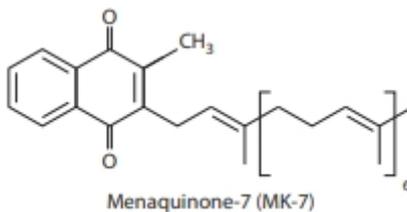
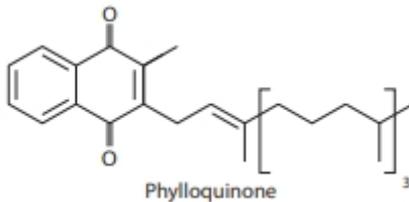
5) Metabolisme

- Pencernaan dan absorpsi
- Transport
- Penyimpanan
- Ekskresi
- Sumber makanan

4. VITAMIN K

a. Struktur Vitamin K

Vitamin K terdapat dalam dua bentuk utama yaitu Phylloquinone (vitamin K1) yang ditemukan dalam makanan nabati dan menaquinones (vitamin K2) yang diperoleh dari sumber hewani dan sintesis alami dari bakteri di saluran pencernaan.



Gambar 7.4. Struktur Vitamin K

b. Fungsi Vitamin K

a) Mineralisasi tulang

Vitamin K berperan dalam metabolisme osteokalsin. Tanpa vitamin K, osteokalsin tidak bisa terikat pada mineral yang membentuk tulang, memicu rendahnya kepadatan tulang.

b) Pembekuan darah

Proses pembekuan darah terdiri dari 4 fase utama, yaitu 1) pembentukan tromboplastin; 2) aktivasi tromboplastin; 3) pembentukan trombin, dan 4) pembentukan fibrin.

c. Akibat Kelebihan dan Kekurangan Vitamin K

a) Akibat kelebihan vitamin K

Belum diketahui adanya dampak kesehatan atau toksisitas dari bentuk alami vitamin K₁ maupun K₂. Vitamin K₂ sintetis ditemukan bisa memicu terjadinya anemia hemolitik dan hiperbilirubemia jika diberikan lebih dari 5 mg/hari pada bayi.

b) Akibat kekurangan vitamin K

Kondisi defisiensi vitamin K relatif jarang ditemukan pada orang dewasa sehat dan jarang karena faktor kurang asupan dari makanan. Kekurangan vitamin K disebabkan karena faktor lain yaitu, adanya gangguan absorpsi lemak, terutama jika terjadi kurangnya produksi garam empedu, maka absorpsi vitamin K berkurang. Faktor kedua adalah karena mengonsumsi obat-obatan yang mengganggu sintesis alami vitamin K, seperti antibiotik membuath bakteri yang bisa memproduksi vitamin K dalam saluran pencernaan dan obat antikoagulan akan menghambat aktivitas dan metabolisme vitamin K.

Bayi baru lahir juga berisiko kekurangan vitamin K karena kondisi saluran pencernaannya masih steril dari bakteri yang memproduksi vitamin K, dan membutuhkan waktu beberapa minggu untuk bisa memproduksi sendiri. Pada bayi baru lahir, biasanya kan diberikan suntukan vitamin K untuk mencegah

perdarahan karena pada bayi, konsentrasi plasma prothrombin juga rendah dan berisiko terjadi perdarahan.

d. Jumlah yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AKG)

e. Metabolisme Vitamin K

a) Pencernaan dan Absorpsi

Vitamin K₁ tidak membutuhkan proses pencernaan khusus. Absorpsi vitamin K dimulai di usus halus, terutama bagian jejunum. Seperti halnya vitamin larut lemak lainnya, vitamin K₁ dan vitamin K₂ akan bergabung dengan misel di dalam lumen usus halus bersamaan dengan garam empedu, lemak yang sudah dicerna dan vitamin larut lemak lainnya. Vitamin K dari makanan, seperti bayam, hanya diabsorpsi sekitar 4% -17%.

b) Transport

Setelah diabsorpsi dalam enterosit, vitamin K bergabung dengan kilomikron yang membawa vitamin ke sistem limfatik dan membawanya ke jaringan yang membutuhkan vitamin K. Phylloquinone adalah bentuk vitamin yang ada bersikulasi di dalam darah, walaupun juga terdapat menaquinone dalam jumlah yang lebih sedikit.

f. Penyimpanan Vitamin K

Vitamin K₁ paling banyak disimpan di liver dan membran sel serta beberapa jaringan termasuk paru-paru, ginjal, sum-sum tulang, pankreas, jantung, orak dan kelenjar adrenal. Sedangkan vitamin K₂ banyak ditemukan terutama di pankrea, ginjal, kelenjar saliva, otak dan tulang.

g. Ekskresi Vitamin K

h. Sumber Makanan Vitamin K

Seperti diketahui sebelumnya, vitamin K dapat didapatkan dari produk nabati, hewani maupun diproduksi sendiri melalui bantuan mikroba pencernaan. Makanan yang banyak mengandung vitamin K1 adalah sayuran berdaun hijau seperti bayam, bokoli, dan kale. Vitamin K yang berasal dari minyak nabati akan diabsorpsi lebih baik daripada nabati. Menaquinone, terutama MK-6 – MK-11, diproduksi dari bakteri anaerob di dalam saluran pencernaan tubuh. Beberapa jenis bakteri tersebut adalah *Bacteroides*, *Bacillus fragilis*, *Eubacterium*, *Propionibacterium* dan *Arachnia*. Namun, sintesis vitamin K dari bakteri ini belum bisa memenuhi kebutuhan tubuh sehingga perlu ditambah dari asupan makanan. Selain itu, makanan yang diferemntasi juga banyak mengandung menaquinone seperti yogurt, keju, natto

5. Rangkuman

Vitamin larut lemak terdiri dari vitamin A, D, E dan K. Vitamin A, D dan K akan disimpan di liver jika dikonsumsi dalam jumlah berlebih, sedangkan vitamin E akan diekskresi melalui feces jika dikonsumsi berlebih. Semua vitamin larut lemak akan terikat pada protein spesifik pengikatnya untuk ditransportasikan ke seluruh tubuh.

6. Latihan dan Jawaban

- 1) Mengapa absorpsi vitamin larut lemak umumnya terjadi di usus halus bagian jejunum atau ileum?

Jawaban: Karena vitamin larut lemak terikat dengan senyawa lemak di dalam makanan, sehingga proses pelepasannya membutuhkan proses pencernaan yang membutuhkan keterlibatan enzim-enzim yang menghidrolisis lemak. Kondisi ini juga membutuhkan bantuan garam empedu untuk menetralkan makanan setelah dari lambung karena adanya

asam klorida. Proses pencernaan lemak lebih kompleks terjadi setelah terhidrolisis oleh enzim yang berasal dari pankreas atau enzim lipase pankreas.

- 2) Semua vitamin larut lemak memiliki senyawa pembawa atau transporter yang sama sesaat setelah diabsorpsi yaitu
 - A. Lemak
 - B. Kilomikron
 - C. VLDL
 - D. HDL
 - E. Protein
- 3) Jenis vitamin A yang berfungsi untuk penglihatan adalah
 - A. Retinol
 - B. Asam retinoat
 - C. Retinal
 - D. Karotenoid
 - E. Retinoat
- 4) Asupan vitamin A dari karotenoid makanan akan dikonversi menjadi vitamin A lebih sedikit. Jika seseorang mengonsumsi 1000 μg karotenoid, berapakah jumlah vitamin A yang bisa dikonversi menjadi vitamin A?
 - A. 83,33 μg RAE
 - B. 500 μg RAE
 - C. 1000 μg RAE
 - D. 41,67 μg RAE
 - E. Salah semua
- 5) Beberapa faktor yang mempengaruhi produksi endogen vitamin D, kecuali
 - A. Warna kulit
 - B. Ketinggian
 - C. Polusi udara
 - D. Jenis sinar UV
 - E. Kesehatan liver dan ginjal

Kunci Jawaban:

2 B, 3 C, 4 A, 5 D

7. Daftar Pustaka

- Marriott, B. P., Birt, D. F., Stallings, V. A., & Yates, A. A. (2020). *Present Knowledge in Nutrition Basic Nutrition and Metabolism* (11th ed., Vol. 1). Elsevier Inc.
- Berdanier, Carolyn D and Berdanier, Lynnette A. (2021). *Advanced Nutrition: Macronutrients, Micronutrients, and Metabolism* (3rd edition). CRC Press
- Gropper, Sareen S., Smith, Jack.L., & Carr, Timothy P. (2022). *Advanced Nutrition and Human Metabolism* (8th Edition). Cengage Learning Inc.
- Whitney, Ellie & Rolfes, Sharon Rady. (2019). *Understanding Nutrition* (15th Edition). Cengage Learning Inc.

BAB VIII VI dan C

VITAMIN LARUT AIR (B dan C)

B

Effatul Afifah

Tujuan Instruksional Khusus

Setelah mengikuti bab ini diharapkan mahasiswa mampu :

1. Memahami dan menjelaskan struktur dan fungsi vitamin larut lemak
2. Memahami dan menjelaskan akibat kelebihan dan kekurangan vitamin larut lemak
3. Memahami dan menjelaskan jumlah vitamin larut lemak yang dibutuhkan dalam tubuh (RDA/AKG)
4. Memahami dan menjelaskan metabolisme vitamin larut lemak

1. PENGANTAR

Vitamin adalah zat organik yang terdapat dalam makanan yang diperlukan si kecil jumlah yang diperlukan untuk fungsi normal tubuh. Ada tiga belas yang diketahui vitamin dalam nutrisi manusia dibagi menjadi dua kelompok menurut mereka kelarutan. Vitamin yang larut dalam air terdiri dari vitamin kelompok B (tiamin, riboflavin, niasin, vitamin B6, asam pantotenat, biotin, folat, dan vitamin B12) dan vitamin C. Vitamin yang larut dalam air bertindak sebagai koenzim dan terlibat dalam banyak reaksi

biokimia seperti metabolisme energi, metabolisme asam amino, biosintesis amino asam, asam lemak, dan gula pentosa, sintesis DNA, dan transfer unit satu karbon dan berfungsi sebagai antioksidan dalam banyak biokimia reaksi (1). Vitamin B terdiri dari delapan jenis yang secara kolektif dikenal sebagai vitamin B kompleks. Setiap jenis vitamin B memiliki peran spesifik dalam metabolisme tubuh manusia. Vitamin B berperan penting dalam membantu tubuh memecah dan memanfaatkan energi dari makanan, khususnya karbohidrat, lemak, dan protein (2)

Fungsi Vitamin B dalam Metabolisme

Vitamin B kompleks secara keseluruhan berfungsi sebagai koenzim yang membantu enzim dalam proses metabolisme energi. Beberapa jenis vitamin B memiliki peran yang lebih spesifik dalam metabolisme energi. Misalnya, vitamin B1 (tiamin) berperan dalam dekarboksilasi oksidatif piruvat, yang merupakan langkah penting dalam siklus asam sitrat, sementara vitamin B2 (riboflavin) dan B3 (niasin) merupakan komponen penting dari koenzim FAD dan NAD, yang berfungsi sebagai pembawa elektron dalam reaksi oksidatif, beberapa vitamin B Komplek menurut Shareen (2).

- a. Tiamin (Vitamin B1) Tiamin berperan dalam metabolisme karbohidrat, terutama dalam proses perubahan glukosa menjadi energi. Dalam bentuk *tiamin pyrophosphate* (TPP), vitamin ini bekerja sebagai koenzim dalam dekarboksilasi oksidatif piruvat menjadi asetil-KoA di mitokondria. Ini adalah langkah penting dalam siklus Krebs, yang menghasilkan ATP sebagai sumber energi utama tubuh.
- b. Riboflavin (Vitamin B2) Riboflavin, dalam bentuk koenzim flavin mononucleotide (FMN) dan flavin adenine dinucleotide (FAD), terlibat dalam berbagai reaksi redoks dalam tubuh, termasuk siklus Krebs dan rantai transpor

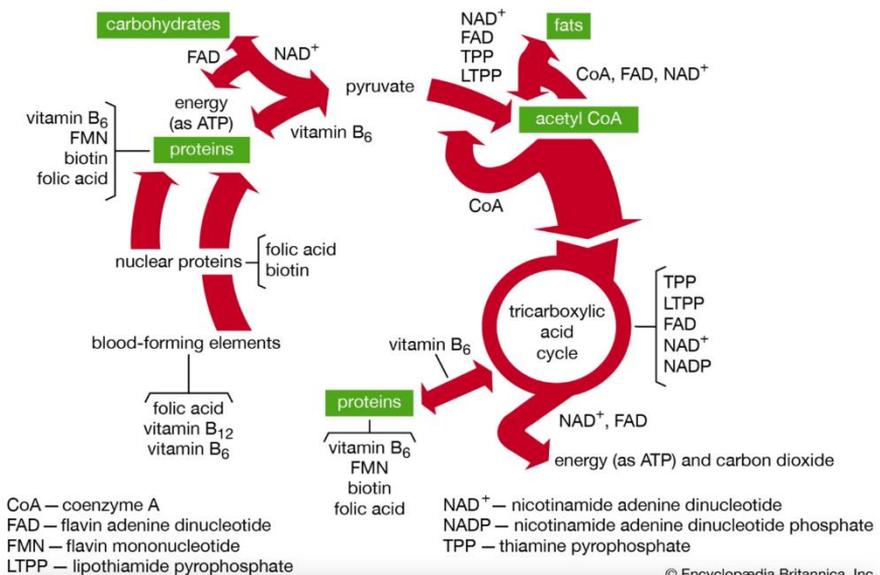
elektron. Vitamin B2 penting untuk oksidasi asam lemak dan asam amino, serta produksi ATP melalui fosforilasi oksidatif.

- c. Niasin (Vitamin B3) Niasin, dalam bentuk koenzim NAD dan NADP, berperan dalam metabolisme energi, terutama dalam glikolisis, siklus asam sitrat, dan rantai transpor elektron. NAD bertindak sebagai akseptor elektron dalam proses oksidasi karbohidrat, lemak, dan protein, sedangkan NADP terlibat dalam reaksi biosintetik, seperti sintesis asam lemak.
- d. Asam Pantotenat (Vitamin B5) Asam pantotenat adalah bagian integral dari koenzim A (CoA), yang terlibat dalam transfer gugus asetil di seluruh jalur metabolisme energi, seperti oksidasi asam lemak, siklus Krebs, dan sintesis asam lemak.
 - 1) Piridoksin (Vitamin B6) Vitamin B6 dalam bentuk aktifnya, piridoksal fosfat (PLP), terlibat dalam metabolisme asam amino, termasuk transaminasi, deaminasi, dan dekarboksilasi. PLP juga berfungsi dalam glukoneogenesis dan glikogenolisis, proses yang penting untuk mempertahankan kadar glukosa darah yang stabil.
 - 2) Biotin (Vitamin B7) Biotin adalah koenzim yang berperan dalam karboksilasi, seperti dalam pembentukan oksaloasetat dari piruvat dan sintesis asam lemak. Selain itu, biotin juga penting untuk metabolisme asam lemak dan protein.
 - 3) Folasin (Vitamin B9) Folasin, atau asam folat, terlibat dalam transfer satu karbon yang diperlukan untuk sintesis DNA, RNA, dan protein. Ini juga berperan dalam konversi homosistein menjadi metionin, yang penting untuk metabolisme protein dan replikasi sel.

- 4) Kobalamin (Vitamin B12) Vitamin B12 penting untuk fungsi sistem saraf dan pembentukan darah, serta berperan dalam metabolisme asam lemak dan asam amino. Vitamin B12 membantu dalam konversi homosistein menjadi metionin dan terlibat dalam siklus metilasi yang penting untuk sintesis DNA dan perbaikan sel.

1) Mekanisme Kerja Vitamin B dalam Tubuh

Setiap vitamin B bekerja sebagai kofaktor atau koenzim dalam berbagai reaksi metabolik tubuh, yang memfasilitasi konversi nutrisi menjadi energi. Mekanisme utama vitamin B dalam metabolisme melibatkan partisipasi mereka dalam proses enzimatik, yang membantu mempercepat reaksi kimia di dalam sel. Sebagai contoh, vitamin B1 membantu dalam dekarboksilasi oksidatif piruvat, sedangkan vitamin B6 terlibat dalam konversi asam amino menjadi komponen yang dapat digunakan untuk energi. Vitamin B kompleks juga berperan penting dalam biosintesis asam lemak, sintesis protein, dan regenerasi sel (2).



Gambar 8.1. Metabolisme Vitamin B dalam Tubuh

Sebagian besar vitamin B diserap di usus halus, khususnya di duodenum dan jejunum. Vitamin yang larut dalam air diserap di usus, langsung masuk ke darah, dan dibawa ke jaringan di mana vitamin tersebut akan dimanfaatkan. Vitamin B berperan sebagai koenzim akan bergabung dengan enzim spesifik untuk mendukung proses metabolisme seperti dekarboksilasi oksidatif, transfer elektron, dan karboksilasi. Misalnya, vitamin B6 diubah menjadi *piridoksal 5'-fosfat (PLP)*, yang merupakan bentuk aktifnya yang terlibat dalam metabolisme glikogen.

Vitamin B12 membutuhkan zat yang disebut faktor intrinsik agar dapat diserap. Beberapa vitamin B dapat terbentuk dalam bentuk yang tidak dapat digunakan. Sebagian besar niasin dalam beberapa biji-bijian sereal (gandum, jagung, beras, barley, dedak), misalnya, terikat pada zat lain, membentuk kompleks yang disebut niacytin yang tidak dapat diserap di usus hewan. Biotin dapat diikat oleh protein avidin yang terdapat pada putih telur mentah; kompleks ini juga tidak dapat diserap atau dipecah oleh enzim saluran pencernaan, sehingga biotin tidak dapat dimanfaatkan. Dalam produk hewani (misalnya daging), biotin, vitamin B6, dan asam folat terikat dengan molekul lain untuk membentuk molekul kompleks atau terkonjugasi; Meskipun tidak ada yang aktif dalam bentuk kompleks, ketiga vitamin tersebut biasanya dilepaskan dari bentuk terikatnya oleh enzim saluran usus (untuk biotin dan vitamin B6) atau di jaringan (untuk asam folat) sehingga dapat dimanfaatkan. Vitamin B didistribusikan di sebagian besar jaringan metabolisme tumbuhan dan hewan (1).

Vitamin yang larut dalam air biasanya diekskresikan melalui urin manusia. Tiamin, riboflavin, vitamin B6, vitamin C, asam pantotenat, dan biotin muncul dalam urin sebagai vitamin bebas (bukan sebagai koenzim); namun, sedikit niasin bebas yang diekskresikan melalui urin. Produk (juga disebut metabolit) yang

terbentuk selama metabolisme thiamin, niacin, dan vitamin B6 juga muncul dalam urin. Metabolit biotin, riboflavin, dan asam pantotenat urin juga terbentuk. Ekskresi vitamin-vitamin ini (atau metabolitnya) rendah ketika asupan cukup untuk fungsi tubuh yang baik. Jika asupan mulai melebihi kebutuhan minimal, kelebihan vitamin disimpan di jaringan. Namun, kapasitas penyimpanan jaringan terbatas, dan ketika jaringan menjadi jenuh, laju ekskresi meningkat tajam. Berbeda dengan vitamin larut air lainnya, vitamin B12 hanya dikeluarkan melalui tinja. Beberapa asam folat dan biotin juga biasanya diekskresikan dengan cara ini. Meskipun ekskresi vitamin yang larut dalam air (selain vitamin B12, asam folat, dan biotin) terjadi melalui feses, kemungkinan besar sumbernya adalah bakteri usus yang mensintesis vitamin tersebut, bukan vitamin yang telah dimakan dan dimanfaatkan (1).

Vitamin yang larut dalam air biasanya diekskresikan melalui urin manusia. Tiamin, riboflavin, vitamin B6, vitamin C, asam pantotenat, dan biotin muncul dalam urin sebagai vitamin bebas (bukan sebagai koenzim); namun, sedikit niacin bebas yang diekskresikan melalui urin. Produk (juga disebut metabolit) yang terbentuk selama metabolisme thiamin, niacin, dan vitamin B6 juga muncul dalam urin. Metabolit biotin, riboflavin, dan asam pantotenat urin juga terbentuk. Ekskresi vitamin-vitamin ini (atau metabolitnya) rendah ketika asupan cukup untuk fungsi tubuh yang baik. Jika asupan mulai melebihi kebutuhan minimal, kelebihan vitamin disimpan di jaringan. Namun, kapasitas penyimpanan jaringan terbatas, dan ketika jaringan menjadi jenuh, laju ekskresi meningkat tajam. Berbeda dengan vitamin larut air lainnya, vitamin B12 hanya dikeluarkan melalui tinja. Beberapa asam folat dan biotin juga biasanya diekskresikan dengan cara ini. Meskipun ekskresi vitamin yang larut dalam air (selain vitamin B12, asam folat, dan biotin) terjadi melalui feses,

kemungkinan besar sumbernya adalah bakteri usus yang mensintesis vitamin tersebut, bukan vitamin yang telah dimakan dan dimanfaatkan oleh hewan (1).

2) Sumber Vitamin B

Vitamin B dapat ditemukan dalam berbagai makanan, terutama yang berasal dari hewan dan tumbuhan. Misalnya, daging, ikan, unggas, biji-bijian, kacang-kacangan, dan sayuran hijau merupakan sumber utama vitamin B. Kobalamin, atau vitamin B12, hanya ditemukan dalam makanan asal hewan seperti daging, ikan, dan produk susu.

3) Mekanisme Aksi Vitamin B

Vitamin B umumnya bertindak sebagai koenzim dalam reaksi enzimatik yang penting untuk metabolisme nutrien. Sebagai contoh, thiamin diperlukan untuk enzim dekarboksilase dalam siklus asam sitrat, sementara niacin berperan dalam bentuk NAD dan NADP sebagai koenzim dalam reaksi redoks. Vitamin B6, dalam bentuk aktifnya PLP, terlibat dalam metabolisme asam amino, sementara kobalamin membantu dalam reaksi metilasi. Dengan demikian, vitamin B memiliki peran esensial dalam menjaga fungsi tubuh yang normal, terutama terkait dengan metabolisme energi dan sintesis komponen-komponen penting tubuh seperti DNA, RNA, dan sel darah (2,3).

2. VITAMIN B1 (TIAMIN)

1) Definisi Vitamin B1 (Tiamin)

Vitamin B1, yang juga dikenal sebagai tiamin, adalah salah satu vitamin esensial yang larut dalam air dan memiliki peran penting dalam metabolisme energi. Tiamin pertama kali diidentifikasi pada akhir abad ke-19, ketika kekurangan vitamin ini dihubungkan

dengan penyakit beri-beri. Vitamin B1 diperlukan untuk membantu tubuh mengubah karbohidrat menjadi energi yang dapat digunakan (2,3).

2) Jenis Vitamin B1

Tiamin tersedia dalam beberapa bentuk, tetapi yang paling umum adalah tiamin bebas dan tiamin difosfat (TDP), yang merupakan bentuk aktifnya. TDP berfungsi sebagai koenzim dalam berbagai reaksi metabolik, terutama yang berkaitan dengan dekarboksilasi oksidatif piruvat dan metabolisme asam amino. Tiamin juga berperan dalam sintesis neurotransmitter yang penting untuk fungsi sistem saraf (2,3).

3) Fungsi Vitamin B1

Vitamin B1 memiliki fungsi utama dalam metabolisme karbohidrat. Tiamin diperlukan untuk mengubah glukosa menjadi energi melalui proses glikolisis dan siklus asam sitrat. Selain itu, tiamin juga berperan dalam fungsi neurologis, membantu dalam transmisi impuls saraf dan menjaga kesehatan sistem saraf. Tiamin berkontribusi dalam memelihara keseimbangan fungsi otak dan mental (2,3).

4) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Vitamin B1 (2,3).

- **Kekurangan:** Kekurangan tiamin dapat menyebabkan kondisi yang dikenal sebagai beri-beri, yang ditandai dengan gejala neurologis, kardiovaskular, dan gastrointestinal. Gejala umum dari kekurangan tiamin termasuk kelemahan otot, gangguan koordinasi, edema, dan masalah jantung. Dalam kasus yang parah, dapat menyebabkan sindrom *Wernicke-Korsakoff*, yang merupakan gangguan serius pada sistem saraf
- **Kelebihan:** Meskipun kelebihan tiamin jarang terjadi karena vitamin ini larut dalam air dan diekskresikan melalui urin,

mengonsumsi tiamin dalam dosis yang sangat tinggi dapat menyebabkan efek samping seperti reaksi alergi, sakit kepala, dan iritasi lambung. Oleh karena itu, penting untuk mempertahankan keseimbangan asupan tiamin.

5) Jumlah Vitamin B1 (Tiamin) yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK)

Kebutuhan harian (RDA) untuk tiamin bervariasi berdasarkan usia dan jenis kelamin. Secara umum, rekomendasi RDA untuk tiamin adalah sebagai berikut:

- Pria: 1,2 mg
- Wanita: 1,1 mg RDA ini mencakup kebutuhan dasar untuk mempertahankan metabolisme yang sehat dan mendukung fungsi tubuh yang optimal (2,3)

6) Metabolisme Vitamin B1

Metabolisme vitamin B1, atau tiamin, melibatkan beberapa langkah penting yang berfokus pada konversi tiamin menjadi bentuk aktifnya, yaitu tiamin difosfat (TDP), serta keterlibatannya dalam berbagai reaksi biokimia yang penting untuk metabolisme energi dan fungsi sel.

a. Penyerapan dan Transportasi

Setelah konsumsi makanan yang mengandung tiamin, proses penyerapan tiamin terjadi di usus halus, terutama di duodenum dan jejunum. Tiamin diserap melalui dua mekanisme utama:

- Transportasi aktif: Melibatkan protein pengangkut yang spesifik untuk tiamin (ThTr1 dan ThTr2). Proses ini memerlukan energi dan terjadi ketika konsentrasi tiamin di dalam lumen usus lebih rendah dibandingkan di dalam sel.
- Difusi pasif: Pada konsentrasi tiamin yang tinggi, tiamin dapat diserap melalui difusi pasif (2,3).

Setelah penyerapan, tiamin dibawa melalui aliran darah, sebagian besar dalam bentuk bebas, tetapi juga dapat terikat pada protein. Tiamin juga dapat disimpan dalam jaringan tubuh, terutama di hati dan otot, dalam jumlah kecil (2,3).

b. Konversi ke *Tiamin Difosfat* (TDP)

Setelah diserap, tiamin diubah menjadi bentuk aktifnya, yaitu *tiamin difosfat* (TDP), melalui dua langkah konversi:

- Fosforilasi: Tiamin yang diserap mengalami fosforilasi menjadi *tiamin monofosfat* (TMP) oleh enzim tiamin monofosfat kinasi.
- Fosforilasi lebih lanjut: TMP kemudian diubah menjadi TDP oleh enzim *tiamin difosfat sintase* yang menggunakan ATP sebagai donor fosfat. TDP adalah bentuk aktif tiamin yang berfungsi sebagai koenzim dalam berbagai reaksi enzimatik ((2,3).

c. Peran TDP dalam Metabolisme Energi

TDP berfungsi sebagai kofaktor penting dalam beberapa enzim kunci yang terlibat dalam metabolisme energi:

- *Piruvat Dehidrogenase*: TDP diperlukan dalam reaksi dekarboksilasi piruvat menjadi asetil-KoA. Asetil-KoA kemudian memasuki siklus asam sitrat untuk produksi ATP.
- *Alfa-Ketoglutarat Dehidrogenase*: Dalam siklus asam sitrat, TDP berfungsi untuk mengubah alfa-ketoglutarat menjadi suksinat, yang juga menghasilkan NADH dan ATP.
- *Transketolase*: TDP diperlukan dalam jalur pentosa fosfat, yang berfungsi untuk menghasilkan NADPH dan ribulosa-5-fosfat, yang penting untuk biosintesis lemak dan nukleotida (2,3).

d. Metabolisme Asam Amino

Tiamin juga berperan dalam metabolisme asam amino, di mana TDP berkontribusi dalam reaksi transaminasi dan dekarboksilasi asam amino. Ini penting untuk sintesis neurotransmitter dan pengaturan metabolisme protein di dalam sel. Misalnya, reaksi yang melibatkan dekarboksilasi asam amino dapat menghasilkan neurotransmitter seperti acetylcholine (2,3).

e. Ekskresi Vitamin B1

Tiamin yang berlebih di dalam tubuh akan diekskresikan melalui urin. Sebagian besar tiamin diekskresikan dalam bentuk tiamin bebas dan TDP. Kelebihan tiamin jarang terjadi, tetapi jika terjadi, dapat menyebabkan gejala yang tidak diinginkan, meskipun sebagian besar individu dapat mentolerir asupan tiamin yang lebih tinggi tanpa masalah kesehatan((2,3).

7) Dampak Kekurangan Vitamin B1

Kekurangan tiamin dapat mengganggu proses metabolisme energi yang penting, menyebabkan gejala seperti:

- Kelemahan otot dan kelelahan
- Gangguan neurologis, termasuk kesulitan berjalan dan kebingungan mental
- Penyakit beri-beri, yang dapat menyebabkan masalah kardiovaskular dan gangguan neurologis (2,3).

8) Sumber Utama Vitamin B1 dalam Makanan

Tiamin (Vitamin B1) dapat ditemukan dalam berbagai makanan, baik dari sumber nabati maupun hewani.

a. Sumber Tiamin dari Makanan Nabati

- Biji-Bijian Utuh: Biji-bijian seperti beras merah, gandum utuh, dan quinoa adalah sumber yang baik untuk tiamin. Proses penggilingan yang menghilangkan lapisan luar biji-

bijian, seperti pada nasi putih, dapat mengurangi kandungan tiamin.

- Kacang-Kacangan: Kacang polong, kacang hitam, kacang merah, dan lentil mengandung tiamin dalam jumlah yang signifikan. Kacang-kacangan juga kaya akan protein dan serat.
- Kacang Tanah: Kacang tanah merupakan sumber tiamin yang sangat baik dan juga mengandung lemak sehat, protein, dan serat. Konsumsi kacang tanah dapat membantu meningkatkan asupan tiamin.
- Sayuran Hijau: Beberapa sayuran hijau seperti bayam, brokoli, dan asparagus mengandung tiamin, meskipun dalam jumlah yang lebih kecil dibandingkan dengan biji-bijian dan kacang-kacangan. Sayuran ini juga kaya akan vitamin dan mineral lainnya
- Sereal yang Diperkaya: Banyak sereal sarapan yang diperkaya dengan tiamin dan nutrisi lainnya. Ini memberikan cara yang mudah untuk meningkatkan asupan tiamin, terutama bagi mereka yang mungkin tidak mendapatkan cukup dari makanan lain.

b. Sumber Tiamin dari Makanan Hewani

- Daging: Daging sapi dan unggas juga mengandung tiamin, meskipun dalam jumlah yang lebih rendah
- Ikan: Beberapa jenis ikan, seperti tuna dan salmon, mengandung tiamin. Ikan tidak hanya kaya akan tiamin, tetapi juga merupakan sumber protein dan asam lemak omega-3 yang baik
- Hati: Hati, baik dari sapi maupun ayam, merupakan sumber tiamin yang sangat baik. Hati juga mengandung banyak nutrisi penting lainnya, termasuk vitamin A dan B12, serta mineral seperti zat besi

- Telur: Telur juga mengandung tiamin, meskipun dalam jumlah yang lebih kecil dibandingkan dengan sumber lainnya. Telur merupakan sumber protein berkualitas tinggi dan kaya akan vitamin dan mineral
- Produk Susu: Susu dan produk olahan susu, seperti yogurt dan keju, juga mengandung tiamin. Produk susu tidak hanya kaya tiamin, tetapi juga merupakan sumber kalsium dan protein yang baik

9) Enzim yang Terlibat dalam Metabolisme Vitamin B1

Vitamin B1 (tiamin) memiliki peran penting sebagai koenzim dalam berbagai reaksi metabolik di dalam tubuh, khususnya dalam metabolisme karbohidrat. Berikut adalah beberapa enzim utama yang terlibat dalam metabolisme tiamin:

a. Piruvat Dehidrogenase

Enzim ini berfungsi dalam dekarboksilasi oksidatif piruvat menjadi asetil-KoA. *Tiamin difosfat* (TDP), bentuk aktif tiamin, berperan sebagai kofaktor penting dalam reaksi ini. Proses ini adalah langkah kunci yang menghubungkan glikolisis dengan siklus asam sitrat (*Krebs cycle*), di mana asetil-KoA digunakan untuk menghasilkan energi (2,3).

b. Alfa-Ketoglutarat Dehidrogenase

Enzim ini juga memerlukan TDP sebagai koenzim untuk mengubah alfa-ketoglutarat menjadi suksinat di dalam siklus asam sitrat. Proses ini berkontribusi dalam penghasilan energi dan pengaturan metabolisme asam amino.

c. Transketolase

Transketolase adalah enzim penting dalam jalur pentosa fosfat yang berfungsi untuk memindahkan unit karbon dari satu gula phosphorylated ke gula phosphorylated lainnya. TDP bertindak sebagai prostetik dalam transketolase, yang

diperlukan untuk menghasilkan NADPH, yang sangat penting untuk biosintesis lemak dan nukleotida.

d. *2-Hidroksikarboksilat Lyase*

Enzim ini berfungsi dalam metabolisme asam lemak, mengubah 2-hidroksikarboksilat menjadi produk yang lebih kecil, dan juga memerlukan TDP sebagai koenzim untuk katalisisnya. Proses ini mendukung metabolisme lemak di dalam tubuh (2,3).

e. *Heksokinase*

Enzim ini membantu dalam fosforilasi glukosa menjadi glukosa-6-fosfat, langkah pertama dalam glikolisis. Meskipun bukan secara langsung memerlukan tiamin, keberadaan tiamin mendukung reaksi-reaksi sebelumnya yang mempercepat metabolisme karbohidrat.

3. VITAMIN B2 (RIBOFLAVIN)

1) Definisi Vitamin B2 (Riboflavin)

Vitamin B2, juga dikenal sebagai riboflavin, adalah vitamin larut dalam air yang memiliki peran penting dalam metabolisme energi serta fungsi seluler di dalam tubuh. Riboflavin pertama kali diidentifikasi pada tahun 1920-an dan menjadi bagian dari kelompok vitamin B kompleks. Vitamin ini diperlukan untuk kesehatan kulit, mata, dan sistem saraf (2,3).

2) Struktur Vitamin B2

Riboflavin adalah sebuah molekul dengan struktur kimia yang terdiri dari tiga bagian utama:

- a. Ribitol: Sebuah alkohol dengan lima atom karbon.
- b. Sikloheksan: Sebuah cincin yang menyusun struktur dasar riboflavin.

- c. Flavin: Bagian dari molekul yang berperan dalam aktivitas biologis riboflavin. Riboflavin dapat teroksidasi menjadi *flavin mononukleotida* (FMN) dan *flavin adenine dinukleotida* (FAD), yang merupakan bentuk aktifnya dalam tubuh (2,3).

3) Jenis Vitamin B2

Vitamin B2 tersedia dalam beberapa bentuk, tetapi dua bentuk utama yang aktif dalam tubuh adalah:

- a. *Flavin Mononukleotida* (FMN): Merupakan bentuk fosforilasi riboflavin dan berfungsi sebagai koenzim dalam berbagai reaksi biokimia.
- b. *Flavin Adenine Dinukleotida* (FAD): Merupakan bentuk yang lebih kompleks yang terlibat dalam reaksi oksidasi-reduksi dan juga berfungsi sebagai koenzim untuk banyak enzim yang berperan dalam metabolisme energi.

4) Fungsi Vitamin B2

Riboflavin berfungsi sebagai koenzim dalam reaksi oksidasi-reduksi yang penting untuk metabolisme karbohidrat, lemak, dan protein. FMN dan FAD terlibat dalam proses respirasi seluler, di mana mereka berperan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan ATP. Selain itu, riboflavin juga berperan dalam sintesis hormon tiroid, pemeliharaan kesehatan kulit, dan penglihatan (2,3).

5) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Vitamin B2

- **Kekurangan:** Kekurangan riboflavin dapat menyebabkan kondisi yang dikenal sebagai ariboflavinosis, yang ditandai dengan gejala seperti radang pada mulut dan lidah, dermatitis, dan masalah pada mata seperti fotofobia (sensitivitas terhadap cahaya). Gejala lain yang mungkin muncul termasuk kelelahan dan anemia

- **Kelebihan:** Kelebihan riboflavin jarang terjadi karena riboflavin larut dalam air dan diekskresikan melalui urin. Namun, mengonsumsi riboflavin dalam jumlah yang sangat tinggi dapat menyebabkan perubahan warna urin menjadi kuning cerah dan, dalam beberapa kasus, dapat mengganggu penyerapan zat gizi lain jika terjadi dalam dosis berlebihan (2,3).

6) Jumlah Vitamin B2 yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK)

Rekomendasi asupan harian (RDA) untuk riboflavin bervariasi tergantung pada usia dan jenis kelamin. Berikut adalah kebutuhan RDA untuk riboflavin:

- Pria: 1,3 mg
- Wanita: 1,1 mg Kebutuhan ini dapat meningkat pada wanita hamil dan menyusui, di mana asupan yang disarankan dapat mencapai 1,4 mg

7) Metabolisme Vitamin B2

Metabolisme vitamin B2, atau riboflavin, melibatkan serangkaian proses yang dimulai dari penyerapan riboflavin dalam usus hingga konversi menjadi bentuk aktifnya, yaitu flavin mononukleotida (FMN) dan flavin adenine dinukleotida (FAD). Proses ini penting untuk mendukung berbagai reaksi biokimia yang esensial bagi metabolisme energi.

a. Penyerapan Vitamin B2

Setelah konsumsi makanan yang mengandung riboflavin, penyerapan terjadi di usus halus, terutama di bagian duodenum dan jejunum. Penyerapan riboflavin melibatkan dua mekanisme utama :

- **Transportasi Aktif:** Riboflavin diserap melalui transporter spesifik yang memerlukan energi. Dua protein pengangkut

yang dikenal adalah *SLC52A1* dan *SLC52A3*, yang mengangkut riboflavin ke dalam sel.

- Difusi Pasif: Pada konsentrasi riboflavin yang tinggi, riboflavin dapat diserap melalui difusi pasif tanpa memerlukan energi.

b. Transportasi dan Penyimpanan

Setelah diserap, riboflavin dibawa dalam aliran darah, sebagian besar dalam bentuk bebas, tetapi juga dapat terikat pada protein. Sebagian riboflavin yang diserap disimpan di hati, ginjal, dan jaringan lainnya dalam jumlah kecil. Hati adalah organ penyimpanan utama untuk riboflavin, meskipun cadangan ini tidak besar (2,3).

c. Konversi ke Bentuk Aktif

Riboflavin diubah menjadi bentuk aktifnya melalui dua langkah:

- Fosforilasi: Riboflavin diubah menjadi flavin mononukleotida (FMN) oleh enzim flavokinase. Reaksi ini menggunakan ATP sebagai donor fosfat.
- Fosforilasi Lebih Lanjut: FMN kemudian diubah menjadi *flavin adenine dinukleotida* (FAD) oleh enzim FAD sintase. Proses ini juga memerlukan ATP dan merupakan langkah kunci untuk menghasilkan FAD, yang memiliki fungsi penting dalam berbagai reaksi metabolik (2,3).

d. Peran Koenzim dalam Metabolisme Energi

Baik FMN maupun FAD berfungsi sebagai koenzim dalam berbagai reaksi biokimia:

- Reaksi Oksidasi-Reduksi: FMN dan FAD berfungsi dalam reaksi oksidasi-reduksi yang penting untuk metabolisme karbohidrat, lemak, dan protein. Keduanya terlibat dalam transfer elektron dalam rantai transpor elektron di mitokondria, yang merupakan langkah penting dalam respirasi seluler untuk produksi ATP (3)

- Siklus Krebs: FAD juga berperan dalam siklus asam sitrat (*Krebs*), yang menghasilkan energi melalui pengolahan asetil-KoA. FAD terlibat dalam oksidasi sukrosa menjadi fumarat, menghasilkan FADH₂ yang berkontribusi pada produksi ATP (2,3)
 - Biosintesis: Riboflavin juga berperan dalam biosintesis berbagai molekul, termasuk steroid dan asam lemak, yang melibatkan reaksi-reaksi yang memerlukan FMN dan FAD sebagai koenzim (3).
- e. Ekskresi Vitamin B2
- Kelebihan riboflavin yang tidak terpakai akan diekskresikan melalui urin. Karena riboflavin larut dalam air, tubuh dapat mengeluarkan riboflavin berlebih tanpa masalah. Urin sering kali berwarna kuning cerah akibat ekskresi riboflavin yang berlebih, yang merupakan tanda bahwa asupan riboflavin cukup (3).

8) Dampak Kekurangan Vitamin B2

Kekurangan riboflavin dapat mengganggu proses metabolisme yang penting dan menyebabkan gejala seperti:

- a. Ariboflavinosis: Kondisi ini ditandai dengan gejala seperti radang pada mulut dan lidah, dermatitis, dan masalah pada mata, termasuk fotofobia.
- b. Kelelahan: Gangguan dalam metabolisme energi dapat menyebabkan kelelahan dan kelemahan umum pada individu yang mengalami kekurangan riboflavin (2,3).

9) Sumber Utama Vitamin B2 dalam Makanan

Vitamin B2 (riboflavin) dapat ditemukan dalam berbagai sumber makanan, baik dari sumber nabati maupun hewani. Berikut adalah rincian sumber utama riboflavin (2,3):

- a. Sumber Vitamin B2 dari Makanan Nabati

- Biji-Bijian Utuh: Biji-bijian seperti beras merah, gandum utuh, dan quinoa adalah sumber yang baik untuk riboflavin. Meskipun biji-bijian olahan seperti nasi putih mengandung lebih sedikit riboflavin, biji-bijian utuh tetap menyediakan vitamin ini dalam jumlah yang signifikan. Contoh: 1 cangkir oatmeal mengandung sekitar 0,2 mg riboflavin.
 - Kacang-Kacangan: Kacang-kacangan seperti kacang polong, lentil, dan buncis juga merupakan sumber riboflavin yang baik. Kacang hitam, misalnya, mengandung sekitar 0,1 mg riboflavin per ½ cangkir. Selain itu, kacang-kacangan juga kaya akan protein dan serat.
 - Sayuran Hijau: Beberapa sayuran hijau, seperti bayam, brokoli, dan asparagus, mengandung riboflavin dalam jumlah yang bervariasi. Misalnya, 1 cangkir bayam yang dimasak mengandung sekitar 0,4 mg riboflavin. Sayuran ini juga kaya akan vitamin dan mineral lain yang penting untuk kesehatan(2,3)
 - Sereal dan Roti yang Diperkaya: Banyak produk sereal dan roti yang diperkaya dengan riboflavin untuk meningkatkan nilai gizi. Ini memberikan cara yang mudah untuk meningkatkan asupan riboflavin, terutama bagi mereka yang mungkin tidak mendapatkan cukup dari sumber lain. Misalnya, satu porsi sereal sarapan yang diperkaya dapat mengandung 0,5 mg riboflavin atau lebih.
 - Kacang Tanah: Kacang tanah adalah sumber riboflavin yang baik, menyediakan sekitar 0,1 mg riboflavin per 1 ons. Kacang tanah juga kaya akan lemak sehat, protein, dan serat.
- b. Sumber Vitamin B2 dari Makanan Hewani

- Susu dan Produk Susu: Susu adalah salah satu sumber utama riboflavin. Satu cangkir susu mengandung sekitar 0,4 mg riboflavin. Produk susu lainnya seperti yogurt dan keju juga kaya akan riboflavin.
- Daging: Daging, terutama daging babi, adalah sumber riboflavin yang sangat baik. Sekitar 0,5 mg riboflavin dapat ditemukan dalam setiap 3 ons daging babi. Daging sapi dan unggas juga mengandung riboflavin, meskipun dalam jumlah yang lebih sedikit
- Hati: Hati, terutama hati sapi, adalah salah satu sumber terkuat riboflavin. Dalam 3 ons hati sapi, terdapat sekitar 2,9 mg riboflavin. Hati juga mengandung banyak vitamin dan mineral penting lainnya, menjadikannya makanan yang sangat bergizi.
- Ikan: Beberapa jenis ikan, seperti salmon dan trout, juga mengandung riboflavin. Misalnya, satu porsi salmon dapat menyediakan sekitar 0,3 mg riboflavin. Ikan juga merupakan sumber protein yang baik dan kaya akan asam lemak omega-3.
- Telur: Telur adalah sumber riboflavin yang baik, dengan sekitar 0,2 mg riboflavin dalam satu butir telur. Telur juga kaya akan protein berkualitas tinggi dan nutrisi lainnya

4. VITAMIN B5 (ASAM PANTOTENAT)

1) Definisi Vitamin B5 (Asam Pantotenat)

Asam pantotenat, atau vitamin B5, adalah vitamin larut dalam air yang merupakan bagian dari kompleks vitamin B. Vitamin ini pertama kali diisolasi pada tahun 1933 dan dikenal sebagai faktor pertumbuhan yang diperlukan untuk metabolisme energi. Asam pantotenat memiliki peran penting dalam sintesis koenzim A, yang terlibat dalam metabolisme lemak, karbohidrat, dan protein (2,3).

2) Struktur Vitamin B5

Struktur asam pantotenat terdiri dari dua bagian utama:

- a. Asam Pantoat: Bagian ini mengandung gugus karboksil dan struktur yang mirip dengan asam lemak.
- b. Beta-Alanin: Merupakan bagian dari struktur yang berfungsi dalam pengikatan asam pantoat dan membentuk koenzim A. Struktur ini memungkinkannya untuk berfungsi sebagai kofaktor dalam banyak reaksi biokimia di dalam tubuh (2,3)

3) Jenis Vitamin B5

Asam pantotenat biasanya tersedia dalam dua bentuk:

- a. Asam Pantotenat: Bentuk bebas yang ditemukan dalam makanan dan suplemen.
- b. Koenzim A (CoA): Bentuk aktif dari asam pantotenat yang terlibat dalam banyak reaksi metabolisme. CoA sangat penting dalam proses pemecahan dan sintesis asam lemak, serta metabolisme karbohidrat dan protein.

4) Fungsi Vitamin B5

Fungsi utama asam pantotenat dalam tubuh meliputi:

- Sintesis Koenzim A: Koenzim A berfungsi sebagai kofaktor dalam banyak reaksi biokimia, termasuk metabolisme energi. CoA diperlukan untuk konversi asam lemak menjadi asetil-KoA dan juga dalam siklus asam sitrat.
- Metabolisme Energi: Asam pantotenat terlibat dalam pemecahan karbohidrat, lemak, dan protein untuk menghasilkan energi. Ini mendukung pembentukan ATP, yang merupakan sumber energi utama bagi sel.
- Sintesis Hormon dan Neurotransmitter: Asam pantotenat berkontribusi dalam sintesis hormon steroid dan

neurotransmitter, yang penting untuk fungsi sistem saraf dan keseimbangan hormonal.

5) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Vitamin B5

- **Kekurangan:** Kekurangan asam pantotenat jarang terjadi karena vitamin ini terdapat dalam banyak makanan. Namun, jika terjadi, kekurangan dapat menyebabkan gejala seperti kelelahan, depresi, gangguan tidur, dan nyeri otot. Dalam kasus yang lebih parah, dapat terjadi sindrom "*burning feet*".
- **Kelebihan:** Kelebihan asam pantotenat juga jarang terjadi, karena kelebihan biasanya diekskresikan melalui urin. Namun, dalam dosis yang sangat tinggi, dapat menyebabkan gejala seperti diare, gangguan pencernaan, dan peningkatan risiko reaksi alergi (2,3) .

6) Jumlah Vitamin B5 yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK)

Rekomendasi asupan harian (RDA) untuk asam pantotenat bervariasi berdasarkan usia dan kondisi fisiologis. RDA untuk asam pantotenat adalah sebagai berikut (2,3):

- Anak-anak (1-3 tahun): 2 mg
- Anak-anak (4-8 tahun): 3 mg
- Remaja (9-13 tahun): 4 mg
- Dewasa: 5 mg
- Wanita hamil: 6 mg
- Wanita menyusui: 7 mg

7) Metabolisme Vitamin B5

Metabolisme vitamin B5, atau asam pantotenat, melibatkan beberapa langkah yang dimulai dari penyerapan asam pantotenat dalam usus hingga konversi menjadi koenzim A (CoA), yang

memiliki peran penting dalam berbagai reaksi biokimia di dalam tubuh (2,3).

a. Penyerapan Vitamin B5

Setelah konsumsi makanan yang mengandung asam pantotenat, penyerapan terjadi terutama di usus halus, khususnya di bagian duodenum dan jejunum. Asam pantotenat diserap melalui dua mekanisme utama:

- **Transportasi Aktif:** Penyerapan asam pantotenat memerlukan transporter spesifik yang menggunakan energi. Proses ini melibatkan transportasi aktif menggunakan protein pengangkut yang dikenal sebagai *SLC37A1* dan *SLC22A4*.
- **Difusi Pasif:** Pada konsentrasi yang tinggi, asam pantotenat juga dapat diserap melalui difusi pasif, meskipun mekanisme ini kurang dominan dibandingkan transportasi aktif.

b. Transportasi dan Penyimpanan

Setelah diserap, asam pantotenat masuk ke dalam sirkulasi darah dan didistribusikan ke berbagai jaringan. Meskipun tidak disimpan dalam jumlah besar, hati, ginjal, dan otot memiliki cadangan asam pantotenat yang dapat digunakan sesuai kebutuhan tubuh.

c. Konversi ke Koenzim A (CoA)

Langkah selanjutnya adalah konversi asam pantotenat menjadi bentuk aktifnya, yaitu koenzim A. Proses ini terjadi dalam beberapa langkah:

- **Fosforilasi:** Asam pantotenat pertama kali difosforilasi menjadi fosfat asam pantotenat oleh enzim pantotenat kinase. Ini merupakan langkah awal dalam pembentukan koenzim A.
- **Pembentukan Koenzim A:** Fosfat asam pantotenat kemudian mengalami beberapa langkah reaksi

enzimatik yang melibatkan ATP, di mana ia akan diubah menjadi koenzim A. Proses ini juga melibatkan beberapa enzim seperti:

- *Cystathionine β -synthase*: Terlibat dalam reaksi yang mendukung pembentukan CoA.
- *Cysteine S-conjugate β -lyase*: Mempercepat konversi dalam jalur biosintesis.

d. Peran Koenzim A dalam Metabolisme Energi

Koenzim A memiliki peran penting dalam berbagai reaksi metabolik, termasuk:

- **Metabolisme Asam Lemak:** Koenzim A berfungsi dalam pengoksidan asam lemak, mengubah asam lemak menjadi asetil-KoA yang dapat memasuki siklus asam sitrat untuk produksi energi. Proses ini terjadi di dalam mitokondria dan penting untuk penyediaan energi bagi sel.
- **Metabolisme Karbohidrat:** Koenzim A terlibat dalam konversi piruvat menjadi asetil-KoA, yang juga merupakan titik penghubung antara glikolisis dan siklus Krebs. Dalam siklus Krebs, asetil-KoA dikombinasikan dengan oksaloasetat untuk memproduksi sitrat.
- **Sintesis Molekul Penting:** Koenzim A juga berfungsi dalam sintesis hormon steroid, neurotransmitter, dan berbagai senyawa biologis lainnya. Ini mencakup biosintesis kolesterol dan lipid, yang penting untuk pembentukan membran sel dan hormon

8) Ekskresi Vitamin B5

Asam pantotenat yang berlebih akan diekskresikan melalui urin. Karena vitamin B5 larut dalam air, tubuh dapat dengan mudah mengeluarkan kelebihan asam pantotenat tanpa masalah.

Namun, ekskresi ini juga menunjukkan pentingnya menjaga asupan yang seimbang untuk mencegah kekurangan.

9) Dampak Kekurangan Vitamin B5

Kekurangan asam pantotenat sangat jarang terjadi, tetapi dapat menyebabkan gejala seperti:

- Kelelahan: Karena gangguan dalam metabolisme energi, individu dapat mengalami kelelahan yang lebih cepat.
- Gangguan dalam sintesis hormon: Keterbatasan dalam sintesis hormon steroid dapat memengaruhi keseimbangan hormonal tubuh.

10) Sumber Vitamin B5

Asam pantotenat, atau vitamin B5, dapat ditemukan dalam berbagai sumber makanan, baik nabati maupun hewani (2,3)

a. Sumber Asam Pantotenat dari Makanan Nabati

- Kacang-Kacangan: Kacang tanah, almond, dan kacang kedelai merupakan sumber yang baik untuk asam pantotenat. Misalnya, satu ons kacang tanah mengandung sekitar 0,3 mg asam pantotenat, sementara satu cangkir almond dapat menyediakan sekitar 0,5 mg
- Biji-Bijian Utuh: Biji-bijian seperti gandum utuh, beras merah, dan quinoa mengandung asam pantotenat. Sereal yang diperkaya sering kali memiliki kandungan asam pantotenat yang lebih tinggi. Misalnya, satu cangkir oatmeal dapat mengandung sekitar 0,5 mg asam pantotenat.
- Sayuran: Beberapa sayuran hijau seperti brokoli, bayam, dan kembang kol juga mengandung asam pantotenat. Satu cangkir brokoli yang dimasak dapat mengandung sekitar 0,5 mg asam pantotenat. Sayuran ini juga kaya

akan vitamin dan mineral lainnya yang penting untuk kesehatan.

- Jamur: Jamur, terutama jamur shiitake dan jamur portobello, adalah sumber nabati yang baik untuk asam pantotenat. Satu cangkir jamur shiitake yang dimasak dapat menyediakan sekitar 0,3 mg asam pantotenat
- Sereal yang Diperkaya: Banyak sereal sarapan yang diperkaya dengan asam pantotenat untuk meningkatkan kandungan nutrisinya. Sereal yang diperkaya dapat mengandung hingga 0,5 mg asam pantotenat per porsi

b. Sumber Asam Pantotenat dari Makanan Hewani

- Daging: Daging, terutama daging sapi dan daging ayam, adalah sumber utama asam pantotenat. Dalam setiap 100 gram daging sapi, terdapat sekitar 0,8 mg asam pantotenat. Daging ayam juga merupakan sumber yang baik, dengan sekitar 0,7 mg per 100 gram.
- Hati: Hati, terutama hati sapi dan hati ayam, merupakan sumber yang sangat kaya akan asam pantotenat. Hati sapi dapat mengandung hingga 7 mg asam pantotenat per 100 gram, menjadikannya salah satu sumber terkuat vitamin.
- Ikan: Beberapa jenis ikan, seperti salmon dan tuna, mengandung asam pantotenat dalam jumlah yang cukup baik. Satu porsi salmon (sekitar 100 gram) dapat mengandung sekitar 0,3 mg asam pantotenat.
- Telur: Telur adalah sumber baik asam pantotenat. Satu butir telur besar mengandung sekitar 0,7 mg asam pantotenat, menjadikannya tambahan yang baik dalam diet untuk memenuhi kebutuhan vitamin B5.
- Produk Susu: Susu dan produk olahan susu seperti yogurt dan keju juga mengandung asam pantotenat. Misalnya, satu cangkir susu dapat mengandung sekitar 0,4 mg asam pantotenat.

5. VITAMIN B6 (PIRIDOKSIN)

1) Definisi B6 (Piridoksin)

Vitamin B6, yang juga dikenal sebagai piridoksin, adalah vitamin larut dalam air yang memainkan peran penting dalam berbagai fungsi biokimia di dalam tubuh. Vitamin ini diperlukan untuk metabolisme asam amino, sintesis neurotransmitter, serta produksi hemoglobin. Piridoksin pertama kali diidentifikasi pada tahun 1934 dan sejak itu telah diakui sebagai salah satu vitamin esensial yang dibutuhkan untuk menjaga kesehatan secara keseluruhan (2,3).

2) Struktur Kimia Vitamin B6

Struktur kimia vitamin B6 mencakup tiga bentuk utama (2,3):

- Piridoksin (PN): Bentuk alkohol dengan struktur dasar yang memiliki gugus hidroksimetil pada posisi 4.
- Piridoksal (PL): Bentuk aldehida yang memiliki gugus aldehida pada posisi 4, memberikan sifat reaktivitas yang berbeda.
- Piridoksamin (PM): Bentuk amina yang memiliki gugus amino pada posisi 4.

Ketiga bentuk ini dapat terfosforilasi menjadi bentuk aktifnya, yaitu piridoksal fosfat (PLP) dan piridoksamin fosfat (PMP), yang berfungsi sebagai koenzim dalam banyak reaksi metabolik di dalam tubuh.

3) Jenis Vitamin B6

Vitamin B6 tersedia dalam tiga jenis utama:

- Piridoksin (PN): Sering ditemukan dalam suplemen dan makanan, berfungsi sebagai sumber utama vitamin B6.

- Piridoksal (PL): Terdapat dalam makanan hewani, berfungsi sebagai bentuk aktif yang dapat diubah menjadi PLP.
- Piridoksamin (PM): Ditemukan dalam makanan dan memiliki aktivitas biologis yang serupa dengan bentuk lainnya.

Dari ketiga bentuk tersebut, piridoksal fosfat (PLP) adalah bentuk yang paling aktif dan penting dalam tubuh (2,3).

4) Fungsi Vitamin B6

Vitamin B6 memiliki berbagai fungsi yang sangat penting dalam tubuh, antara lain (2,3):

- **Metabolisme Asam Amino:** PLP berfungsi sebagai koenzim dalam reaksi transaminasi dan dekarboksilasi yang mengubah satu asam amino menjadi asam amino lainnya. Ini sangat penting untuk sintesis neurotransmitter seperti serotonin, dopamin, dan norepinefrin.
- **Sintesis Hemoglobin:** Vitamin B6 berperan dalam sintesis hemoglobin, yang sangat penting untuk transportasi oksigen dalam darah.
- **Regulasi Hormon:** Vitamin B6 juga berperan dalam sintesis hormon steroid dan pengaturan metabolisme homosistein, yang penting untuk kesehatan kardiovaskular.

5) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Vitamin B6 (2,3)

- **Kekurangan:** Kekurangan vitamin B6 dapat menyebabkan sejumlah gejala yang serius, termasuk anemia mikrositik, dermatitis seboroik, depresi, kebingungan, dan neuropati perifer. Dalam kasus yang parah, kekurangan vitamin ini dapat menyebabkan kejang, terutama pada bayi.
- **Kelebihan:** Meskipun kelebihan vitamin B6 jarang terjadi karena **vitamin** ini larut dalam air, konsumsi suplemen dalam dosis tinggi (di atas 100 mg per hari) dapat

menyebabkan neuropati sensorik dan kerusakan saraf. Gejala ini dapat mencakup mati rasa dan kesemutan di ekstremitas.

6) Jumlah B6 yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK)

Rekomendasi Asupan Harian (RDA) untuk vitamin B6 bervariasi tergantung pada usia dan jenis kelamin:

- Dewasa: Pria (19-50 tahun): 1,3 mg; Wanita (19-50 tahun): 1,3 mg.
- Usia di atas 50 tahun: Pria: 1,7 mg; Wanita: 1,5 mg.
- Wanita hamil: 1,9 mg; Wanita menyusui: 2,0 mg.

7) Metabolisme Vitamin B6

Metabolisme vitamin B6, atau piridoksin, melibatkan beberapa langkah penting yang berfokus pada penyerapan, konversi, serta keterlibatannya sebagai koenzim dalam berbagai reaksi biokimia. Vitamin B6 terdapat dalam beberapa bentuk, dan metabolisme piridoksin sangat krusial untuk memastikan fungsinya dalam tubuh.

a. Penyerapan

Setelah dikonsumsi melalui makanan, piridoksin diserap terutama di usus halus, khususnya di bagian duodenum dan jejunum. Penyerapan piridoksin dapat terjadi melalui dua mekanisme utama:

- **Transportasi Aktif:** Melibatkan transporter spesifik, yang mengharuskan energi untuk mengangkut piridoksin ke dalam sel usus. Protein transporter ini termasuk *SLC25A22* yang mengangkut vitamin B6 ke dalam sel usus.
- **Difusi Pasif:** Pada konsentrasi piridoksin yang tinggi, proses ini memungkinkan vitamin diserap tanpa memerlukan energi.

Setelah diserap, piridoksin masuk ke dalam aliran darah, sebagian besar dalam bentuk bebas, tetapi juga dapat terikat pada albumin dan protein lainnya.

b. Konversi menjadi Bentuk Aktif

Setelah penyerapan, piridoksin diubah menjadi bentuk aktifnya, yaitu piridoksal fosfat (PLP) melalui beberapa reaksi enzimatik:

- Dephosphorylation: Piridoksin yang diserap akan diubah menjadi piridoksal (PL) oleh enzim piridoksin kinase.
- Fosforilasi: Piridoksal kemudian difosforilasi menjadi PLP oleh enzim piridoksal kinase. PLP adalah bentuk aktif dari vitamin B6 dan berfungsi sebagai koenzim dalam berbagai reaksi biokimia di dalam tubuh

c. Fungsi Sebagai Koenzim

Setelah terbentuk, PLP berfungsi sebagai koenzim dalam lebih dari 100 reaksi biokimia, terutama yang melibatkan metabolisme asam amino. Beberapa fungsi utama PLP meliputi:

- Reaksi Transaminasi: PLP berfungsi dalam transaminasi, di mana asam amino ditransfer ke asam alfa-keto, membantu dalam sintesis asam amino baru dan produksi senyawa penting lainnya.
- Reaksi Dekarboksilasi: PLP berperan dalam dekarboksilasi asam amino, menghasilkan neurotransmitter seperti serotonin (dari triptofan) dan dopamin (dari tirosin). Ini sangat penting untuk fungsi neurologis dan kesehatan mental.
- Sintesis Hormon: PLP juga terlibat dalam sintesis hormon steroid dan neurotransmitter yang penting untuk regulasi berbagai proses fisiologis

d. Metabolisme Homosistein

Vitamin B6 berperan dalam metabolisme homosistein, asam amino yang dapat berkontribusi pada risiko penyakit jantung jika tidak diatur. PLP berfungsi sebagai koenzim dalam reaksi yang mengubah homosistein menjadi sistein atau metionin. Proses ini penting untuk menjaga keseimbangan metabolik dan kesehatan jantung.

8) Ekskresi Vitamin B6

Kelebihan vitamin B6, yang tidak diperlukan oleh tubuh, diekskresikan melalui urin. Karena piridoksin larut dalam air, tubuh dapat dengan mudah membuang kelebihan vitamin ini. Namun, kelebihan yang berkelanjutan, terutama dari suplemen dalam dosis tinggi, dapat menyebabkan efek samping seperti neuropati sensorik dan masalah koordinasi.

9) Dampak Kekurangan dan Kelebihan

Kekurangan vitamin B6 dapat mengganggu berbagai proses metabolisme, menyebabkan gejala seperti:

- Anemia mikrositik.
- Dermatitis.
- Gangguan neurologis seperti kebingungan dan kejang.
- Masalah pada sistem kekebalan tubuh. Sebaliknya, kelebihan vitamin B6 dapat mengganggu fungsi saraf dan menyebabkan neuropati, yang menunjukkan pentingnya keseimbangan dalam asupan vitamin B6.

10) Sumber B6 (Piridoksin)

a. Sumber Nabati Vitamin B6

a) Kacang-Kacangan:

- Kacang Chickpea: Mengandung sekitar 0,6 mg vitamin B6 per 1,5 cangkir.

- Kacang Hitam: Mengandung sekitar 0,3 mg vitamin B6 per 1 cangkir.
- b) Sayuran:
- Kentang: Satu kentang panggang ukuran sedang mengandung sekitar 0,6 mg vitamin B6.
 - Sayuran Hijau: Misalnya, bayam dan brokoli yang mengandung sekitar 0,2 mg vitamin B6 per cangkir (bayam yang dimasak).
- c) Buah-Buahan:
- Pisang: Mengandung sekitar 0,4 mg vitamin B6 per pisang berukuran sedang.
 - Alpukat: Mengandung vitamin B6 dan juga memberikan lemak sehat.
- d) Biji-Bijian dan Sereal:
- Sereal Sarapan yang Diperkaya: Banyak sereal sarapan diperkaya dengan vitamin B6, satu porsi dapat mengandung 0,5 mg vitamin B6 atau lebih.
 - Biji-bijian: Seperti beras merah dan gandum utuh juga mengandung vitamin B6, meskipun dalam jumlah lebih kecil.
- b. Sumber Hewani Vitamin B6
- a) Daging:
- Daging Ayam: Sekitar 0,6 mg vitamin B6 per 3 ons (85 gram).
 - Daging Sapi: Mengandung sekitar 0,4 mg vitamin B6 per 3 ons.
- b) Ikan:
- Ikan Salmon: Sekitar 0,6 mg vitamin B6 per 3 ons.
 - Ikan Tuna: Sekitar 0,5 mg vitamin B6 per 3 ons.
- c) Hati:
- Hati Sapi: Salah satu sumber terbaik, mengandung hingga 0,9 mg vitamin B6 per 100 gram.

d) Telur:

- Satu butir telur besar mengandung sekitar 0,1 mg vitamin B6.

e) Produk Susu:

- Susu: Satu cangkir susu dapat mengandung sekitar 0,4 mg vitamin B6.
- Yogurt dan Keju: Juga mengandung vitamin B6 dalam jumlah yang bervariasi.

6. VITAMIN B7 (BIOTIN)

1) Definisi Vitamin B7 (Biotin)

Biotin, atau yang dikenal sebagai vitamin B7, adalah vitamin larut dalam air yang termasuk dalam kelompok vitamin B kompleks. Biotin berperan penting dalam metabolisme asam lemak, glukosa, dan asam amino. Vitamin ini juga dikenal sebagai faktor pertumbuhan yang diperlukan untuk kesehatan kulit, rambut, dan kuku. Biotin pertama kali diisolasi pada tahun 1901 dan kemudian diidentifikasi sebagai nutrisi esensial (2,3).

2) Struktur Vitamin B7

Struktur kimia biotin terdiri dari dua bagian utama:

- Sikloheksil: Bagian ini adalah cincin yang mengandung nitrogen.
- Asam Karboksilat: Bagian ini berfungsi sebagai bagian aktif yang terlibat dalam reaksi biokimia.

Biotin memiliki rumus kimia $C_{10}H_{16}N_2O_3S$, dan strukturnya memungkinkan biotin untuk berfungsi sebagai koenzim dalam reaksi yang melibatkan transfer karboksil.

3) Jenis Vitamin B7

Biotin biasanya tersedia dalam dua bentuk:

- Biotin (Bentuk bebas): Ditemukan dalam makanan dan suplemen.
- Biotin terikat: Biasanya terikat pada protein dalam makanan. Sebelum diserap, biotin terikat harus dihidrolisis menjadi bentuk bebas oleh enzim tertentu dalam sistem pencernaan.

4) Fungsi Vitamin B7

Fungsi utama biotin dalam tubuh meliputi:

- **Metabolisme Energi:** Biotin berfungsi sebagai koenzim dalam reaksi karboksilasi, yang penting untuk metabolisme karbohidrat dan lemak. Misalnya, biotin diperlukan dalam konversi piruvat menjadi asetil-KoA.
- **Sintesis Asam Lemak:** Biotin berperan dalam sintesis asam lemak melalui enzim acetyl-CoA carboxylase.
- **Kesehatan Kulit dan Rambut:** Biotin memiliki peran penting dalam menjaga kesehatan kulit, rambut, dan kuku. Biotin sering digunakan dalam suplemen yang ditujukan untuk memperbaiki kualitas rambut dan kuku.

5) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Vitamin B7 (2,3).

- **Kekurangan:** Kekurangan biotin dapat menyebabkan berbagai gejala, termasuk dermatitis, konjungtivitis, alopecia (rambut rontok), dan gangguan neurologis seperti depresi dan kelelahan. Kekurangan biotin jarang terjadi karena biotin terdapat dalam banyak makanan dan juga dapat diproduksi oleh bakteri di usus manusia
- **Kelebihan:** Kelebihan biotin jarang terjadi, karena kelebihan biasanya dikeluarkan melalui urin. Namun, beberapa studi menunjukkan bahwa dosis tinggi biotin dalam suplemen dapat mengganggu hasil tes laboratorium, termasuk pengukuran hormon tiroid dan hormon lainnya.

6) Jumlah Vitamin B7 yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AKG)

Rekomendasi Asupan Harian (RDA) untuk biotin bervariasi berdasarkan usia dan kondisi fisiologis:

- Dewasa: 30 mcg per hari.
- Anak-anak: 5-25 mcg per hari, tergantung usia.
- Wanita Hamil: 30 mcg per hari.
- Wanita Menyusui: 35 mcg per hari.

7) Metabolisme Vitamin B7 dalam Tubuh

Setelah dikonsumsi, biotin diserap di usus halus melalui proses difusi. Dalam tubuh, biotin berfungsi sebagai koenzim yang berperan dalam reaksi karboksilasi yang melibatkan penambahan gugus karboksil (-COOH) ke substrat. Proses ini melibatkan beberapa enzim, termasuk:

- *Acetyl-CoA Carboxylase*: Berperan dalam sintesis asam lemak.
- *Pyruvate Carboxylase*: Berperan dalam glukoneogenesis, yang mengubah piruvat menjadi oksaloasetat.
- *Propionyl-CoA Carboxylase*: Terlibat dalam metabolisme asam lemak rantai cabang.

Metabolisme biotin (vitamin B7) melibatkan proses penyerapan, konversi menjadi bentuk aktif, dan keterlibatannya sebagai koenzim dalam berbagai reaksi biokimia. Proses ini penting untuk mendukung metabolisme energi dan sintesis molekul yang esensial dalam tubuh (2,3).

a. Penyerapan Biotin

Setelah dikonsumsi, biotin diserap di usus halus, terutama di bagian jejunum dan ileum. Penyerapan biotin terjadi melalui dua mekanisme utama:

- Difusi Aktif: Biotin diserap melalui mekanisme transportasi aktif yang melibatkan transporter spesifik, seperti *SLC5A6*. Proses ini memerlukan energi.
- Difusi Pasif: Pada konsentrasi tinggi, biotin juga dapat diserap melalui difusi pasif, meskipun ini kurang dominan dibandingkan transportasi aktif

b. Konversi Biotin menjadi Bentuk Aktif

Setelah diserap, biotin diubah menjadi bentuk aktifnya yang dikenal sebagai biotin terikat, yang berfungsi sebagai koenzim dalam reaksi biokimia. Biotin terikat ini terjadi dalam dua langkah:

- Hidrolisis: Biotin terikat yang terdapat dalam makanan harus dihidrolisis menjadi bentuk bebas sebelum dapat diserap. Proses ini melibatkan enzim biotinidase yang dihasilkan di usus. Enzim ini melepaskan biotin dari protein yang terikat di dalam makanan.
- Pembentukan Biotin Terikat: Setelah diserap, biotin bebas dapat mengikat enzim yang diperlukan dalam metabolisme. Koenzim aktif ini dikenal sebagai biotinylated enzyme yang berfungsi dalam berbagai reaksi karboksilasi

c. Peran Koenzim dalam Metabolisme Biotin

Biotin berfungsi sebagai koenzim dalam berbagai reaksi yang melibatkan karboksilasi, yaitu penambahan gugus karboksil (-COOH) ke substrat. Beberapa fungsi utama biotin sebagai koenzim meliputi:

- *Acetyl-CoA Carboxylase*: Berperan dalam sintesis asam lemak dengan mengubah asetil-KoA menjadi malonil-KoA, langkah awal dalam biosintesis asam lemak.
- *Pyruvate Carboxylase*: Terlibat dalam glukoneogenesis, di mana piruvat diubah menjadi oksaloasetat. Reaksi ini

penting untuk mempertahankan kadar glukosa darah, terutama selama puasa atau diet rendah karbohidrat

- *Propionyl-CoA Carboxylase*: Mengkonversi propionil-KoA menjadi suksinil-KoA, yang kemudian dapat digunakan dalam siklus Krebs untuk menghasilkan energi.

d. Peran dalam Metabolisme Asam Amino

Biotin juga berperan dalam metabolisme asam amino. Reaksi yang melibatkan biotin dapat membantu dalam konversi asam amino tertentu menjadi glukosa, yang penting untuk menjaga tingkat energi tubuh. Misalnya, biotin terlibat dalam konversi asam amino rantai cabang menjadi senyawa yang dapat dimanfaatkan dalam siklus Krebs.

e. Ekskresi Vitamin B7

Kelebihan biotin yang tidak terpakai akan diekskresikan melalui urin. Karena biotin larut dalam air, tubuh dapat dengan mudah mengeluarkan kelebihan vitamin ini tanpa masalah. Penyerapan dan ekskresi yang efisien ini membantu menjaga kadar biotin dalam tubuh dalam rentang yang optimal untuk mendukung fungsi fisiologis.

8) Dampak Kekurangan dan Kelebihan Vitamin B7

Kekurangan biotin sangat jarang terjadi karena biotin terdapat dalam banyak makanan dan juga dapat diproduksi oleh bakteri di usus. Namun, jika terjadi, gejala dapat mencakup dermatitis, alopecia, dan gangguan neurologis. Sebaliknya, kelebihan biotin jarang terjadi, tetapi konsumsi suplemen dalam dosis tinggi dapat mengganggu hasil tes laboratorium, seperti pengukuran hormon tiroid.

9) Sumber Biotin (2,3).

Sumber utama biotin dalam makanan meliputi:

- Hati: Hati sapi dan ayam merupakan sumber yang sangat kaya akan **biotin**.
- Telur: Kuning telur adalah sumber biotin yang baik, tetapi pemanasan berlebihan dapat menurunkan kandungan biotin.
- Kacang-Kacangan: Kacang tanah dan almond juga mengandung biotin.
- Produk Susu: Susu dan produk susu seperti yogurt dan keju mengandung biotin.
- Sayuran: Beberapa sayuran seperti wortel, brokoli, dan bayam mengandung biotin, meskipun dalam jumlah lebih kecil.

10) Sumber Utama Vitamin B7 dalam Makanan

Biotin (vitamin B7) dapat ditemukan dalam berbagai sumber makanan, baik nabati maupun hewani. Berikut adalah rincian sumber utama biotin dalam kedua kategori tersebut:

a. Sumber Nabati Vitamin B7

- a) Kacang-Kacangan: Kacang tanah dan kedelai merupakan sumber yang baik untuk biotin.
 - Kacang Tanah: Mengandung sekitar 85 mcg biotin per 100 gram.
 - Kedelai: Sekitar 32 mcg biotin per 100 gram.
- b) Biji-Bijian dan Sereal: Biji-bijian utuh seperti oat, barley, dan gandum utuh mengandung biotin dalam jumlah yang signifikan.
 - Oat: Sekitar 27 mcg biotin per 100 gram.
 - Barley: Mengandung sekitar 25 mcg biotin per 100 gram.
- c) Sayuran: Beberapa sayuran hijau juga kaya akan biotin.
 - Bayam: Mengandung sekitar 16 mcg biotin per 100 gram.
 - Brokoli: Sekitar 20 mcg biotin per 100 gram.
- d) Jamur: Jamur, terutama jamur shiitake, adalah sumber nabati yang baik untuk biotin.

- Jamur Shiitake: Mengandung sekitar 5 mcg biotin per 100 gram.
- e) Buah-Buahan: Beberapa buah, meskipun dalam jumlah yang lebih kecil, juga mengandung biotin.
- Alpukat: Sekitar 2-6 mcg biotin per 100 gram.
 - Pisang: Mengandung sekitar 1 mcg biotin per 100 gram.
- b. Sumber Hewani Vitamin B7
- a) Hati: Hati, terutama hati sapi dan hati ayam, adalah salah satu sumber terkaya biotin.
- Hati Sapi: Mengandung sekitar 100-200 mcg biotin per 100 gram.
 - Hati Ayam: Sekitar 170 mcg biotin per 100 gram.
- b) Telur: Kuning telur adalah sumber biotin yang sangat baik.
- Kuning Telur: Sekitar 20-25 mcg biotin per butir telur.
- c) Ikan: Beberapa jenis ikan juga mengandung biotin.
- Ikan Salmon: Mengandung sekitar 5 mcg biotin per 100 gram.
 - Ikan Tuna: Sekitar 4 mcg biotin per 100 gram.
- d) Produk Susu: Susu dan produk olahan susu juga mengandung biotin.
- Susu: Mengandung sekitar 0,4 mcg biotin per 100 ml.
 - Yogurt: Sekitar 5 mcg biotin per 100 gram.

7. VITAMIN B9 (FOLAT)

1) Definisi Vitamin B9 (Folat)

Vitamin B9, yang juga dikenal sebagai folat atau asam folat dalam bentuk sintetisnya, adalah vitamin larut dalam air yang penting untuk sintesis DNA, pembentukan sel, dan metabolisme asam amino. Folat diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan yang sehat, terutama selama masa kehamilan. Vitamin ini

pertama kali diisolasi pada tahun 1941 dari daun bayam dan dikenal sebagai faktor antianemia (2,3).

2) Struktur Vitamin B9

Struktur kimia folat terdiri dari tiga komponen utama:

- Pteridin: Cincin pteridin yang berfungsi sebagai kerangka dasar.
- Asam para-aminobenzoat (PABA): Bagian ini terikat pada pteridin dan memberikan sifat biologis pada molekul.
- Glutamat: Folat dalam bentuk alami biasanya mengandung beberapa residu glutamat, yang mempengaruhi kelarutan dan bioavailabilitasnya.

Rumus kimia folat adalah $C_{19}H_{19}N_7O_6S$, dan bentuk aktif dari folat dalam tubuh adalah tetrahydrofolate (THF) (2,3).

3) Jenis Vitamin B9

Vitamin B9 tersedia dalam dua bentuk utama:

- Folat (Bentuk Alami): Ditemukan dalam makanan seperti sayuran hijau, kacang-kacangan, dan hati.
- Asam Folat (Bentuk Sintetis): Ditemukan dalam suplemen dan makanan yang diperkaya, bentuk ini lebih stabil dan lebih mudah diserap oleh tubuh. Asam folat diubah menjadi bentuk aktifnya (THF) di dalam tubuh (2,3).

4) Fungsi Vitamin B9

Fungsi utama folat dalam tubuh meliputi:

- Sintesis DNA dan RNA: Folat penting dalam pembentukan DNA dan RNA, yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perbaikan sel.
- Pembentukan Sel Darah Merah: Folat berperan dalam pembentukan sel darah merah, membantu mencegah anemia megaloblastik, yang disebabkan oleh kurangnya folat.

- Metabolisme Asam Amino: Folat juga terlibat dalam metabolisme asam amino, termasuk konversi homosistein menjadi metionin, yang berfungsi dalam kesehatan jantung.

5) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Vitamin B9

- **Kekurangan:** Kekurangan folat dapat menyebabkan anemia megaloblastik, kelelahan, kelemahan, serta gangguan perkembangan janin selama kehamilan. Wanita hamil yang kekurangan folat memiliki risiko lebih tinggi untuk melahirkan bayi dengan cacat lahir, seperti spina bifida dan anensefali.
- **Kelebihan:** Meskipun jarang, kelebihan asam folat dari suplemen dapat menyebabkan efek samping, termasuk gangguan pencernaan, dan dapat menyembunyikan gejala defisiensi vitamin B12, yang dapat memperburuk kerusakan saraf jika tidak diobati (2,3).

6) Jumlah Vitamin B9 yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK)

Rekomendasi Asupan Harian (RDA) untuk folat bervariasi berdasarkan usia dan kondisi fisiologis:

- Dewasa: 400 mcg per hari.
- Wanita Hamil: 600 mcg per hari untuk mendukung perkembangan janin.
- Wanita Menyusui: 500 mcg per hari

7) Metabolisme Vitamin B9 dalam Tubuh

Metabolisme folat (vitamin B9) melibatkan beberapa langkah penting yang berkaitan dengan penyerapan, konversi menjadi bentuk aktif, dan perannya sebagai koenzim dalam berbagai reaksi biokimia. Proses ini esensial untuk sintesis DNA, pembentukan sel, dan metabolisme asam amino.

a. Penyerapan

Setelah konsumsi makanan yang mengandung folat, penyerapan terjadi terutama di usus halus, khususnya di jejunum. Folat dalam bentuk alami (dari makanan) biasanya terikat pada protein, sehingga perlu dihidrolisis menjadi bentuk bebas sebelum diserap. Proses ini melibatkan enzim:

- Dihidrofolat reduktase: Menghidrolisis folat terikat dari protein untuk menghasilkan bentuk bebas yang dapat diserap.
- Transportasi: Setelah dihidrolisis, folat diserap melalui transportasi aktif dengan bantuan transporter spesifik, seperti *SLC46A1* dan *SLC19A1*.

Folat sintetis (asam folat) lebih mudah diserap dan tidak memerlukan hidrolisis, sehingga lebih efisien dalam penyerapan.

b. Konversi menjadi Bentuk Aktif

Setelah diserap, folat harus diubah menjadi bentuk aktifnya untuk dapat berfungsi sebagai koenzim. Proses konversi ini melibatkan beberapa langkah:

- Reduksi: Folat diubah menjadi dihidrofolat (DHF) dan kemudian menjadi tetrahydrofolat (THF) oleh enzim dihidrofolat reduktase. THF adalah bentuk aktif dari folat yang berfungsi dalam berbagai reaksi biokimia.
- Modifikasi Struktur: THF dapat dimodifikasi lebih lanjut menjadi berbagai bentuk aktif, termasuk 5-methyltetrahydrofolate (5-MTHF), yang merupakan bentuk utama yang beredar dalam darah dan berperan dalam metabolisme asam amino

c. Peran Koenzim dalam Metabolisme Folat

Folat berfungsi sebagai koenzim dalam berbagai reaksi yang melibatkan transfer satu karbon. Beberapa fungsi utama folat sebagai koenzim meliputi:

- Sintesis DNA dan RNA: THF terlibat dalam sintesis purin dan pirimidin, yang diperlukan untuk sintesis DNA dan RNA. Ini sangat penting untuk pertumbuhan sel, reproduksi, dan regenerasi jaringan.
- Metabolisme Asam Amino: Folat terlibat dalam reaksi transaminasi dan konversi homosistein menjadi metionin, yang penting untuk kesehatan jantung. 5-MTHF berfungsi sebagai donor karbon dalam reaksi ini

d. Distribusi dan Penyimpanan Vitamin B9

Setelah diubah menjadi bentuk aktif, THF dan turunannya didistribusikan ke seluruh tubuh melalui aliran darah. Meskipun folat dapat disimpan dalam jumlah kecil di hati, cadangan ini tidak sebesar vitamin lain. Karena folat larut dalam air, kelebihan folat akan diekskresikan melalui urin.

e. Ekskresi Vitamin B9

Kelebihan folat yang tidak diperlukan oleh tubuh akan diekskresikan melalui urin. Metabolit folat yang tidak aktif atau kelebihan asam folat dari suplemen akan dibuang oleh ginjal. Hal ini memastikan bahwa kadar folat dalam tubuh tetap dalam rentang yang optimal untuk fungsi fisiologis yang sehat.

8) Dampak Kekurangan dan Kelebihan Folat

- Kekurangan: Kekurangan folat dapat menyebabkan anemia megaloblastik, gangguan neurologis, dan cacat lahir pada bayi, terutama jika terjadi pada wanita hamil
- Kelebihan: Kelebihan asam folat dari suplemen dapat menyebabkan gangguan pencernaan dan dapat menyembunyikan gejala defisiensi vitamin B12, yang penting untuk fungsi saraf.

9) Sumber Vitamin B9

Folat (vitamin B9) dapat ditemukan dalam berbagai sumber makanan, baik nabati maupun hewani. Berikut adalah rincian sumber utama folat:

a. Sumber Nabati Folat

- a) Sayuran Hijau: Sayuran hijau adalah salah satu sumber terbaik folat.
 - Bayam: Mengandung sekitar 263 mcg folat per 100 gram (dimasak).
 - Broccoli: Mengandung sekitar 63 mcg folat per 100 gram (dimasak).
 - Kale: Sekitar 141 mcg folat per 100 gram.
- b) Kacang-Kacangan: Kacang-kacangan juga kaya akan folat.
 - Kacang Kedelai: Mengandung sekitar 277 mcg folat per 100 gram (dimasak).
 - Lentil: Mengandung sekitar 358 mcg folat per 100 gram (dimasak).
 - Kacang Hitam: Sekitar 256 mcg folat per 100 gram (dimasak).
- c) Buah-Buahan: Beberapa buah mengandung folat, meskipun dalam jumlah yang lebih kecil.
 - Jeruk: Sekitar 40 mcg folat per jeruk ukuran sedang.
 - Pisang: Mengandung sekitar 20 mcg folat per 100 gram.
 - Alpukat: Sekitar 81 mcg folat per 100 gram.
- d) Biji-Bijian: Banyak biji-bijian utuh yang diperkaya juga mengandung folat.
 - Sereal Sarapan yang Diperkaya: Banyak sereal sarapan yang diperkaya dengan folat, memberikan kontribusi yang signifikan terhadap asupan harian.

b. Sumber Hewani Folat

- a) Hati: Hati adalah sumber folat yang sangat kaya.

- Hati Sapi: Mengandung sekitar 290 mcg folat per 100 gram.
 - Hati Ayam: Mengandung sekitar 170 mcg folat per 100 gram.
- b) Telur: Kuning telur mengandung folat.
- Kuning Telur: Sekitar 20-25 mcg folat per butir telur.
- c) Produk Susu: Susu dan produk olahan susu juga mengandung folat.
- Susu: Sekitar 5 mcg folat per 100 ml.
 - Yogurt: Mengandung sekitar 6 mcg folat per 100 gram.
- d) Daging: Daging juga mengandung folat, meskipun dalam jumlah yang lebih sedikit dibandingkan hati.
- Daging Sapi: Sekitar 17 mcg folat per 100 gram.
 - Daging Ayam: Mengandung sekitar 4-5 mcg folat per 100 gram.

8. VITAMIN B12 (KOBALAMIN)

1) Definisi Vitamin B12 (Kobalamin)

Vitamin B12, yang juga dikenal sebagai kobalamin, adalah vitamin larut dalam air yang sangat penting untuk fungsi tubuh yang optimal. Vitamin ini diperlukan untuk produksi sel darah merah, fungsi sistem saraf, dan sintesis DNA. Kobalamin pertama kali diisolasi pada tahun 1948 dan diketahui memiliki peran yang krusial dalam pencegahan anemia megaloblastik (2,3).

2) Struktur Vitamin B12

Rumus kimia kobalamin adalah $C_{63}H_{88}CoN_{14}O_{14}P$, dan kehadiran kobalt memberikan sifat unik pada vitamin B12.

3) Jenis Vitamin B12

Vitamin B12 tersedia dalam beberapa bentuk, yaitu:

- Metilkobalamin: Bentuk aktif yang ditemukan dalam jaringan tubuh dan berperan dalam metabolisme homosistein.
- Adenosilkobalamin: Bentuk aktif yang terlibat dalam metabolisme energi.
- Hidroksikobalamin: Bentuk yang sering digunakan dalam suplemen dan injeksi.
- Kobalamin Sintetis: Bentuk yang diproduksi secara kimia dan digunakan dalam suplemen serta makanan yang diperkaya.

4) Fungsi Vitamin B12

Vitamin B12 memiliki beberapa fungsi penting, antara lain:

- Produksi Sel Darah Merah: Kobalamin diperlukan untuk pembentukan sel darah merah yang sehat, mencegah anemia megaloblastik yang dapat menyebabkan kelelahan dan kelemahan.
- Fungsi Sistem Saraf: Vitamin B12 berperan dalam pemeliharaan kesehatan sistem saraf dengan membantu produksi mielin, lapisan pelindung yang mengelilingi serat saraf.
- Sintesis DNA: Kobalamin berkontribusi dalam sintesis DNA, mendukung pertumbuhan sel dan pembelahan sel yang tepat.

5) Metabolisme Vitamin B12

Metabolisme vitamin B12 (kobalamin) merupakan proses yang kompleks dan melibatkan beberapa langkah penting, mulai dari penyerapan di saluran pencernaan hingga konversi menjadi

bentuk aktif yang dapat digunakan oleh tubuh. Proses ini penting untuk memastikan bahwa vitamin B12 dapat berfungsi dengan baik dalam berbagai reaksi biokimia.

a. Penyerapan

Vitamin B12 terutama diserap di bagian terminal ileum dari usus halus. Proses penyerapan vitamin B12 melibatkan beberapa langkah:

- Pelepasan dari Makanan: Kobalamin yang terikat pada protein dalam makanan harus dihidrolisis terlebih dahulu oleh asam lambung dan enzim proteolitik di lambung. Ini mengubah kobalamin menjadi bentuk bebas.
- Pengikatan pada Faktor Intrinsik: Setelah dilepaskan, kobalamin berikatan dengan faktor intrinsik (intrinsic factor, IF), yaitu glikoprotein yang diproduksi oleh sel-sel parietal di lambung. Pengikatan ini sangat penting karena faktor intrinsik melindungi kobalamin dari degradasi dan memfasilitasi penyerapan di ileum.
- Transportasi: Setelah kompleks kobalamin-faktor intrinsik diserap melalui sel-sel di ileum, kobalamin kemudian dilepaskan dan diikat oleh transporter kobalamin, yaitu transcobalamin II, yang mengangkut vitamin B12 ke dalam sirkulasi darah

b. Konversi Menjadi Bentuk Aktif

Setelah penyerapan, vitamin B12 harus diubah menjadi bentuk aktifnya. Ada dua bentuk aktif dari kobalamin, yaitu metilkobalamin dan adenosilkobalamin. Proses konversi ini melibatkan beberapa langkah:

- Hidrolisis: Kobalamin yang bebas di dalam sirkulasi darah dapat dihidrolisis menjadi metilkobalamin atau adenosilkobalamin melalui reaksi enzimatik yang melibatkan enzim-enzim di hati dan jaringan lain.

- Aktivasi: Metilkobalamin berperan dalam proses konversi homosistein menjadi metionin, sementara adenosilkobalamin terlibat dalam metabolisme energi sebagai koenzim untuk reaksi yang memproduksi asetil-KoA

c. Peran Koenzim dalam Metabolisme

Vitamin B12 berfungsi sebagai koenzim dalam beberapa reaksi penting di dalam tubuh:

- Sintesis Metionin: Metilkobalamin berfungsi sebagai kofaktor dalam reaksi di mana homosistein dikonversi menjadi metionin, yang merupakan reaksi yang memerlukan donor metil. Proses ini sangat penting untuk menjaga kadar homosistein dalam rentang yang sehat dan mengurangi risiko penyakit kardiovaskular.
- Metabolisme Asam Lemak: Adenosilkobalamin terlibat dalam reaksi yang mengubah asam lemak rantai genjang menjadi senyawa yang dapat digunakan dalam siklus Krebs, serta dalam produksi energi.
- Sintesis DNA: Kobalamin juga diperlukan untuk sintesis DNA, terutama dalam pembentukan sel darah merah, yang sangat penting untuk mencegah anemia megaloblastic (2,3).

d. Distribusi dan Penyimpanan Vitamin B12

Setelah diubah menjadi bentuk aktif, vitamin B12 didistribusikan ke seluruh tubuh melalui aliran darah. Kobalamin dapat disimpan dalam jumlah yang besar di hati. Cadangan vitamin B12 dalam hati dapat bertahan selama beberapa tahun, sehingga defisiensi vitamin ini tidak muncul dengan cepat, meskipun asupan diet tidak mencukupi.

e. Ekskresi Vitamin B12

Kelebihan vitamin B12 yang tidak diperlukan oleh tubuh akan diekskresikan melalui urin. Kobalamin larut dalam air, sehingga

kelebihan yang tidak terpakai dapat dengan mudah dikeluarkan dari tubuh tanpa masalah. Meskipun kelebihan vitamin B12 jarang terjadi, konsumsi suplemen dalam dosis tinggi tidak menyebabkan efek samping yang serius karena tubuh dapat menanganinya dengan baik (2,3).

6) Dampak Kekurangan dan Kelebihan Vitamin B12

- **Kekurangan:** Kekurangan vitamin B12 dapat menyebabkan anemia megaloblastik, kerusakan saraf, kelelahan, dan gangguan mental. Ini karena peran vitamin B12 dalam pembentukan sel darah merah dan pemeliharaan kesehatan sistem saraf
- **Kelebihan:** Kelebihan vitamin B12 jarang terjadi dan biasanya tidak menyebabkan efek samping. Namun, dosis tinggi dari suplemen bisa mengganggu hasil tes laboratorium, terutama yang berkaitan dengan metabolisme zat lain, seperti hormon tiroid (2,3).

7) Sumber Utama Vitamin B12 (Kobalamin) dalam Makanan

Vitamin B12 (kobalamin) dapat ditemukan dalam berbagai sumber makanan, dengan perbedaan signifikan antara sumber nabati dan hewani. Berikut adalah rincian sumber utama vitamin B12:

a. Sumber Hewani Vitamin B12

Vitamin B12 terutama ditemukan dalam makanan hewani. Berikut adalah beberapa sumber utama dari vitamin B12:

a) Hati:

- **Hati Sapi:** Hati sapi merupakan salah satu sumber terpenting dan terkaya akan vitamin B12. Sekitar 100 gram hati sapi dapat mengandung hingga 70-80 mcg kobalamin.

- Hati Ayam: Juga merupakan sumber yang sangat baik, dengan sekitar 100 gram hati ayam mengandung sekitar 170 mcg vitamin B12.
- b) Daging:
- Daging Sapi: Daging sapi mengandung sekitar 2,4 mcg vitamin B12 per 100 gram. Sumber daging merah lainnya, seperti daging domba, juga kaya akan kobalamin.
 - Daging Ayam: Daging ayam mengandung sekitar 0,3-0,4 mcg vitamin B12 per 100 gram.
- c) Ikan dan Makanan Laut:
- Ikan Salmon: Salmon adalah sumber baik vitamin B12, dengan 100 gram mengandung sekitar 4,9 mcg kobalamin.
 - Ikan Tuna: Tuna juga kaya akan kobalamin, dengan 100 gram mengandung sekitar 9,4 mcg.
 - Kerang dan Udang: Kerang (seperti kerang hijau dan kerang raja) adalah sumber terkaya, mengandung hingga 98 mcg per 100 gram.
- d) Telur:
- Kuning telur mengandung sekitar 0,6 mcg vitamin B12 per butir telur, menjadikannya sebagai sumber tambahan yang baik bagi mereka yang mengonsumsi produk hewani.
- e) Produk Susu:
- Susu dan Yogurt: Produk susu seperti susu dan yogurt mengandung sekitar 0,4 mcg vitamin B12 per 100 ml.
 - Keju: Beberapa jenis keju juga mengandung kobalamin, terutama keju keras seperti cheddar.
- b. Sumber Nabati Vitamin B12
- Sumber nabati vitamin B12 sangat terbatas, karena sebagian besar makanan nabati tidak mengandung kobalamin dalam

jumlah yang signifikan. Namun, ada beberapa sumber yang dapat digunakan:

a) Produk Fermentasi:

Tempe dan Tahu: Beberapa produk fermentasi kedelai dapat mengandung vitamin B12 dalam jumlah kecil, tergantung pada proses fermentasi yang digunakan.

b) Alga dan Ganggang:

Beberapa jenis alga, seperti spirulina, mengklaim mengandung vitamin B12, meskipun bentuk yang ada mungkin tidak selalu bioaktif dan dapat bervariasi.

c) Sereal Sarapan yang Diperkaya:

Banyak sereal sarapan yang diperkaya dengan vitamin B12 untuk membantu individu, terutama vegetarian dan vegan, dalam memenuhi kebutuhan nutrisi ini.

d) Nutritional Yeast:

Nutritional yeast yang diperkaya adalah sumber kobalamin yang baik untuk vegetarian dan vegan, dengan banyak merek yang menawarkan tambahan vitamin B12.

8) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Vitamin B12

- **Kekurangan:** Kekurangan vitamin B12 dapat menyebabkan anemia megaloblastik, neuropati, gangguan keseimbangan, kelelahan, dan masalah kognitif. Gejala awal mungkin termasuk kelelahan dan kelemahan, sementara kekurangan jangka panjang dapat menyebabkan kerusakan saraf permanen.
- **Kelebihan:** Kelebihan vitamin B12 umumnya jarang terjadi karena kelebihan vitamin ini akan diekskresikan melalui urin. Namun, dosis tinggi dari suplemen dapat menyebabkan efek samping, seperti reaksi alergi, dan dapat mengganggu hasil tes laboratorium yang terkait dengan metabolisme zat lain.

9) Jumlah Vitamin B12 yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK)

Rekomendasi Asupan Harian (RDA) untuk vitamin B12 bervariasi berdasarkan usia dan kondisi fisiologis:

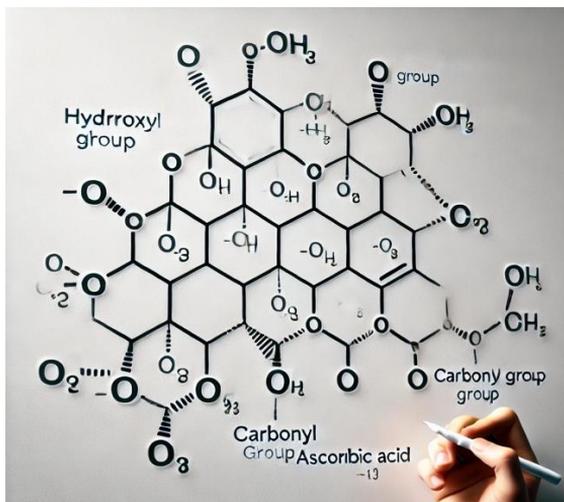
- Dewasa: 2.4 mcg per hari.
- Wanita Hamil: 2.6 mcg per hari.
- Wanita Menyusui: 2.8 mcg per hari

9. VITAMIN C (ASAM ASKORBAT)

1) Definisi Vitamin C (Asam Askorbat)

Vitamin C, atau asam askorbat, adalah vitamin larut dalam air yang penting untuk kesehatan manusia. Vitamin ini dikenal karena perannya yang signifikan sebagai antioksidan, yang membantu melindungi sel-sel dari kerusakan akibat radikal bebas. Selain itu, vitamin C juga berkontribusi pada pembentukan kolagen, penyembuhan luka, dan meningkatkan sistem kekebalan tubuh. Vitamin ini tidak dapat diproduksi oleh tubuh manusia, sehingga harus diperoleh dari sumber makanan (2,3).

2) Struktur Vitamin C



Gambar 8.2. Struktur Kimia Vitamin C (Asam Askorbat).

Gambar ini menunjukkan struktur molekul, termasuk gugus hidroksil (-OH) dan gugus karbonil (C=O). Struktur kimia asam askorbat adalah $C_6H_8O_6$. Asam askorbat memiliki struktur siklik yang mengandung dua gugus hidroksil (-OH) dan satu gugus karbonil (C=O), yang berkontribusi pada aktivitas antioksidannya. Dalam bentuknya yang aktif, asam askorbat terdapat dalam bentuk ion ascorbate pada pH fisiologis, yang dapat dengan mudah teroksidasi menjadi dehidroaskorbat. Struktur kimia ini memberikan vitamin C kemampuan untuk mendonorkan elektron, sehingga berfungsi sebagai antioksidan (2,3).

3) Jenis Vitamin C

Vitamin C tersedia dalam beberapa bentuk, tetapi yang paling umum adalah:

- Asam Askorbat: Bentuk aktif yang ditemukan dalam banyak makanan dan suplemen.
- Dehidroaskorbat: Bentuk oksidasi dari asam askorbat yang juga memiliki aktivitas biologis, tetapi kurang stabil.

Kedua bentuk ini dapat saling berinteraksi dalam tubuh dan memiliki peran penting dalam metabolisme.

4) Fungsi Vitamin C

Fungsi utama vitamin C dalam tubuh meliputi:

- Antioksidan: Melindungi sel-sel dari kerusakan oksidatif akibat radikal bebas.
- Pembentukan Kolagen: Berperan penting dalam sintesis kolagen, yang diperlukan untuk kesehatan kulit, pembuluh darah, dan jaringan ikat.

- Meningkatkan Sistem Kekebalan Tubuh: Vitamin C mendukung fungsi sistem imun dan membantu meningkatkan respons imun tubuh terhadap infeksi.
- Penyerapan Zat Besi: Vitamin C meningkatkan penyerapan zat besi dari makanan, khususnya zat besi non-heme yang terdapat dalam sumber nabati.

5) Metabolisme Vitamin C

Metabolisme vitamin C (asam askorbat) melibatkan serangkaian proses yang dimulai dari penyerapan di saluran pencernaan hingga penggunaannya dalam berbagai reaksi biokimia dalam tubuh. Berikut adalah rincian proses metabolisme vitamin C:

a. Penyerapan

Vitamin C diserap terutama di usus halus, terutama di bagian jejunum. Proses penyerapan asam askorbat melibatkan dua mekanisme utama:

- **Transportasi Aktif:** Penyerapan vitamin C terjadi melalui transporter spesifik yang dikenal sebagai sodium-dependent vitamin C transporter (SVCT). Transporter ini memerlukan natrium dan energi untuk mengangkut asam askorbat ke dalam sel.
- **Difusi Pasif:** Pada konsentrasi tinggi, vitamin C juga dapat diserap melalui difusi pasif tanpa memerlukan energi, meskipun mekanisme ini kurang dominan dibandingkan transportasi aktif (2,3).

b. Distribusi

Setelah diserap, vitamin C terdistribusi ke dalam aliran darah. Vitamin C yang terikat pada plasma berikatan dengan protein tertentu, tetapi sebagian besar terdapat dalam bentuk bebas. Vitamin C dapat dengan mudah masuk ke dalam sel-sel tubuh melalui transporter yang sama, SVCT1 dan SVCT2, yang terdapat di banyak jaringan, termasuk hati, ginjal, otot, dan otak

c. Metabolisme

Setelah masuk ke dalam sel, asam askorbat dapat digunakan dalam berbagai reaksi biokimia (2,3), termasuk:

- Peran Sebagai Antioksidan: Asam askorbat berfungsi sebagai antioksidan yang kuat dengan mendonorkan elektron kepada radikal bebas, membantu melindungi sel-sel dari kerusakan oksidatif. Ini penting untuk mencegah stres oksidatif dan peradangan.
- Regenerasi Bentuk Lain: Setelah teroksidasi menjadi dehidroaskorbat, asam askorbat dapat direduksi kembali menjadi bentuk aktifnya, asam askorbat, oleh enzim seperti dehidroaskorbat reduktase. Proses ini memungkinkan regenerasi vitamin C dan pemeliharaan kadar vitamin yang memadai dalam tubuh.
- Sintesis Kolagen: Vitamin C berperan sebagai kofaktor dalam sintesis kolagen. Asam askorbat diperlukan dalam proses hidrosilasi residu prolin dan lisin pada molekul kolagen, yang penting untuk kesehatan kulit, pembuluh darah, dan jaringan ikat
- Metabolisme Zat Besi: Vitamin C meningkatkan penyerapan zat besi non-heme dari makanan. Dengan mengubah zat besi ferrik (Fe^{3+}) menjadi bentuk ferrous (Fe^{2+}), vitamin C memfasilitasi penyerapan zat besi di usus halus.

d. Ekskresi

Kelebihan asam askorbat yang tidak diperlukan oleh tubuh diekskresikan melalui urin. Karena vitamin C larut dalam air, tubuh dapat dengan mudah mengeluarkan kelebihan vitamin ini. Hal ini penting untuk menjaga keseimbangan kadar vitamin C dalam tubuh.

6) Dampak Kekurangan dan Kelebihan Vitamin C

- **Kekurangan:** Kekurangan vitamin C dapat menyebabkan skorbut, yang ditandai dengan gejala seperti kelelahan, nyeri otot dan sendi, pendarahan pada gusi, dan luka yang sulit sembuh. Kekurangan vitamin C yang parah dapat mempengaruhi sintesis kolagen dan kesehatan umum.
- **Kelebihan:** Kelebihan vitamin C dari suplemen dapat menyebabkan efek samping seperti gangguan pencernaan, diare, dan perut kembung. Meskipun tidak umum, asupan sangat tinggi dapat menyebabkan pembentukan batu ginjal pada beberapa individu (2,3).

7) Jumlah Vitamin C yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK)

Rekomendasi Asupan Harian (RDA) untuk vitamin C bervariasi berdasarkan usia dan kondisi fisiologis:

- Dewasa: 90 mg per hari untuk pria dan 75 mg per hari untuk wanita.
- Wanita Hamil: 85 mg per hari.
- Wanita Menyusui: 120 mg per hari

8) Sumber Utama Vitamin C (Asam Askorbat) dalam Makanan

Vitamin C (asam askorbat) dapat ditemukan dalam berbagai sumber makanan, baik nabati maupun hewani. Berikut adalah rincian sumber utama vitamin C dalam kedua kategori tersebut:

a. Sumber Nabati Vitamin C

- a) Buah-Buahan: Buah-buahan adalah sumber utama vitamin C, dengan banyak varietas yang mengandung kadar tinggi.
 - Jeruk: Sekitar 53 mg vitamin C per 100 gram.
 - Kiwi: Mengandung sekitar 93 mg vitamin C per 100 gram.
 - Strawberry: Sekitar 59 mg vitamin C per 100 gram.

- Pepaya: Mengandung sekitar 60 mg vitamin C per 100 gram.
- b) Sayuran: Beberapa sayuran juga kaya akan vitamin C.
- Paprika (Capsicum): Terutama paprika merah, yang dapat mengandung sekitar 127 mg vitamin C per 100 gram.
 - Broccoli: Mengandung sekitar 89 mg vitamin C per 100 gram (dimasak).
 - Kale: Sekitar 120 mg vitamin C per 100 gram.
- c) Biji-Bijian dan Kacang-Kacangan:
- Kacang Hijau: Mengandung sekitar 60 mg vitamin C per 100 gram (dimasak).
 - Biji Bunga Matahari: Sekitar 1,5 mg vitamin C per 100 gram.
- b. Sumber Hewani Vitamin C
- a) Daging dan Produk Daging: Meskipun kadar vitamin C dalam daging tidak setinggi dalam makanan nabati, beberapa produk daging masih mengandung vitamin C.
- Daging Sapi dan Daging Ayam: Mengandung sekitar 2-4 mg vitamin C per 100 gram.
- b) Ikan dan Makanan Laut:
- Ikan Salmon: Mengandung sekitar 2-5 mg vitamin C per 100 gram.
 - Kerang: Beberapa jenis kerang juga mengandung vitamin C, meskipun dalam jumlah kecil.
- c) Susu dan Produk Susu:
- Susu: Mengandung vitamin C dalam jumlah kecil, sekitar 1 mg per 100 ml.
 - Yogurt: Sekitar 1-2 mg vitamin C per 100 gram.

9) Rangkuman

Vitamin larut air, termasuk vitamin B kompleks dan vitamin C, berperan penting dalam berbagai proses metabolisme tubuh. Vitamin B kompleks, seperti tiamin (B1), riboflavin (B2), niasin (B3), dan B12, bertindak sebagai koenzim dalam metabolisme energi, sintesis DNA, dan fungsi neurologis. Vitamin C, yang dikenal sebagai asam askorbat, berfungsi sebagai antioksidan yang melindungi sel dari kerusakan oksidatif dan berperan dalam sintesis kolagen serta mendukung sistem kekebalan tubuh. Vitamin-vitamin ini tidak dapat disimpan dalam jumlah besar dalam tubuh dan diekskresikan melalui urin, sehingga asupan yang cukup harus dijaga setiap hari.

Kekurangan vitamin larut air dapat menyebabkan gangguan metabolisme, anemia, dan penurunan fungsi imun, sedangkan kelebihan umumnya jarang menimbulkan efek buruk karena kelebihan tersebut dikeluarkan oleh tubuh. Sumber utama vitamin larut air meliputi daging, ikan, produk susu, biji-bijian, buah-buahan, dan sayuran. Konsumsi makanan yang bervariasi adalah kunci untuk memenuhi kebutuhan vitamin larut air dan mencegah defisiensi. Penyerapan vitamin ini terjadi di usus kecil dan bergantung pada mekanisme transport aktif dan difusi pasif

10) Latihan dan Jawaban

1. Jelaskan peran utama vitamin B kompleks dalam metabolisme energi!

Jawaban: Vitamin B kompleks, seperti tiamin (B1), riboflavin (B2), dan niasin (B3), bertindak sebagai koenzim dalam proses metabolisme energi. Tiamin membantu dekarboksilasi oksidatif piruvat menjadi asetil-KoA, riboflavin menghasilkan FAD dalam siklus asam sitrat, dan niasin menghasilkan NAD untuk transfer elektron. Peran ini memungkinkan konversi

karbohidrat, lemak, dan protein menjadi energi yang dapat digunakan oleh tubuh.

2. Sebutkan gejala defisiensi tiamin (vitamin B1) dan jelaskan penyebab utamanya!

Jawaban: Defisiensi tiamin dapat menyebabkan penyakit beri-beri, yang ditandai dengan kelemahan otot, kesulitan berjalan, edema, dan gangguan jantung. Penyebab utamanya adalah asupan makanan rendah tiamin, konsumsi alkohol yang berlebihan, atau gangguan penyerapan di saluran cerna.

3. Bagaimana vitamin C berperan sebagai antioksidan dalam tubuh? Jelaskan mekanismenya!

Jawaban: Vitamin C melindungi sel dari kerusakan akibat radikal bebas dengan cara mendonorkan elektron untuk menetralkan radikal bebas. Selain itu, vitamin C membantu regenerasi vitamin E sebagai antioksidan lain dan berperan dalam mengurangi stres oksidatif di jaringan tubuh.

4. Apa sumber makanan utama vitamin B12, dan mengapa vitamin ini penting bagi tubuh?

Jawaban: Sumber utama vitamin B12 adalah produk hewani seperti daging, ikan, telur, dan produk susu. Vitamin B12 penting untuk sintesis DNA, pembentukan sel darah merah, dan fungsi sistem saraf. Kekurangan vitamin B12 dapat menyebabkan anemia megaloblastik dan gangguan neurologis.

5. Sebagian besar vitamin larut air tidak disimpan dalam tubuh. Bagaimana tubuh mengatasi kebutuhan vitamin ini?

Jawaban: Tubuh mengatasi kebutuhan vitamin larut air

melalui asupan harian dari makanan yang kaya vitamin tersebut, seperti buah-buahan, sayuran, biji-bijian, dan produk hewani. Karena kelebihan vitamin larut air diekskresikan melalui urin, pola makan yang seimbang sangat penting untuk mencegah defisiensi.

11) Daftar Pustaka

1. Yaman M, Çatak J, Uğur H, Gürbüz M, Belli İ, Tanyıldız SN, et al. The bioaccessibility of water-soluble vitamins: A review. *Trends Food Sci Technol.* 2021;109(January):552–63.
2. University Ssgfa, Nebraska-Lincoln Au (Professor Ejlsuodtpcuo. *Advanced Nutrition And Human Metabolism. Japanese Journal of Nephrology.* 2022;56(1):42–7.
3. Kennelly PJ, Botham KM, Mcguinness OP, Rodwell VW, Weil PA, York N, et al. Directorate of Distance Education M . Sc . [Home Science - Nutrition and Dietetics]. 2022; Available from: www.mhprofessional.com.

BAB IX Min Mg)

Mineral Makro (Ca, Na, P, Mg)

Yulinda Kurniasari

Tujuan Instruksional Khusus

Setelah mengikuti bab ini diharapkan mahasiswa mampu:

1. Mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan struktur mineral makro (Ca, Na, F, Mg).
2. Mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan fungsi mineral makro (Ca, Na, F, Mg).
3. Mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan akibat kelebihan dan kekurangan mineral makro (Ca, Na, F, Mg).
4. Mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan jumlah mineral makro yang dibutuhkan dalam tubuh .
5. Mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan metabolisme mineral makro (Ca, Na, F, Mg).

1. Kalsium (Ca²⁺)

1) Struktur Kalsium

Kalsium (Ca) adalah salah satu makro mineral esensial yang diperlukan untuk berbagai fungsi fisiologis dalam tubuh manusia. Sebagian besar kalsium dalam tubuh terdapat dalam jaringan keras seperti tulang dan gigi, sedangkan sisanya ditemukan dalam cairan tubuh dan jaringan lunak. Dalam konteks gizi, kalsium memainkan peran penting dalam perkembangan tulang, transmisi sinyal saraf, kontraksi otot, dan koagulasi darah.

Kalsium (Ca) adalah elemen kimia dengan nomor atom 20. Dalam tubuh, kalsium terutama berada dalam bentuk ionik, yaitu Ca^{2+} . Sifat kimia dan distribusinya memberikan dasar untuk fungsinya yang beragam:

a. Ion Kalsium (Ca^{2+})

Ion kalsium merupakan bentuk aktif secara biologis yang berpartisipasi dalam proses metabolisme. Dalam cairan tubuh, sekitar 50% kalsium berada dalam bentuk ion bebas, sedangkan sisanya terikat pada protein (terutama albumin) atau kompleks dengan anion seperti fosfat dan sitrat.

b. Kompleks dengan Fosfat

Dalam jaringan keras seperti tulang dan gigi, kalsium bergabung dengan fosfat membentuk hidroksiapatit [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$], yang memberikan kekuatan dan struktur pada tulang.

c. Ketersediaan dalam Cairan Tubuh

Konsentrasi kalsium dalam cairan ekstraseluler dipertahankan pada tingkat sekitar 2.2-2.6 mmol/L, yang dikontrol ketat oleh hormon seperti parathormon (PTH), kalsitonin, dan vitamin D aktif (kalsitriol).

Kalsium juga memiliki sifat kimia yang menjadikannya unik dan esensial dalam fungsi biologis:

a. Reaktivitas:

a) Kalsium adalah logam alkali tanah yang sangat reaktif, terutama dengan air, menghasilkan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dan gas hidrogen.

b) Reaktivitas ini mendukung fungsinya sebagai kofaktor enzim yang memerlukan ion kalsium untuk aktivitasnya.

b. Kemampuan Ikatan

Kalsium dapat berikatan dengan molekul organik dan anorganik seperti protein, fosfat, karbonat, dan sitrat. Hal ini

mendukung perannya dalam pengaturan sinyal seluler dan stabilitas membran.

c. Larut dalam Asam

Kalsium karbonat, bentuk yang sering ditemukan di alam, larut dalam asam menghasilkan ion kalsium yang dapat diserap oleh tubuh. Sifat ini dimanfaatkan dalam penyerapan kalsium di lambung yang memiliki lingkungan asam.

Sebanyak 99% kalsium tubuh disimpan di tulang dan gigi, sementara 1% sisanya berada dalam cairan ekstraseluler dan jaringan lunak. Penyimpanan ini memiliki dua fungsi utama yaitu memberikan struktur pada kerangka tubuh dan bertindak sebagai cadangan untuk kebutuhan kalsium sistemik.

2) Fungsi Kalsium

a. Pembentukan dan Pemeliharaan Tulang dan Gigi

Sekitar 99% kalsium tubuh tersimpan dalam tulang dan gigi dalam bentuk hidroksiapatit $[Ca_5(PO_4)_3(OH)]$. Struktur ini memberikan kekuatan dan kekakuan pada kerangka tubuh. Selama proses remodeling tulang, kalsium dilepaskan ke dalam darah untuk memenuhi kebutuhan tubuh yang berubah. Peran dalam pemeliharaan gigi, kalsium membentuk struktur email gigi yang kuat, melindungi gigi dari kerusakan dan demineralisasi.

b. Kontraksi Otot

Kalsium diperlukan untuk proses kontraksi otot, termasuk otot rangka, jantung, dan otot polos. Ion kalsium dilepaskan dari retikulum sarkoplasma ke sitoplasma sel otot. Ion kalsium berikatan dengan troponin, memungkinkan interaksi antara aktin dan miosin yang menghasilkan kontraksi otot.

c. Transmisi Sinyal Saraf

Ion kalsium berperan penting dalam pelepasan neurotransmitter pada sinapsis. Ketika impuls saraf mencapai

ujung akson, ion kalsium masuk ke terminal presinaptik. Masuknya kalsium memicu pelepasan vesikel neurotransmitter ke celah sinaptik, yang kemudian diterima oleh neuron postsinaptik.

d. Pembekuan Darah

Kalsium adalah kofaktor dalam proses pembekuan darah (koagulasi). Ion kalsium (Ca^{2+}) diperlukan untuk aktivasi faktor koagulasi, termasuk protrombin menjadi trombin, yang esensial dalam pembentukan fibrin.

e. Regulasi Enzim dan Fungsi Seluler

Kalsium adalah kofaktor untuk berbagai enzim yang terlibat dalam metabolisme energi, sintesis protein, dan proses biologis lainnya. Sebagai pembawa pesan kedua (second messenger), kalsium mengatur jalur sinyal intraseluler yang penting untuk fungsi sel, termasuk: proliferasi sel, diferensiasi sel, apoptosis (kematian sel terprogram).

f. Regulasi Kalsium dalam Tubuh

Hormon Pengatur:

- a) Parathormon (PTH): Meningkatkan kadar kalsium dalam darah dengan meningkatkan resorpsi tulang, meningkatkan reabsorpsi kalsium di ginjal, dan merangsang produksi kalsitriol.
- b) Kalsitonin: Menurunkan kadar kalsium darah dengan menghambat aktivitas osteoklas.
- c) Vitamin D (Kalsitriol): Meningkatkan penyerapan kalsium dari saluran cerna.

Sistem Penyangga:

Tulang berfungsi sebagai cadangan kalsium yang dapat dilepaskan sesuai kebutuhan tubuh untuk mempertahankan homeostasis.

3) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Kalsium

a. Kelebihan

- Hiperkalsemia: Gejala termasuk nyeri tulang, gangguan ginjal, dan sembelit.
- Risiko batu ginjal.

b. Kekurangan

- Hipokalsemia (kelemahan otot, kejang) dan hiperkalsemia (kelemahan, konstipasi).
- Osteoporosis: Penurunan massa tulang yang meningkatkan risiko patah tulang.
- Hipokalsemia: Gejala termasuk kejang otot, aritmia jantung, dan gangguan saraf.

4) Jumlah Kalsium yang Dibutuhkan dalam Tubuh (AKG 2019)

Tabel 9.1. Angka Kecukupan Kalsium yang Dianjurkan (Per Orang Per Hari)

Kelompok Umur	Kalsium (mg)
Bayi/Anak	
0 –5 bulan	200
6 – 11 bulan	270
1 – 3 tahun	650
4 – 6 tahun	1000
7 – 9 tahun	1000
Laki-laki	
10 – 12 tahun	1200
13 – 15 tahun	1200
16 – 18 tahun	1200
19 – 29 tahun	1000
30 – 49 tahun	1000
50 – 64 tahun	1200
65 – 80 tahun	1200

80+ tahun	1200
Perempuan	
10 – 12 tahun	1200
13 – 15 tahun	1200
16 – 18 tahun	1200
19 – 29 tahun	1000
30 – 49 tahun	1000
50 – 64 tahun	1200
65 – 80 tahun	1200
80+ tahun	1200
Hamil (+an)	
Trimester 1	+200
Trimester 2	+200
Trimester 3	+200
Menyusui (+an)	
6 bulan pertama	+200
6 bulan kedua	+200

5) Metabolisme Kalsium

Proses absorpsi kalsium, yang terutama terjadi di dalam bagian atas usus halus, ditingkatkan oleh 1,25- dehidroksikolekalsiferol (dan metabolit aktif lain dari vitamin D) disertai kerja hormon paratiroid yang sinergis. Adanya metabolit aktif di dalam sirkulasi umum dan bukan di dalam lumen usus dapat meningkatkan sintesa protein pengikat kalsium dalam enterosit. Absorpsi kalsium dapat dikurangi dengan memberikan filtrat per oral ataupun asam lemak atau fosfat berlebihan.

Kalsium di dalam feces terkandung dari diet yang tak diabsorpsi, juga kalsium yang keluar dari plasma ke dalam usus. Dari masukan sehari-hari 25 mmol (1 kg) kalsium, 2,5-7,5 (0,1-0,3 g) diekskresikan ke dalam urin dan sisanya ditemukan di dalam

feses. Hampir semua kalsium yang difiltrasi akan diabsorpsi kembali. Kalsium berlaku sebagai zat ambang dan bila kadar kalsium turun maka eksresinya ke dalam urin berhenti. Pada fungsi ginjal yang normal jumlah kalsium yang diekskresikan ke dalam urin meningkat karena kadar kalsium serum meningkat. Sekitar 2,5 mmol (0,1 g) kalsium hilang setiap hari pada kulit dan keringat. Transpor kalsium dalam usus halus dimediasi oleh proses transpor yang tersusun kompleks dan diregulasi oleh calcitropic hormonest, yaitu: 1,25-(OH)₂D₃ and hormon paratiroid (PTH). Hormon-hormon lain, seperti glukokortikoid, prolaktin dan estrogen berperan sebagai regulator absorpsi kalsium di usus halus.

Absorpsi kalsium di usus halus dapat melalui 2 mekanisme, yaitu aktif dan pasif. Transpor kalsium aktif terjadi terutama di duodenum dan proximal jejunum, sementara transpor pasif terjadi pada seluruh usus halus. Usus besar juga mampu mengabsorpsi kalsium namun hal tersebut masih kontroversial. Duodenum adalah tempat absorpsi kalsium yang paling efisien karena dapat mengambil kalsium bahkan pada keadaan diet sangat rendah kalsium melalui mekanisme aktif, juga memiliki seluruh komponen bagi transpor kalsium melalui jalur transcellular dan paracellular.

2. Natrium (Na⁺)

1) Struktur Natrium

Natrium didapat dalam plasma darah dan dalam cairan diluar sel (ekstraseluler), beberapa di antaranya juga terdapat dalam tulang. Jumlah natrium dalam badan manusia diperkirakan sekitar 100-110 g. Konsumsi garam perorangan per hari diperkirakan sekitar 6-18 g NaCl. Klorida juga banyak terdapat pada plasma darah, serta banyak ditemukan dalam kelenjar pencernaan lambung sebagai asam klorida. Ion – ion klorida mengaktifkan enzim amilase dalam mulut untuk memecahkan pati yang dikonsumsi.

Sebagian terbesar dari cairan ekstraseluler, natrium dan klorida juga membantu mempertahankan tekanan osmotik, di samping juga membantu menjaga keseimbangan asam dan basa. Natrium bersama kalsium, magnesium serta kalium dalam cairan ekstraseluler mempunyai reaksi alkalis, sedangkan klorida bersama fosfat, karbonat, sulfat, asam- asam organik, dan protein yang mempunyai reaksi asam.

Sebanyak 95% natrium yang dicerna akan diserap oleh tubuh. Sebagian besar pengeluaran natrium terjadi melalui ginjal. Disamping itu natrium dikeluarkan juga melalui keringat. Setiap liter keringat mengandung 0,5 sampai 3,0 g natrium. Tubuh manusia mengandung 83-97 g natrium, 30-40% dari seluruh natrium terletak di tulang, dan 65-70% dari natrium yang ada dalam tulang tersebut tidak mengalami pertukaran atau lambat sekali pertukarannya dengan cairan tubuh. Diperkirakan sebanyak 65% dari seluruh kandungan natrium dalam tubuh mengalami pertukaran, hal ini tidak tampak berbeda dengan bertambahnya usia atau perbedaan jenis kelamin pada orang dewasa normal.

Tubuh manusia mengandung kira-kira 82 g klorida, dan sebagian besar sebagai ion-ion ekstraseluler. Beberapa di antara klorida juga bersifat intra seluler, dan butir-butir darah merah mempunyai konsentrasi yang paling tinggi, diikuti oleh mukosa lambung, gonad, dan kulit.

2) Fungsi Natrium

- a. Natrium dan Klorida membantu menjaga keseimbangan cairan tubuh.
- b. Klorida membantu proses pencernaan makanan karena unsur ini merupakan komponen esensial dari getah lambung dan usus.

3) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Natrium

a. Kelebihan

Akibat konsumsi terlalu banyak Konsumsi garam terlalu banyak dapat meningkatkan tekanan darah dan hal ini beresiko terhadap stroke dan serangan jantung.

b. Kekurangan

Hiponatremia (mual, kejang) dan hipernatremia (dehidrasi, gangguan mental).

4) Jumlah Natrium yang Dibutuhkan dalam Tubuh (AKG 2019)

Tabel 9.2. Angka Kecukupan Natrium yang Dianjurkan (Per Orang Per Hari)

Kelompok Umur	Kalsium (mg)
Bayi/Anak	
0 – 5 bulan	120
6 – 11 bulan	370
1 – 3 tahun	800
4 – 6 tahun	900
7 – 9 tahun	1000
Laki-laki	
10 – 12 tahun	1300
13 – 15 tahun	1500
16 – 18 tahun	1700
19 – 29 tahun	1500
30 – 49 tahun	1500
50 – 64 tahun	1300
65 – 80 tahun	1100
80+ tahun	1000
Perempuan	
10 – 12 tahun	1400

13 – 15 tahun	1500
16 – 18 tahun	1600
19 – 29 tahun	1500
30 – 49 tahun	1500
50 – 64 tahun	1400
65 – 80 tahun	1200
80+ tahun	1000
Hamil (+an)	
Trimester 1	+0
Trimester 2	+0
Trimester 3	+0
Menyusui (+an)	
6 bulan pertama	+0
6 bulan kedua	+0

5) Metabolisme Natrium

Regulasi metabolisme natrium oleh ginjal dikontrol oleh aldosteron. Apabila konsumsi natrium rendah atau kebutuhan tubuh meningkat, kadar aldosteron akan meningkat dan ginjal lebih banyak menyerap kembali natrium. Ekskresi Natrium terutama dilakukan oleh ginjal. Pengaturan eksresi ini dilakukan untuk mempertahankan homeostasis natrium yang sangat diperlukan untuk mempertahankan volume cairan tubuh. Pengeluaran natrium juga terjadi lewat pengeluaran keringat dan tinja dalam jumlah kecil. Ingesti natrium dipengaruhi oleh rasa dan dorongan homeostatis (selera terhadap garam) untuk mempertahankankeseimbangan natrium.

3. Fosfor

1) Struktur Fosfor

Mineral ini menempati kadar nomor dua dalam tubuh kita setelah kalsium, yaitu 22% dari seluruh mineral yang ada. Kurang lebih 80% berada dalam bentuk kalsium fosfat kristal yang tidak larut, yang memberikan kekuatan pada gigi. Adapun sisanya 20% didistribusi dalam tiap sel dan dalam cairan di luar sel bersama dengan karbohidrat, lipid, protein serta senyawa lainnya. DNA dan RNA terdiri dari fosfor dalam bentuk fosfat, demikian juga membran sel yang membantu menjaga permeabilitas sel. Senyawa seperti ATP dan keratin fosfat, koenzim dari golongan vitamin B, protein konjugasi, fosfolipid, merupakan contoh senyawa fosfat yang penting dalam tubuh kita. Biasanya kira-kira 70 % dari fosfor yang berada dalam makanan dapat diserap oleh tubuh. Penyerapan fosfor dibantu oleh vitamin D dan diekresi melalui urine.

2) Fungsi Fosfor

Fosfor memiliki beberapa peran penting dalam tubuh. Sebagai contoh di antaranya:

- a. Membantu membangun tulang dan gigi
- b. Membantu menghasilkan energi dari makanan yang kita makan

3) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Fosfor

a. Kelebihan

Mengonsumsi suplemen Fosfor dosis tinggi dalam waktu singkat, dapat mengakibatkan diare atau nyeri lambung. Sedangkan konsumsi dosis tinggi dalam waktu lama dapat menurunkan jumlah Kalsium dalam tubuh, sehingga tulang lebih beresiko terhadap fraktur.

b. Kekurangan

Mengakibatkan demineralisasi tulang dan terjadi pertumbuhan yang kurang baik.

4) Jumlah Fosfor yang Dibutuhkan dalam Tubuh (AKG 2019)

Tabel 9.3. Angka Kecukupan Fosfor yang Dianjurkan
(Per Orang Per Hari)

Kelompok Umur	Kalsium (mg)
Bayi/Anak	
0 – 5 bulan	100
6 – 11 bulan	275
1 – 3 tahun	460
4 – 6 tahun	500
7 – 9 tahun	500
Laki-laki	
10 – 12 tahun	1250
13 – 15 tahun	1250
16 – 18 tahun	1250
19 – 29 tahun	700
30 – 49 tahun	700
50 – 64 tahun	700
65 – 80 tahun	700
80+ tahun	700
Perempuan	
10 – 12 tahun	1250
13 – 15 tahun	1250
16 – 18 tahun	1250
19 – 29 tahun	700
30 – 49 tahun	700
50 – 64 tahun	700
65 – 80 tahun	700
80+ tahun	700
Hamil (+an)	

Trimester 1	+0
Trimester 2	+0
Trimester 3	+0
Menyusui (+an)	
6 bulan pertama	+0
6 bulan kedua	+0

5) Metabolisme Fosfor

Fosfor diabsorpsi secara efisien dalam bentuk fosfor bebas didalam usus setelah dihidrolisis dan dilepas dari makanan. Fosfor dari makanan dilepaskan oleh enzimalkalin fosfatase didalam mukosa usus halus dan diabsorpsi secara aktif dan difusi pasif. Absorpsi aktif dibantu oleh bentuk aktif vitamin D.

Sebagian besar fosfor didalam darah sebagai fosfat anorganik atau fosfolipida. Kadar fosfor didalam darah diatur oleh hormon parathroid (PTH) dan hormone kalsitonin. Hormon tersebut berinteraksi dengan vitamin D untuk mengatur jumlah fosfor yang diserap, jumlah yang ditahan oleh ginjal, dan jumlah yang dibebaskan serta yang disimpan kedalam tulang. Hormon PTH menurunkan reabsorpsi fosfor oleh ginjal, kalsitonin meningkatkan ekskresi fosfat oleh ginjal.

4. Magnesium

1) Struktur Magnesium

Magnesium agak kuat, berwarna putih keperakan dan ringan (satu pertiga lebih ringan daripada aluminium). Magnesium berubah kusam apabila terdedah kepada udara, tetapi berlainan dengan logam-logam alkali, penyimpanan dalam persekitaran yang bebas oksigen tidaklah diperlukan kerana ia akan membentuk satu lapisan pelindung oksida yang sukar ditembus atau diasingkan. Dalam bentuk serbuk, logam ini terbakar dengan nyalaan putih apabila terdedah kepada keadaan lembap. Magnesium sukar

terbakar jika dalam bentuk pukal, dan lebih mudah untuk dibakar jika dipotong dalam bentuk jalur nipis. Sangat susah untuk mematikan pembakaran magnesium karena itu mudah terbakar bersama nitrogen (membentuk magnesium nitrida), dan karbon dioksida (membentuk magnesium oksida dan karbon). Pembakaran pita magnesium akan tetap terus jika pita direndam dalam air, sehingga pita magnesium habis terbakar. Magnesium menghasilkan cahaya putih yang terang apabila dibakar dalam udara. Ini digunakan pada zaman awal fotografi di mana serbuk magnesium.

2) Fungsi Magnesium

Magnesium memiliki sejumlah fungsi penting, contohnya:

- a. Membantu proses pembentukan energi dari makanan
- b. Mendukung fungsi kelenjar paratiroid. Kelenjar paratiroid menghasilkan hormon yang penting bagi kesehatan tulang

3) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Magnesium

a. Kelebihan

Kelebihan magnesium, yang dikenal sebagai hipermagnesemia, terjadi ketika kadar magnesium dalam darah melebihi batas normal. Kondisi ini biasanya disebabkan oleh gangguan fungsi ginjal yang menghambat pembuangan magnesium dari tubuh, konsumsi suplemen magnesium yang berlebihan, atau penggunaan obat-obatan seperti antasida dan pencahar yang mengandung magnesium.

Dampak kelebihan magnesium pada tubuh dapat bervariasi, tergantung tingkat keparahannya. Pada tahap ringan, gejala yang muncul meliputi mual, muntah, diare, dan rasa lemas. Seiring peningkatan kadar magnesium, sistem saraf dan otot dapat terpengaruh, menyebabkan penurunan refleks, kelemahan otot, serta gangguan pernapasan. Pada

kondisi yang lebih serius, hipermagnesemia dapat memengaruhi fungsi jantung, seperti menurunkan tekanan darah secara drastis (hipotensi), memperlambat detak jantung (bradikardia), hingga berpotensi menyebabkan henti jantung.

b. Kekurangan

Kekurangan magnesium akan menyebabkan hypomagnesemia dengan gejala denyut jantung tidak teratur, insomnia, lemah otot, kejang kaki, serta telapak kaki dan tangan gemetar. Pemberian magnesium sulfat kepada pasien yang kekurangan magnesium dapat membantu mengurangi getaran otot seperti terlihat dari hasil percobaan tanda tangan pasien sebelum dan sesudah diberi pengobatan $MgSO_4$.

4) Jumlah Magnesium yang Dibutuhkan dalam Tubuh (AKG 2019)

Tabel 9.4. Angka Kecukupan Magnesium yang Dianjurkan (Per Orang Per Hari)

Kelompok Umur	Kalsium (mg)
Bayi/Anak	
0 – 5 bulan	30
6 – 11 bulan	55
1 – 3 tahun	65
4 – 6 tahun	95
7 – 9 tahun	135
Laki-laki	
10 – 12 tahun	160
13 – 15 tahun	225
16 – 18 tahun	270
19 – 29 tahun	360
30 – 49 tahun	360
50 – 64 tahun	360

65 – 80 tahun	350
80+ tahun	350
Perempuan	
10 – 12 tahun	170
13 – 15 tahun	220
16 – 18 tahun	230
19 – 29 tahun	330
30 – 49 tahun	340
50 – 64 tahun	340
65 – 80 tahun	320
80+ tahun	320
Hamil (+an)	
Trimester 1	+0
Trimester 2	+0
Trimester 3	+0
Menyusui (+an)	
6 bulan pertama	+0
6 bulan kedua	+0

5) Metabolisme Magnesium

Tubuh manusia dewasa normal mengandung kira-kira 1,000 mmol magnesium (22-26g), sekitar 67% magnesium ditemukan di tulang, 31% di dalam sel (intraselular) dan sekitar 2% di serum (ekstraselular). Pada dewasa normal, magnesium serum total berkisar antara 0,70 dan 1,10 mmol/L, sekitar 30% berikatan dengan protein (albumin 60-70% dan globulin), 56% terionisasi dan sisanya membentuk kompleks dengan berbagai anion seperti fosfat dan garam sitrat. Kebutuhan harian magnesium yang direkomendasikan pada dewasa adalah 4,5 mg/kg/hari. Asupan magnesium rata-rata pada dewasa normal kurang lebih 12

mmol/hari, sekitar 24-76% diserap usus dan sisanya dieksresi melalui tinja dan urin.

Homeostasis magnesium dipertahankan oleh usus, tulang dan ginjal. Magnesium terutama diserap di usus halus dan disimpan dalam tulang, serta kelebihan dieksresikan melalui ginjal dan tinja. Faktor yang mengontrol absorpsi magnesium belum sepenuhnya dipahami, studi mengemukakan peran hormon paratiroid (PTH) dalam mengatur absorpsi magnesium. Ginjal berperan utama dalam homeostasis magnesium dan pemeliharaan konsentrasi magnesium plasma. Dibawah kondisi normal, bila 80% dari total plasma magnesium ultrafiltrable, 84 mmol magnesium disaring setiap hari dan sekitar 3-5 mmol ditemukan di urin. Sekitar 15- 20% magnesium yang disaring diserap kembali di segmen tubulus proksimal, 65-75% di thick ascending limb of loop of Henle (TALH) dan 5- 10% di distal convoluted tubule (DCT).

5. Rangkuman

Mineral makro seperti kalsium, natrium, magnesium, dan fosfor merupakan elemen penting yang dibutuhkan tubuh dalam jumlah besar untuk menjaga fungsi biologis. Kalsium berperan penting dalam pembentukan tulang dan gigi, kontraksi otot, serta proses koagulasi darah. Fosfor membantu membangun tulang, gigi, serta terlibat dalam produksi energi melalui ATP. Magnesium berperan dalam metabolisme energi, sintesis protein, dan aktivitas enzimatik, sedangkan natrium berfungsi menjaga keseimbangan cairan, elektrolit, dan mendukung impuls saraf.

Kelebihan mineral makro dapat menyebabkan gangguan seperti hiperkalsemia akibat kelebihan kalsium, diare karena kelebihan magnesium, atau hipertensi akibat tingginya asupan natrium. Sebaliknya, kekurangan mineral ini dapat menyebabkan

osteoporosis, gangguan pertumbuhan, kelemahan otot, serta masalah metabolisme energi.

Untuk memenuhi kebutuhan mineral makro, konsumsi makanan sehat seperti sayuran hijau, produk susu, daging, kacang-kacangan, serta biji-bijian sangat dianjurkan. Jumlah yang direkomendasikan sesuai Angka Kecukupan Gizi (AKG) bervariasi berdasarkan usia, jenis kelamin, dan kondisi fisiologis tubuh

6. Latihan dan Jawaban

- 1) **Apa fungsi utama kalsium dalam tubuh manusia?**
 - A. Menjaga keseimbangan cairan tubuh
 - B. Mendukung kontraksi otot dan pembentukan tulang
 - C. Sebagai sumber energi utama
 - D. Mengatur tekanan darah
 - E. Membantu sintesis hormon
- 2) **Manakah dari berikut ini yang merupakan sumber utama fosfor?**
 - A. Sayuran hijau
 - B. Produk susu dan biji-bijian
 - C. Daging merah
 - D. Minyak nabati
 - E. Buah-buahan
- 3) **Kelebihan natrium dapat menyebabkan gangguan kesehatan berupa:**
 - A. Osteoporosis
 - B. Hipotensi
 - C. Hipertensi
 - D. Anemia
 - E. Demineralisasi tulang
- 4) **Mineral yang berperan dalam metabolisme energi dan sintesis protein adalah:**

- A. Natrium
 - B. Fosfor
 - C. Magnesium
 - D. Kalsium
 - E. Kalium
- 5) **Apa akibat dari kekurangan kalsium pada tubuh?**
- A. Hipertensi
 - B. Kelemahan otot
 - C. Osteoporosis
 - D. Dehidrasi
 - E. Hiperkalsemia
- 6) **Di bawah ini yang termasuk peran utama fosfor adalah:**
- A. Menjaga tekanan darah
 - B. Membantu pembentukan ATP
 - C. Menyeimbangkan elektrolit tubuh
 - D. Menjaga kontraksi otot
 - E. Menjaga suhu tubuh
- 7) **Bagaimana tubuh mengatur homeostasis magnesium?**
- A. Melalui hormon insulin
 - B. Dengan bantuan hormon paratiroid (PTH)
 - C. Melalui mekanisme glikogenolisis
 - D. Dengan pelepasan hormon adrenalin
 - E. Melalui penyerapan di usus besar
- 8) **Apa dampak kekurangan magnesium dalam tubuh?**
- A. Hiperkalsemia
 - B. Gangguan fungsi enzim dan kejang otot
 - C. Osteoporosis
 - D. Hipertensi
 - E. Gangguan metabolisme lemak
- 9) **Fungsi utama natrium dalam tubuh adalah:**
- A. Menjaga kesehatan tulang
 - B. Membantu kontraksi otot

- C. Menyeimbangkan cairan tubuh dan impuls saraf
- D. Sebagai sumber energi cadangan
- E. Mengatur metabolisme lipid

10) **Apa yang terjadi jika konsumsi magnesium berlebihan?**

- A. Demineralisasi tulang
- B. Nyeri lambung dan diare
- C. Gangguan metabolisme protein
- D. Hipotensi akut
- E. Kelemahan saraf dan otot

Jawaban:

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

BAB X

I, Zn, Fe

Tujuan Instruksi

Setelah mengikut

MINERAL MIKRO

(K, I, Zn, Fe, Se, F)

Pramitha Sari, S.Gz, RD, M.H.Kes

1. Mampu memahami dan menjelaskan sifat dan fungsi mineral mikro di dalam tubuh.
2. Mampu memahami dan menjelaskan sumber mineral mikro untuk memenuhi kebutuhan
3. Mampu memahami dan menjelaskan kelebihan dan kekurangan mineral mikro terhadap Kesehatan.
4. Mampu memahami dan menjelaskan jumlah mineral mikro yang dibutuhkan berdasarkan AKG 2019.

1. Kalium (K)

Kalium atau dikenal juga dengan nama potassium merupakan salah satu mineral makro yang memiliki peran penting dalam mengendalikan fungsi sel saraf dan otot tubuh manusia. Kalium lebih banyak terdapat di dalam sel (intrasel) dibandingkan dengan

natrium, oleh sebab itu maka kalium memiliki peran yang penting dalam menjaga keseimbangan cairan tubuh dan mengatur tekanan darah. Jumlah kalium normal dalam darah berada pada kisaran nilai 3,5-5 milimol/liter (mmol/L) yang banyak ditemukan dalam makanan. Selama ini diet tinggi kalium memiliki kaitan erat dengan penurunan tekanan darah. (1).

1) Fungsi Kalium

a. Menurunkan tekanan darah

Kalium dapat membantu mengurangi ketegangan pada dinding pembuluh darah sehingga memberikan efek dalam penurunan tekanan darah. Cara lain untuk penurunan tekanan darah adalah dengan mengurangi kadar garam berlebih di dalam tubuh melalui mekanisme diuretic, yaitu pengeluaran melalui urine.

b. Memelihara fungsi saraf

Kekurangan kalium dalam waktu lama dapat mengganggu kemampuan otak dalam menghasilkan impuls saraf. Proses pengiriman impuls listrik dari otak ke organ tubuh merupakan cara pengiriman pesan untuk mengatur kontraksi otot dan detak jantung, serta Upaya tubuh untuk dapat merasakan nyeri.

c. Menjaga kesehatan jantung dan pembuluh darah

Kalium dapat mencegah penyempitan pembuluh darah

d. Kalium memiliki peran yang sangat penting dalam pertumbuhan, diperkirakan 1050 mg kalium berperan dalam penambahan 0,5 kg berat badan.

e. Kalium memiliki peran untuk mempertahankan tekanan osmotik

f. Transmisi impuls syaraf

g. Membantu pelepasan insulin dari pancreas

- h. Melemaskan dan mengendurkan otot, melalui kerjasama dengan magnesium
- i. Menjadi bagian dari enzim, dan
- j. Memelihara keseimbangan asam basa di dalam tubuh (2).

2) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Kalium :

- a. Kelebihan serum kalium disebut juga dengan hiperkalemia dapat menyebabkan keracunan yang dapat mengakibatkan aritmia bahkan henti jantung (cardiac arrest). (3)
- b. Kekurangan kalium atau disebut juga dengan hipokalemia juga dapat menyebabkan aritmia, kelemahan otot, iritabilitas syaraf, hiperkalsiuria, intoleransi glukosa dan disorientasi mental. Hipokalemia juga dapat menyebabkan refeeding syndrome pada pasien malnutrisi yang sedang menjalani program refeeding secara massif melalui infus (iv) maupun NGT. (3)
- c. Kekurangan kalium tingkat sedang berhubungan dengan penurunan tekanan darah, peningkatan kalsium urinaria, peningkatan resorpsi tulang dan penurunan pembentukan tulang. (3).

3) Jumlah Kalium yang Dibutuhkan oleh Tubuh (4)

Tabel 10.1. Angka Kecukupan Kalium yang Dianjurkan (Per Orang Per Hari)

Usia	Angka Kecukupan Gizi (mg)
0-5 bulan	400
6-11 bulan	700
1-3 tahun	2600
4-6 tahun	2700
7-9 tahun	3200
	Laki-laki
10-12 tahun	3900
13-15 tahun	4800
16-18 tahun	5300
19 tahun ke atas	4700

Perempuan	
10-12 tahun	4400
13-15 tahun	4800
16-18 tahun	5000
19 tahun ke atas	4700
Tambahan untuk Kondisi Khusus	
Ibu Menyusui	+400

4) Metabolisme Kalium

- Lebih dari 85% kalium yang dikonsumsi tubuh akan diabsorpsi di usus halus melalui difusi pasif oleh pompa K+ATPase
 - Kalium memberikan efek ekskresi kalsium melalui urine.
 - Kalium diekskresi keluar dari tubuh melalui ginjal dan sedikit sekali melalui feses (3).
- 2) Sumber : pisang, melon, mangga, papaya, alpukat, sayuran berhijau daun, legumes, nuts, seeds, kacang, kentang, asparagus, jamur dan okra, jeruk, anggur, pir, kiwi, nectar, susu, yoghurt (1).

2. Yodium (I)

Yodium atau Iodium merupakan mineral mikro atau *trace element* yang banyak tersebar di alam. Iodium terdapat di air laut, gunung bahkan tanah. Yodium juga terdapat pada banyak bahan makanan, seperti ikan laut, kerrang, sereal dan padi-padian. Yodium diserap ke dalam darah melalui saluran cerna untuk kemudian diabsorpsi oleh kelenjar tiroid untuk kemudian dipergunakan sebagai bahan sintesis hormon tiroksin. Tiroksin akan masuk ke dalam darah lalu dibawa ke sel untuk mengatur metabolisme tubuh. Dalam kelenjar tiroid, tiroksin membentuk monoiodotirosin (MIT) dan diiodotirosin (DIT). 2 DIT membentuk hormon tiroksin (T4), DIT+MIT membentuk triiodotironin (T3). Jika kadar tiroksin dalam darah turun, kelenjar endokrin akan

mengeluarkan faktor Pelepas TRF sementara kelenjar hipofisis akan mengeluarkan tyroid stimulating hormone TSH. Kedua hormon tersebut akan menstimulasi kelenjar tiroid untuk memproduksi hormon tiroksin yang akan meningkatkan kecepatan metabolisme tubuh. (1)

1) Fungsi Yodium

Yodium membantu proses pembentukan hormon dari kelenjar tiroid untuk menjaga kesehatan sel dan laju metabolik. Bentuk yodium dalam tubuh adalah tiroksin (T4) dan tiroid (T3) (1).

2) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Yodium

Akibat kekurangan yodium akan menyebabkan penyakit gondok, ditandai dengan pembesaran di area leher karena pembesaran kelenjar tiroid sebagai kompensasi terhadap terbatasnya jumlah yodium dalam tubuh. Apabila kekuarangan yodium terjadi pada ibu hamil maka efeknya anak yang dilahirkan bisa mengalami kretinisme. Penderita kretinisme ditandai dengan ciri gangguan pertumbuhan yang mengakibatkan anak menjadi kerdil dan gangguan mental. Akibat aktivitas kelenjar tiroid berlebihan menyebabkan penderitanya terlihat gugup, kehilangan berat badan, tidak mampu bertoleransi terhadap panas, tremor atau gemetar dan bola mata terlihat menonjol (1).

3) Jumlah Yodium yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AKG) (4)

Tabel 10.2. Angka Kecukupan Yodium yang Dianjurkan
(Per Orang Per Hari)

Usia	Angka Kecukupan Gizi (mcg)
0-5 bulan	90
6-11 bulan	120
1-3 tahun	90
4-6 tahun	120

7-9 tahun		120
	Laki-laki	
10-12 tahun		120
13-15 tahun		150
16-18 tahun		150
19 tahun ke atas		150
	Perempuan	
10-12 tahun		120
13-15 tahun		150
16-18 tahun		150
19 tahun ke atas		150
	Tambahan untuk Kondisi Khusus	
	Ibu Hamil	+70
	Ibu Menyusui	+140

3. Zink (Zn)

Zink memiliki peran penting dalam proses tumbuh dan kembang, fungsi neurologis, menjaga daya tahan tubuh dan juga reproduksi. Tubuh manusia mengandung sekitar 1,5 hingga 2,5 gram zinc. Zinc dapat ditemukan pada seluruh organ dan jaringan, terutama intraseluler dan cairan tubuh. Zinc ditemukan pada bahan makanan bersama asam amino sebagai bagian dari peptide dan protein bersama asam nukleat (1).

1) Fungsi Zinc

Zinc dapat ditemukan pada seluruh organ dan jaringan, terutama intraseluler dan cairan tubuh. Zinc ditemukan pada bahan makanan Bersama asam amino sebagai bagian dari peptide dan protein Bersama asam nukleat. Sumber makanan terbaik antara lain : daging merah dan makanan laut terutama oyster dan moluska. Sedangkan sumber zinc pada produk nabati yang baik bisa ditemukan pada whole grain (barn and germ) dan sayuran berdaun dan umbi-umbian. Bahan makanan yang berasal dari hewan memberikan kontribusi sebesar 40-70% zinc dalam

diet.Zinc yang terkandung pada Produk nabati diabsorbsi lebih sedikit dibandingkan dengan sumber dari produk hewani (2).

2) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Zinc

Gejala klinis kekurangan zinc umumnya dapat terlihat dari kegagalan untuk tumbuh dengan optimal sesuai standar (2).

3) Jumlah Zinc yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK) (4)

Tabel 10.3. Angka Kecukupan Zinc yang Dianjurkan (Per Orang Per Hari)

Usia	Angka Kecukupan Gizi (mg)
0-5 bulan	1,1
6-11 bulan	3
1-3 tahun	3
4-6 tahun	5
7-9 tahun	5
	Laki-laki
10-12 tahun	8
13-15 tahun	11
16-18 tahun	11
19 tahun ke atas	11
	Perempuan
10-12 tahun	8
13-15 tahun	9
16-18 tahun	9
19 tahun ke atas	8
	Tambahan untuk Kondisi Khusus
Ibu Hamil	+2
	+4
	+4
Ibu Menyusui	+5

4) Metabolisme Zinc

- Zinc perlu dihidrolisis dari asam amino dan asam nukleat supaya dapat diabsorbsi.
- Pada proses pencernaan, zinc dipecah oleh protease dan nuclease di lambung dan usus halus. HCL memainkan peran penting dalam penyerapan dan pencernaan zinc (3).

5) Sumber Zinc

Sumber makanan terbaik antara lain : daging merah dan makanan laut terutama oyster dan moluska. Sedangkan sumber zinc pada produk nabati yang baik bisa ditemukan pada whole grain (barn and germ) dan sayuran berdaun dan umbi2an. Bahan makanan yang berasal dari hewan memberikan kontribusi sebesar 40-70% zinc dalam diet.Zinc yang terkandung pada Produk nabati diabsorbsi lebih sedikit dibandingkan dengan sumber dari produk hewani (2).

4. Selenium (Se)

Selenium merupakan salah satu mineral makro yang banyak dijumpai pada roti, ikan, daging dan telur. Bentuk selenium dalam tubuh adalah selenit dan selenometionin. Dalam tubuh selenium ditemukan sebagai bagian dari enzim glutation peroksidase. (1)

1) Fungsi Selenium

Selenium berperan penting untuk daya tahan tubuuh, metabolisme hormon tiroid dan reproduksi. Sebagai bagian dari system pertahanan tubuh, selenium mencegah kerusakan sel dan jaringan (5).

2) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Selenium

Kekurangan selenium termanifestasi dalam penyakit Keshan. Penyakit ini ditemukan di China dengan ciri ciri mudah Lelah meskipun aktivitas yang dilakukan tergolong ringan serta kehilangan nafsu makan. Kelebihan selenium menyebabkan keracunan yang diistilahkan sebagai selenosis. Gejala selenosis ditunjukkan dengan mual, muntah, cepat Lelah, rambut rontok dan pertumbuhan tidak normal (5).

3) Jumlah Selenium yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK) (4)

Tabel 10.4. Angka Kecukupan Selenium yang Dianjurkan
(Per Orang Per Hari)

Usia	Angka Kecukupan Gizi (mcg)
0-5 bulan	7
6-11 bulan	10
1-3 tahun	18
4-6 tahun	21
7-9 tahun	22
Laki-laki	
10-12 tahun	22
13-15 tahun	30
16-18 tahun	36
19 tahun ke atas	30
Perempuan	
10-12 tahun	19
13-15 tahun	24
16-18 tahun	26
19 tahun ke atas	24
Tambahan untuk Kondisi Khusus	
Ibu Hamil	+5
	+5
	+5
Ibu Menyusui	+10
	+10

5. Zat Besi (Fe)

Tubuh manusia mengandung sekitar 2 hingga 4 gram zat besi, setara dengan 38 mg zat besi per kilo gram berat badan pada Wanita dan 50 mg per kilo gram berat badan pada laki-laki. Lebih dari 65% zat besi dalam tubuh disimpan dalam hemoglobin, sekitar 10% disimpan dalam myoglobin, 1 hingga 5 persen sebagai bagian dari enzim dan sisanya dapat ditemukan dalam

darah atau jaringan lainnya. Jumlah zat besi dalam tubuh tidak hanya dipengaruhi oleh berat badan, melainkan juga dipengaruhi oleh kondisi fisiologis lainnya seperti faktor usia, jenis kelamin, kehamilan dan pertumbuhan (3).

1) Fungsi Zat Besi

- a. Sebagai hemoglobin, zat besi memiliki fungsi untuk mengangkut oksigen dan pernafasan sel
- b. Sebagai myoglobin, fungsi zat besi adalah sebagai Cadangan oksigen di dalam otot
- c. Sebagai komponen enzim, terlibat dalam fungsi imun dan sitokrom yang berperan penting untuk produksi energi (5).

2) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Zat Besi

Akibat kelebihan zat besi dapat menyebabkan keluhan gastrointestinal berupa konstipasi. Pemberian zat besi dosis tinggi juga dapat menyebabkan mual, muntah dan diare. (5)

Defisiensi zat besi terjadi dalam 3 tahap, yaitu :

- a. Depleksi Fe : ditandai dengan penurunan Cadangan Fe dan kadar ferritin serum hingga di bawah 12 µg/L. Pada tahap ini komponen zat besi lain umumnya berada pada rentang normal
- b. Eritropoesis defisiensi Fe : selain terjadi depleksi Fe, pasokannya tidak dapat memenuhi kebutuhan untuk memproduksi hemoglobin. Ferritin serum rendah, konsentrasi Fe serum juga rendah, kejenuhan transferrin <16% namun kadar hemoglobin masih dalam rentang normal.
- c. Anemia defisiensi fe : kadar hemoglobin mulai menunjukkan penurunan, terjadi mikrositik dan hipokromik pada sel darah merah, MCV dan MCV juga menurun dari angka normal (5).

3) Jumlah Zat Besi yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK) (4)

Tabel 10.5. Angka Kecukupan Zat Besi yang Dianjurkan
(Per Orang Per Hari)

Usia	Angka Kecukupan Gizi (mg)
0-5 bulan	0,3
6-11 bulan	11
1-3 tahun	7
4-6 tahun	10
7-9 tahun	10
	Laki-laki
10-12 tahun	8
13-15 tahun	11
16-18 tahun	11
19 tahun ke atas	9
	Perempuan
10-12 tahun	8
13-15 tahun	15
16-18 tahun	15
19 tahun ke atas	8
	Tambahan untuk Kondisi Khusus
Ibu Hamil	+2
	+4
	+4
Ibu Menyusui	+5
	+5

6. Fluor (F)

Fluor memiliki peran dalam mencegah kerusakan gigi dan kehilangan kalsium yang dapat mengganggu stabilitas tulang. Fluor bisa ditemukan dalam air minum yang kita konsumsi sehari-hari. (1)

1) Fungsi Fluor

Fluor memberikan kontribusi untuk menguatkan dan mencegah kerusakan gigi. (1)

2) Akibat Kelebihan dan Kekurangan Fluor

Kekurangan fluor menyebabkan kerusakan yang biasa disebut karies gigi. Selain itu kekurangan fluor juga dapat menyebabkan pertumbuhan gigi menjadi tidak normal. Kelebihan fluor dan betis fluorosis dapat terlihat sejak anak berusia 6 tahun. Diawali dengan gejala enamel gigi berubah warna menjadi kehitaman. Jika kelebihan fluor memasuki tahap lanjut umumnya gejala yang ditimbulkan berupa kekakuan, sakit di persendian, deformasi tulang belakang dan betis bengkok. (1)

3) Jumlah yang Dibutuhkan dalam Tubuh (RDA/AGK) (4)

Tabel 10.6. Angka Kecukupan Fluor yang Dianjurkan (Per Orang Per Hari)

Usia	Angka Kecukupan Gizi (mg)
0-5 bulan	0,01
6-11 bulan	0,5
1-3 tahun	0,7
4-6 tahun	1
7-9 tahun	1,4
	Laki-laki
10-12 tahun	1,8
13-15 tahun	2,5
16-18 tahun	4
19 tahun ke atas	4
	Perempuan
10-12 tahun	1,9
13-15 tahun	2,4
16-18 tahun	3
19 tahun ke atas	3

A. Rangkuman

Mineral mikro merupakan zat gizi yang diperlukan oleh tubuh dalam jumlah sekelumit (*trace element*). Walaupun kebutuhannya sangat sedikit namun peranannya sangat penting dalam menunjang metabolisme tubuh terutama dalam pembentukan hormon dan enzim.

B. Latihan dan Jawaban

1. Bagian dari saluran cerna yang melakukan penyerapan zat besi secara aktif adalah...

2. Fe dilepaskan dari bahan organik oleh asam lambung dan...
3. Zat besi dibawa melalui sirkulasi darah ke seluruh tubuh dalam bentuk
4. Organ yang memproduksi hemoglobin dan sel darah merah, adalah..
5. Zat besi disimpan dalam otot dalam bentuk
6. Makanan atau minuman yang dapat meningkatkan penyerapan zat besi
7. Iodium merupakan trace element yang esensial untuk pembentukan hormon
8. Makanan yang dapat mengganggu absorpsi iodium adalah
9. Zinc dihidrolisis dari asam amino oleh
10. Protein yang membantu penyerapan zinc di dalam usus adalah

Jawaban

1. Duodenum
2. Vitamin C
3. Transferin
4. Sum sum tulang belakang, hepar, limfa
5. Mioglobin
6. Yang kaya vitamin C seperti jus jambu, jus jeruk
7. Tiroid
8. Brokoli, kol/kubis, singkong
9. Protease
10. Metalotionein

DAFTAR PUSTAKA

1. Pakar Gizi Indonesia (2017). Ilmu Gizi : Teori dan Aplikasi . Jakarta : EGC.
2. Wardlaw, Gordon M. (2016). Contemporary Nutrition. New York : Mc Graw Hill Education.
3. Gropper S., Smith, J.L, Groff, J.L (2021). Advanced Nutrition And Human Metabolism : Fifth Edition. Belmont : Wadsworth.
4. Kementerian Kesehatan (2019). Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2019 Tentang Angka Kecukupan Gizi Yang Dianjurkan Untuk Masyarakat Indonesia. Jakarta
5. Webster-Gandy, Joan., dkk (2014). Gizi & Dietetika, Edisi 2. Jakarta : EGC

BAB XI & MINERAL

INTERAKSI VITAMIN & MINERAL

Winda Irwanti

Tujuan Instruksional Khusus

1. Mampu menjelaskan dan memahami konsep dasar interaksi zat gizi, khususnya pada zat gizi vitamin dan mineral.
2. Mampu menjelaskan dan memahami jenis-jenis interaksi zat gizi dan mekanismenya.
3. Mampu menjelaskan dan memahami beberapa contoh interaksi antar vitamin dan mineral.

1. Definisi dan Jenis-jenis Interaksi Zat Gizi

Telah dijelaskan pada bab-bab sebelumnya bahwa vitamin dan mineral mempunyai fungsi-fungsi yang esensial bagi tubuh manusia. Vitamin dan mineral adalah zat gizi yang tidak dapat diproduksi oleh tubuh, sehingga hanya bisa didapatkan dari luar yaitu makanan. Defisiensi vitamin dan mineral dalam tubuh dapat menyebabkan tidak optimalnya fungsi-fungsi organ tubuh dan dapat memberikan efek yang buruk bagi kesehatan, baik jangka pendek maupun jangka panjang. Penyebab dari defisiensi ini tidak hanya dikarenakan oleh kurangnya asupan saja, namun penyebab lain seperti absorpsi, metabolisme, transport, fungsi digesti, interaksi dengan zat gizi lain, dan ekskresi yang juga bisa disebabkan oleh adanya kondisi penyakit tertentu (1). Pada bab ini, kita khusus akan membahas mengenai interaksi vitamin dan mineral dalam tubuh dan bagaimana dampaknya terhadap tubuh kita.

Tidak dapat kita hindari bahwa dalam satu jenis makanan yang kita makan pastilah di dalamnya terkandung berbagai macam zat gizi. Setiap masing-masing zat gizi ini mempunyai karakter susunan kimia yang memberikan kekhasan dan sifat-sifat khusus ketika berada di dalam tubuh manusia, terutama saluran pencernaan. Begitupun dengan zat gizi jenis vitamin dan mineral, unsur-unsur kimia ini didalamnya sangat potensial untuk saling berinteraksi di dalam saluran pencernaan. Sehingga bisa dikatakan defisini dari interaksi vitamin dan mineral adalah pengaruh timbal balik antara berbagai jenis vitamin dan mineral dalam tubuh. Zat gizi vitamin dan mineral ini tidak bekerja sendiri-sendiri, melainkan saling mempengaruhi penyerapan, metabolisme, dan fungsi di dalam tubuh.

Ada berbagai jenis bentuk interaksi antara vitamin dan mineral ini, yaitu :

- Interaksi Sinergisme : Ketika dua atau lebih zat gizi bekerja sama untuk meningkatkan efektivitas masing-masing.
- Interaksi Antagonisme: Ketika satu zat gizi menghambat penyerapan atau fungsi zat gizi lainnya.
- Interaksi Sinergisme dan Antagonisme: Terjadi ketika dua zat gizi ketika berada pada satu bagian jaringan tubuh berinteraksi secara sinergis, namun di bagian yang lain berinteraksi secara antagonis.

Konsep yang penting untuk difahami adalah bahwa jenis-jenis interaksi ini tidak berhubungan dengan baik atau tidaknya terhadap metabolisme, atau bisa dikatakan interaksi sinergisme tidak selalu baik, atau interaksi antagonisme tidak selalu buruk. Pertimbangan-pertimbangan dosis (*dose response*) pun menjadi hal yang penting agar fungsi zat zat gizi tersebut bekerja optimal di dalam tubuh.

Pemahaman mengenai interaksi ini menjadi sangat penting terutama sebagai bahan pertimbangan dalam dalam memberikan

asuhan gizi, baik asuhan gizi klinik maupun asuhan gizi masyarakat, serta dalam mengembangkan penelitian di bidang gizi. Zat-zat gizi yang bersinergi dapat dipertimbangkan untuk diberikan secara berdampingan, baik dalam ruang lingkup suplementasi maupun rancangan pemberian menu makanan. Sedangkan zat-zat gizi yang bersifat antagonis dan kompetitif dengan strategi atau teknologi tertentu dapat diberikan secara lebih presisi agar tidak mengganggu fungsinya satu sama lain (2).

2. Interaksi Sinergisme

Interaksi sinergisme zat gizi mengacu pada konsep bahwa efek dari kombinasi dua atau lebih zat gizi yang bekerja bersama dapat mempunyai dampak fisiologis yang lebih besar pada tubuh dibandingkan jika dikonsumsi masing-masing. (3). Interaksi sinergisme ini juga terjadi antara vitamin dan mineral tertentu, berikut beberapa contoh interaksi ini.

1) Zat Besi dengan Vitamin C dan Vitamin A

Pada interaksi antara zat gizi ini, zat besi menjadi mineral yang didukung dengan adanya kehadiran vitamin C. Jika dilihat dengan ruang lingkup sempit, vitamin C dalam metabolismenya tidak mendapatkan keuntungan apa-apa dengan adanya zat besi. Namun demikian, kita tidak bisa memandang sebuah sistem dengan cara demikian. Fungsi krusial zat besi sebagai pengikat oksigen di dalam darah, menyokong berjalannya segala sistem metabolisme dalam tubuh, sehingga pada akhirnya ini pun akan mendukung metabolisme dari vitamin C. Berikut kita ingat kembali ulasan singkat karakteristik vitamin C, vitamin A dan zat besi.

Tabe 11.1. Karakteristik Zat Besi, Vitamin C dan Vitamin A

	Zat Besi	Vitamin C	Vitamin A
Fungsi utama	Komponen pembentuk hemoglobin sebagai	Diperlukan untuk produksi kolagen,	Sintesis rhodopsin (sel

	<p>transporter oksigen di dalam tubuh</p> <p>Metabolisme asam amino</p> <p>Sintesis hormon</p>	<p>protein struktural yang ditemukan di kulit, tulang, dentin, tendon, dan tulang rawan (jaringan ikat).</p> <p>Sintesis karnitin, yaitu zat yang diperlukan untuk memproduksi energi.</p> <p>Sebagai antioksidan</p>	<p>fotoreseptor mata), Pertumbuhan dan diferensiasi sel, pertumbuhan tulang dan imunitas.</p> <p>Antioksidan</p>
Storage (penyimpanan)	<p>65% dalam hemoglobin</p> <p>10% dalam myoglobin</p> <p>1-5% dalam enzim sisanya dalam darah,</p>	<p>Konsentrasi tinggi vitamin C ditemukan di jaringan yang dipilih termasuk adrenal dan hipofisis kelenjar (dengan masing-masing memiliki sekitar 30-50 mg/100 g jaringan basah) serta di mata, otak, sel darah putih, dan neuron.</p>	<p>Vitamin A disimpan terutama di hati, dengan jumlah yang lebih sedikit di ginjal, paru-paru, dan jaringan adiposa.</p>
Kebutuhan per hari dari diet	<p>Anak-anak 9 mg</p>	<p>Anak-anak 40-45 mg</p>	<p>Anak-anak 375-500 RE</p>

Sumber makanan	Dewasa 15-24 mg Hati sapi, daging sapi, daging ayam, makanan laut seperti ikan dan kerang, bayam dan sawi hijau	Dewasa 50-85 mg Buah-buahan dan sayur berasa asam, misal tomat, jeruk, strawberry, anggur, kiwi, paprika, brokoli, nanas, alpukat	Dewasa 600-900 RE Hati sapi dan unggas. Produk susu. Buah dan sayur bewarna kuning dan oranye : ubi oranye, wortel, dan berbagai jenis labu.
----------------	--	--	---

Sumber : (1,4)

Bagaimana vitamin C dapat menguntungkan bagi fungsi zat besi adalah dengan meningkatkan penyerapan zat besi nonheme dan mempertahankan zat besi dalam keadaan valensi yang sesuai untuk enzim bisa berfungsi dengan optimal. Perlu diingat bahwa zat besi non-heme adalah yang besi yang terdapat dalam makanan nabati, yang mempunyai sifat lebih sulit diserap bila dibandingkan zat besi heme yang terdapat dalam makanan hewani (1).

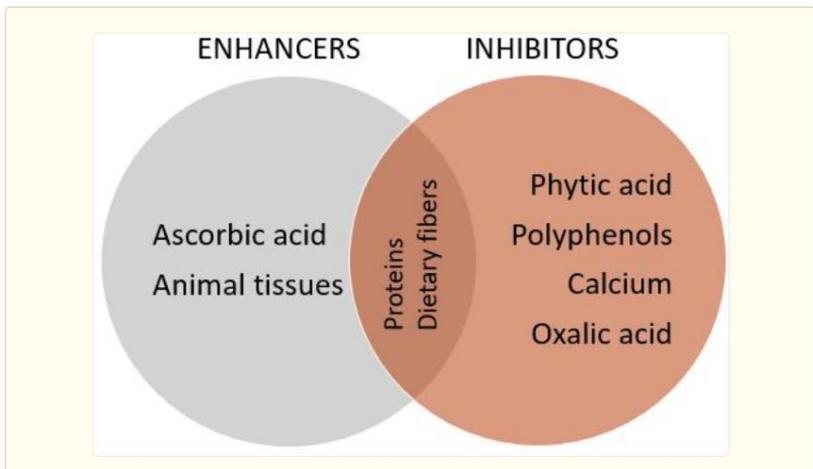
Kehadiran asam askorbat dalam makanan meningkatkan penyerapan zat besi nonheme. Asam askorbat membantu penyerapan zat besi dengan menciptakan khelat atau ikatan dengan besi besi Fe^{3+} pada pH asam lambung yang tetap larut pada pH basa duodenum, bagian pertama usus kecil. Selain itu, askorbat, garam asam askorbat, menyumbangkan elektron, bertindak sebagai pemulung radikal bebas dan mereduksi keadaan oksidasi besi menjadi Fe^{2+} , yang merupakan satu-satunya bentuk bio tersedia untuk sel enterosit. Fe^{2+} adalah satu-satunya zat besi yang dapat diserap melalui pengangkut zat besi dari sel enterosit usus (5). Hingga saat ini, banyak studi kultur sel in vivo dan in vitro tentang efek asam askorbat pada penyerapan

zat besi telah dilaporkan. Baru-baru ini, Khoja et al. melaporkan bahwa ketika asam askorbat ditambahkan ke dalam digesta produk tanaman (kecambah fenugreek, biji fenugreek, bubur buah baobab, dan daun kelor) asam askorbat meningkatkan penyerapan zat besi dalam model kultur sel Caco-2 (sel permukaan usus halus) (6).

Efek vitamin C pada zat besi ini telah terbukti bersifat *dose-response* dan dapat meningkatkan penyerapan zat besi hanya ketika kedua nutrisi dikonsumsi bersama-sama. Telah dilaporkan bahwa penyerapan zat besi secara bertahap meningkat dari 0,8% menjadi 7,1% ketika meningkatkan jumlah asam askorbat, mulai dari 25 hingga 1000 mg, ditambahkan ke makanan formula cair yang mengandung 4,1 mg zat besi nonheme. Selain itu, juga telah dilaporkan bahwa meskipun 500 mg asam askorbat yang dikonsumsi dengan makanan meningkatkan penyerapan zat besi enam kali lipat, asam askorbat yang diminum 4-8 jam sebelumnya kurang efektif. Dalam pengertian ini, penggabungan asam askorbat ke dalam makanan mungkin tampak efektif untuk asupan zat besi yang lebih tinggi. Namun, pertimbangan lain seperti kesulitan teknis selama persiapan dan penyimpanan karena ketidakstabilan asam askorbat, komposisi makanan dan kombinasi matriks makanan secara keseluruhan dapat mempengaruhi asam askorbat dan dapat menjelaskan peningkatan dramatis dalam penyerapan zat besi (5).

Perlu diingat bahwa meskipun makanan yang mengandung vitamin C dapat meningkatkan penyerapan zat besi, namun dalam makanan-makanan sumber vitamin C tersebut juga secara bersamaan mengandung zat-zat yang menghambat penyerapan zat besi seperti asam fitat yang terdapat dalam anggur, asam oksalat dalam berry-berryan, bayam, brokoli, dan sayuran hijau lain. Oleh karena itu pertimbangan dan akurasi rancangan makanan yang tepat oleh ahli gizi sangat diperlukan untuk dapat

mengoptimalkan interaksi zat besi dan vitamin C ini. Bila digambarkan dalam sebuah bagan, kurang lebih seperti ini.



Gambar 11.2. Gambaran zat besi beserta zat pendukung dan penghambat fungsinya (Sumber : (5))

Vitamin A dan zat besi diketahui berinteraksi. Berkurangnya status vitamin A menyebabkan akumulasi zat besi di limpa dan hati. Status vitamin A yang tidak memadai juga terkait dengan perubahan morfologi sel darah merah, menurunnya zat besi plasma, hemoglobin darah dan hematokrit. Interaksi ini tampaknya dimediasi setidaknya sebagian melalui erythropoietin, hormon yang dibuat di ginjal yang merangsang eritropoiesis (produksi sel darah merah). Secara khusus, vitamin A sebagai asam retinoat mengikat elemen respons dalam gen eritropoietin dan merangsang transkripsinya. Jadi, dengan vitamin yang tidak mencukupi A, gen eritropoietin tidak ditranskripsi secara memadai, sintesis sel darah merah berkurang, dan zat besi tetap berada dalam simpanan, tidak dapat didistribusikan sesuai fungsinya. Suplementasi vitamin A pada orang dengan status vitamin A dan zat besi yang buruk meningkatkan eritropoietin

sintesis dan meningkatkan pelepasan zat besi dari simpanan untuk menyediakan zat besi yang dibutuhkan untuk eritropoiesis. Kemungkinan lain bagaimana cara vitamin A dapat mempengaruhi zat besi adalah melalui interaksi antara asam retinoat dan transgen reseptor ferrin (1,7).

2) Kalsium dan Vitamin D

Tabel 11.2. Karakteristik Kalsium dan Vitamin D

	Kalsium	Vitamin D
Fungsi utama	Komponen utama pembentuk tulang/skeleton Metabolisme di dalam sel Kontraksi otot Aktivasi enzim-enzim penting di dalam tubuh	Regulasi metabolisme tulang, homeostasis kalsium darah, diferensiasi sel, pertumbuhan dan proliferasi sel
Storage (penyimpanan)	99% dalam tulang 1 % dalam cairan ekstraseluler	Simpanan terbesar ada di dalam darah dalam bentuk serum 25-OH D. Asupan vitamin yang tinggi akan disimpan (sebagian besar tidak terhidroksilasi) dalam jaringan adiposa tubuh.
Kebutuhan per hari dari diet	Anak-anak 200-1000 mg Dewasa 1000-1400 mg	Anak-anak 700 mg Dewasa : 700-1250 mg
Sumber makanan	Produk susu, ikan sarden, tiram, kerang, sawi hijau, brokoli, dan kacang-kacangan	Ikan berlemak, dan minyak ikan.

Hubungan kalsium dan vitamin D adalah saling menguntungkan satu sama lain. Kalsium diuntungkan dengan kehadiran vitamin D, sebaliknya vitamin D juga lebih optimal fungsinya dengan adanya kalsium. Dimungkinkan untuk hidup tanpa vitamin D aktif metabolit $1,25(\text{OH})_2 \text{D}$ dan reseptor vitamin D. Namun, ini membutuhkan asupan kalsium yang sangat tinggi karena hanya difusi pasif kalsium di usus yang dapat memasok kalsium untuk mineralisasi tulang di sini situasi. Status vitamin D yang memadai membuat asupan kalsium lebih flible. Asupan kalsium yang rendah menyebabkan pergantian metabolit vitamin D yang tinggi, karena untuk produksi yang lebih tinggi dari $1,25(\text{OH})_2 \text{D}$ dan lebih tinggi pemecahan metabolit vitamin D. Kalsium rendah asupan menyebabkan atau memperburuk kekurangan vitamin D sedangkan asupan kalsium yang tinggi adalah hemat vitamin D.

Uji klinis dengan vitamin D dengan atau tanpa kalsium terkadang menunjukkan hasil yang bertentangan. Ukuran efek dan signifikansi mengenai penurunan insiden fraktur tergantung pada asupan kalsium dasar, status vitamin D dasar, kalsium dan vitamin D dosis suplemen, usia, situasi lingkungan tempat tinggal dan kepatuhan. Meta-analisis tentang vitamin D untuk patah tulang pencegahan menunjukkan bahwa kombinasi vitamin D dan kalsium lebih efektif daripada vitamin D saja. Saat meresepkan suplemen vitamin D atau kalsium Seseorang harus mengingat interaksi antara kalsium dan vitamin D (8)

3) Asam Folat dan Vitamin B12

Tabel 11.3. Karakteristik Asam Folat dan Vitamin B12

	Asam Folat (Vitamin B9)	Vitamin B12
Fungsi utama	Reaksi transfer karbon untuk metabolisme energi dan produksi zat gizi, ekspresi gen, sintesis	Metabolisme zat gizi, produksi energi, hematopoiesis.

purin dan pirimidin untuk DNA dan RNA, hematopoesis.

Storage (penyimpanan)	Paling banyak ditemukan berada dalam darah, kemudian dalam hati dan jaringan.	Paling banyak ditemukan berada dalam darah.
Kebutuhan per hari dari diet	Anak-anak 80-300 mcg Dewasa 400-600 mcg	Anak-anak 0,4 – 2 mcg Dewasa 3,5 – 4,5 mcg
Sumber makanan	Sayuran hijau : bayam, asparagus, kacang-kacangan.	Produk-produk hewan yaitu daging, ikan, kerang, unggas dan susu

Hubungan sinergis ada antara folat dan vitamin B12. Hubungan ini kadang-kadang disebut metil perangkap folat (methyl-folat trap). Urutan peristiwa berikut mengarah ke perangkap metil-folat. Dalam sintesis metionin dari homosistein, gugus metil dari 5-metil THF biasanya ditransfer ke vitamin B12(cobalamin) yaitu melekat pada enzim metionin sintase. Tanpa vitamin B12 untuk menerima gugus metil dari 5-metil THF, 5-metil THF terakumulasi dan "terperangkap" dan bentuk folat lainnya, seperti THF, tidak dapat diproduksi. Dengan demikian, sel-sel memiliki folat, tetapi tidak dalam bentuk yang bisa digunakan untuk sintesis DNA. Sebaliknya, dengan vitamin B12 status memadai, THF yang dihasilkan dari metionin Resintesis dapat digunakan untuk membuat bentuk folat yang dibutuhkan untuk sintesis DNA, termasuk 10-formyl THF (yaitu diperlukan untuk sintesis purin) dan 5,10-metilen THF (yang diperlukan untuk sintesis timidil dalam pirimidin metabolisme).(1)

3. Interaksi Antagonisme

Interaksi antagonisme zat gizi didefinisikan sebagai kehadiran dua atau lebih zat gizi dapat mengurangi efektivitas dari fungsi zat gizi tersebut di dalam tubuh manusia (2,9).

1) Zat Besi dan Kalsium

Beberapa mineral mengurangi penyerapan zat besi. Kalsium dalam jumlah 300-600 mg dan dalam berbagai bentuk (seperti kalsium fosfat, kalsium sitrat, kalsium karbonat, dan kalsium klorida dan dalam susu), bila diberikan dengan hingga 18 mg zat besi sebagai besi sulfat atau ketika dimasukkan ke dalam makanan, secara substansial mengurangi penyerapan zat besi (baik heme maupun nonheme). Efek penghambatan tambahan kalsium pada penyerapan zat besi dapat terjadi melalui tindakan pada DMT1 (yang transPort besi nonheme melintasi membran batas) dan/atau mengubah fluiditas membran. Interaksi ini tidak dianggap sedemikian besarnya menyebabkan kekurangan zat besi. Namun, bagi mereka yang dirawat karena kekurangan zat besi suplemen zat besi tidak boleh dikonsumsi dengan susu atau suplemen kalsium (untuk membantu memaksimalkan penyerapan zat besi) (1).

2) Zat Besi dan Zinc

Interaksi lain melibatkan zat besi dan seng dan mungkin terjadi jika kedua mineral tersebut tertelan bersama-sama di tidak adanya makanan dan jika zat besi hadir sebagai zat besi nonheme di rasio dengan seng 2 (atau lebih tinggi) hingga 1 (10). Zat besi dalam bentuk suplemen dalam jumlah besar, yaitu di atas 25 mg, dapat mengurangi penyerapan zinc (11). Sementara hal ini hampir tidak mungkin terjadi dengan konsumsi makanan. Dalam kondisi pasien dengan perawatan klinis, maka harus menghindari konsumsi bersama secara bersamaan mineral ini

dalam bentuk suplemen, seperti yang mungkin dilakukan saat mengobati defisiensi dari kedua zat gizi tersebut (1).

3) Tembaga dan Zinc

Tabel 11. 4. Karakteristik Tembaga dan Zinc

	Tembaga	Zinc
Fungsi utama	Sebagai bagian dari berbagai enzim. Mempertahankan kekuatan struktur kulit, pembuluh darah, sel epitel dan jaringan konektif dalam tubuh. Berperan dalam produksi hemoglobin, myelin, melanin, dan agar kelenjar tiroid berfungsi normal.	Unsur yang diperlukan dalam metabolisme seluler. Katalis dari lebih dari 200 enzim Meningkatkan fungsi imun, penyembuhan luka, sintesis protein dan DNA. Dibutuhkan untuk optimalnya sensitivitas indra perasa dan pembau. Mendukung pertumbuhan selama kehamilan, anak-anak, dan remaja.
Storage (penyimpanan)	Hati adalah organ utama yang menyimpan tembaga dan sebagai pengatur homeostasis tembaga dalam tubuh. Selanjutnya terdapat dalam skeleton, otot, dan ginjal.	Zinc ditemukan dalam setiap jaringan organ, paling banyak dalam hati, ginjal, kulit, otot dan tulang.
	Kentang dan cokelat.	Dalam sel, 30-40% zinc ditemukan terikat dengan protein dalam nukleus, 50% dalam sitosol, dan sisanya di membran sel
Kebutuhan per hari dari diet	Anak-anak 200-700 mcg	Anak-anak 1,1 – 8 mg

Sumber makanan	Dewasa 700-1000 mcg Paling banyak terdapat dalam daging, dan kerang terutama oyster dan lobster Dalam nabati terdapat pada kacang mede, biji-bijian, dan kacang-kacangan.	Dewasa 8 - 15 mg Paling banyak terdapat pada daging merah dan seafood. Dalam jumlah sedang terdapat dalam biji-bijian utuh dan kacang-kacangan.
----------------	---	---

Sumber : (1,4,11)

Asupan harian Cu dan Zn diperlukan untuk mempertahankan kestabilan karena tubuh tidak memiliki sistem penyimpanan khusus dari kedua elemen ini (11). Oleh karena itu keseimbangan dua asupan zat gizi ini diperlukan untuk tetap menjaga homeostasis yang normal. Efek negatif dari interaksi keduanya lebih sering terjadi karena asupan yang berasal dari suplementasi.

Salah satu interaksi yang dapat terjadi yaitu, asupan zinc yang berlebihan dapat menghambat absorpsi tembaga. Efek yang merugikan ini diperkirakan disebabkan oleh stimulasi seng terhadap sintesis metallothionein, yang memiliki afinitas untuk tembaga daripada seng. Dengan peningkatan konsentrasi metallothionein di usus yang diinduksi oleh level zinc yang tinggi level, tembaga yang tertelan mudah mengikat metallothionein di dalam enterosit dan menjadi "terperangkap", mencegah perjalanannya ke plasma. Peningkatan risiko kekurangan tembaga dipicu oleh suplementasi seng, sehingga ditetapkan angka untuk Tingkat Asupan Terbanyak yang Dapat Ditoleransi (Tolerable Upper Intake Level) untuk unsur adalah 40 mg setiap hari (1). Interaksi ini adalah salah satu bentuk interaksi antagonisme.

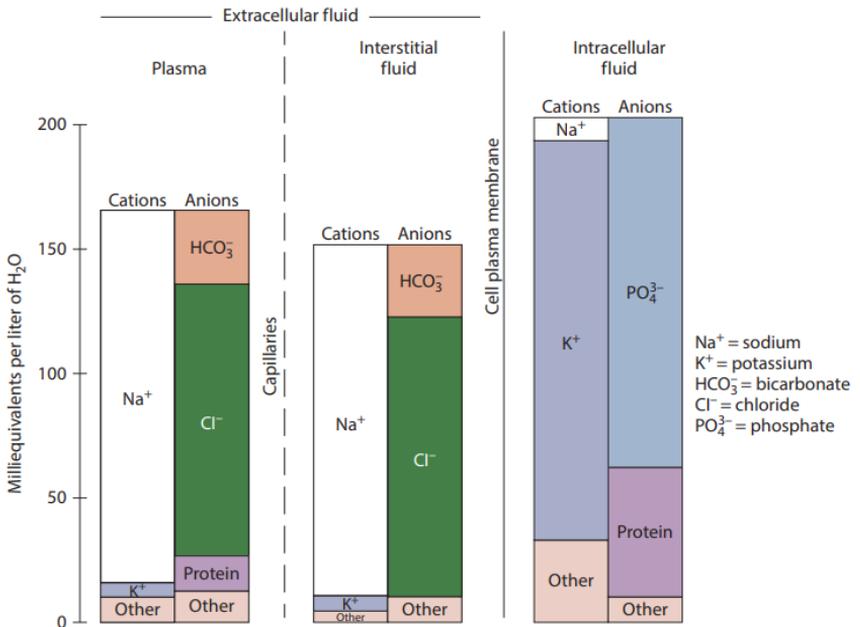
4) Sodium (Natrium) dan Potasium

Tabel 11.5. Karakteristik Natrium dan Potassium

	Natrium	Potassium
Fungsi utama	Keseimbangan homestasis cairan, pH, elektrolit, regulasi dan kontraksi otot, transmisi saraf.	Keseimbangan cairan, elektrolit, pH, dan polarisasi membran.
Storage (penyimpanan)	60-70% dalam cairan ekstraseluler dan 30-40% di permukaan tulang, sisanya di cairan intraseluler, terutama jaringan saraf dan tissue.	Potassium adalah kation utama cairan intrasel, sekitar 98% terdapat dalam sel, dan 2 % dalam cairan ekstraseluler.
Kebutuhan per hari dari diet	Anak-anak 200-700 mcg Dewasa 700-1000 mcg	Anak-anak 1,1 – 8 mg Dewasa 8 - 15 mg
Sumber makanan	Garam dapur, makanan kemasan (processed food), daging curing, seafood, susu, keju dan roti.	Buah, sayur, kacang-kacangan dan biji-bijian.

Pada Gambar 11.5 dapat dilihat bahwa natrium dan potassium memegang peranan penting untuk keseimbangan cairan baik di dalam darah, di antara sel maupun dalam sel. Di dalam tubuh, natrium memainkan peran penting dalam pemeliharaan tekanan osmotik untuk keseimbangan cairan. Natrium ini juga bekerja dengan kalium dan kalsium dalam

transmisi saraf/konduksi impuls dan kontraksi otot. Dalam saraf transmisi dan kontraksi otot, fungsi natrium sebagai bagian dari pompa Na⁺/K⁺-ATPase yang ditemukan dalam plasma membran sel. Dengan pertukaran natrium untuk kalium dan hidrolisis ATP, gradien potensial elektrokimia menghasilkan konduksi impuls saraf. Selain hubungan timbal balik natrium dengan kalium dan klorida, natrium telah diakui untuk beberapa dekade bahwa peningkatan asupan natrium makanan terkait dengan peningkatan ekskresi kalsium urin (Gropper 2022).



Gambar 11.3. Komponen Elektrolit dalam Plasma, Cairan Interstitial dan Kompartemen Intraseluler dalam Tubuh

Interaksi antara Natrium dan Potassium berperan pada 1) Keseimbangan Cairan : di dalam tubuh, natrium memainkan peran penting dalam pemeliharaan tekanan osmotik untuk

keseimbangan cairan. 2) Kontraksi Otot :natrium ini juga bekerja dengan kalium dan kalsium dalam transmisi saraf/konduksi impuls dan kontraksi otot. Dalam saraf transmisi dan kontraksi otot, fungsi natrium sebagai bagian dari pompa Na^+/K^+ -ATPase yang ditemukan dalam plasma membran sel. Dengan pertukaran natrium untuk kalium dan hidrolisis ATP, gradien potensial elektrokimia menghasilkan konduksi impuls saraf. 3) Ekskresi kalsium : selain hubungan timbal balik natrium dengan kalium dan klorida, natrium telah diakui untuk beberapa dekade bahwa peningkatan asupan natrium makanan terkait dengan peningkatan ekskresi kalsium urin (1).

Kalium dan natrium memiliki hubungan terbalik: Saat natrium naik, kadar kalium menurun, dan sebaliknya. Asupan makanan memodulasi efek penekan dan hiperkalsiurik dari kelebihan NaCl diet modern. Asupan kalium yang sedikit kekurangan memperkuat kedua efek ini, dan kedua efek tersebut dilemahkan secara dosis dan dapat dihapuskan baik dengan kalium makanan atau KHCO_3 tambahan (1). Identifikasi hubungan nonlinier antara asupan kalium dan tekanan darah sistolik dan diastolik, meskipun perkiraan untuk efek tekanan darah dari asupan kalium yang tinggi harus ditafsirkan dengan hati-hati karena ketersediaan uji coba yang terbatas. Temuan kami menunjukkan asupan kalium yang cukup diinginkan untuk mencapai tingkat tekanan darah yang lebih rendah tetapi menyarankan suplementasi kalium yang berlebihan harus dihindari, terutama pada subkelompok tertentu (12).

Temuan utama menunjukkan bahwa, di antara uji coba terkontrol acak yang ditinjau, rasio natrium-ke-kalium tampaknya lebih kuat terkait dengan hasil tekanan darah daripada natrium atau kalium saja pada populasi orang dewasa hipertensi. Data dari studi observasional yang ditinjau memberikan dukungan tambahan untuk rasio natrium-ke-kalium sebagai metrik yang

lebih unggul dari natrium atau kalium saja dalam evaluasi hasil tekanan darah dan insiden hipertensi. Masih belum jelas apakah ini benar di populasi normotensif dan pada anak-anak dan untuk hasil terkait termasuk sistem renin-angiotensin, kekakuan arteri, augmentasi indeks, dan disfungsi endotel. Studi masa depan pada populasi ini dijamin (13).

4. Rangkuman

Tidak dapat kita hindari bahwa dalam satu jenis bahan pangan, didalamnya ditemukan berbagai jenis zat gizi. Zat-zat gizi ini masing-masing mempunyai karakter yang khas dan unik. Ketika dikonsumsi bersamaan, antar zat gizi ini punya potensi untuk berinteraksi satu sama lain. Begitupun dengan zat gizi vitamin dan mineral, sangat mungkin untuk terjadi interaksi baik dalam proses absorpsi di usus, maupun dalam proses metabolisme lainnya baik di dalam darah atau pun sel organ.

Interaksi dapat terjadi saling menguntungkan sehingga satu zat gizi dapat meningkatkan efektivitas atau fungsi zat gizi lain, interaksi ini disebut sebagai interaksi sinergis. Sementara itu, mungkin juga terjadi interaksi yang menimbulkan efek merugikan atau saling menekan fungsi satu sama lain yang disebut sebagai interaksi antagonisme. Beberapa contoh interaksi sinergisme antar vitamin dan mineral adalah antara zat besi dan vitamin C, kalsium dan vitamin D, serta asam folat dan vitamin B12. Sementara itu interaksi antagonistik terjadi antara zat besi dan kalsium, zat besi dan zinc, tembaga dan zinc, natrium dan potassium

5. Latihan dan Jawaban

1. Berbagai zat gizi dalam tubuh manusia dapat berinteraksi. Interaksi yang bersifat mampu meningkatkan efektivitas dari kedua atau salah satu zat gizi yang terlibat disebut interaksi...

- a. Mutualisme
 - b. Sinergisme
 - c. Antagonistik
 - d. Efektivisme
 - e. Parasitisme
2. Dibawah ini yang merupakan jenis interaksi antagonistik dari vitamin dan mineral adalah..
 - a. Zinc dan Vitamin A
 - b. Kalsium dan Vitamin D
 - c. Vitamin E dan Vitamin C
 - d. Natrium dan Potassium
 - e. Asam Folat dan Vitamin B12
 3. Bagaimana mekanisme interaksi yang terjadi antara Fe dan Vitamin C?
 - a. Di dalam ginjal, vitamin C membantu ekskresi Fe sehingga sirkulasinya di dalam darah bisa tetap seimbang
 - b. Vitamin C di darah membentuk chelat dan membantu mengikat Fe yang ada di dalam Hemoglobin sel darah merah.
 - c. Garam-garam asam askorbat membantu homeostasis atau keseimbangan cairan dalam darah, sehingga Fe bisa tetap mengikat oksigen di dalam hemoglobin
 - d. Garam-garam asam askorbat menyumbangkan elektron (-) , bertindak sebagai pemulung radikal bebas, sehingga mereduksi besi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} , yang menjadikannya mudah untuk diserap sel-sel enterocyt.
 - e. Asam askorbat merubah zat besi ke dalam bentuk aktifnya yaitu 1,25-dihydroxyvitamin D sehingga lebih mudah berikatan dengan reseptor dalam usus halus, dan berikutnya akan merangsang transportasinya ke dalam darah dan sirkulasi
 4. Berikut ini yang merupakan contoh makanan tinggi kalium yang mampu menurunkan tekanan darah dalam tubuh manusia adalah

- a. Ham
 - b. Pisang
 - c. Corned beef
 - d. Acar mentimun kaleng
 - e. Kuaci (biji bunga matahari)
5. Interaksi zat gizi yang berhubungan paling kuat dengan mineralisasi tulang adalah interaksi antara ...
- a. Natrium dan Chlorida
 - b. Kalsium dan Vitamin D
 - c. Vitamin E dan Vitamin C
 - d. Selenium dan Vitamin A
 - e. Asam Folat dan Vitamin B12

Kunci Jawaban

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

6. Daftar Pustaka

1. Gropper SS, Smith JL, Carr TP. *Advanced Nutrition and Human Metabolism Eighth Edition*. Vol. 8, Cengage Learning. 2022.
2. Schoendorfer N, Davies PSW. Micronutrient interrelationships: Synergism and antagonism. *Micronutr Sources, Prop Heal Eff*. 2012;(January):159–77.
3. Townsend JR, Kirby TO, Sapp PA, Gonzalez AM, Marshall TM, Esposito R. Nutrient synergy: definition, evidence, and future directions. *Front Nutr*. 2023;10(October).
4. Kementerian Kesehatan RI. *Permenkes No 28 Tahun 2019 tentang Angka Kecukupan Gizi yang dianjurkan untuk Masyarakat Indonesia*. 2019;1–23.
5. Piskin E, Cianciosi D, Gulec S, Tomas M, Capanoglu E. Iron Absorption: Factors, Limitations, and Improvement Methods. *ACS Omega*. 2022;7(24):20441–56.
6. Khoja KK, Aslam MF, Sharp PA, Latunde-Dada GO. In vitro bioaccessibility and bioavailability of iron from fenugreek, baobab and moringa. *Food Chem [Internet]*. 2021;335(February 2020):127671. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127671>
7. Zimmermann MB, Biebinger R, Rohner F, Dib A, Zeder C, Hurrell RF, et al. Vitamin A supplementation in children with poor vitamin A and iron status increases erythropoietin and hemoglobin concentrations without changing total body iron. *Am J Clin Nutr*. 2006;84(3):580–6.
8. Lips P. Interaction between Vitamin D and calcium. *Scand J Clin Lab Invest*. 2012;72(SUPPL. 243):60–4.
9. Tripathy S, Dhaduk J, Kapadiya S. Interrelationship of Micronutrients: Antagonism and Synergism. *Int J Pure Appl Biosci*. 2017;5(6):208–14.
10. Scheers N. Regulatory effects of Cu, Zn, and Ca on Fe absorption: The intricate play between nutrient transporters. *Nutrients*. 2013;5(3):957–70.
11. Osredkar J. Copper and Zinc, Biological Role and Significance of Copper/Zinc Imbalance. *J Clin Toxicol*. 2011;s3(01).
12. Filippini T, Naska A, Kasdagli MI, Torres D, Lopes C, Carvalho C, et al. Potassium intake and blood pressure: A dose-response meta-analysis of randomized controlled trials. *J Am Heart Assoc*. 2020;9(12).
13. Perez V, Chang ET. Sodium-to-potassium ratio and blood pressure, hypertension, and related factors. *Adv Nutr*

[Internet]. 2014;5(6):712–41. Available from:
<http://dx.doi.org/10.3945/an.114.006783>