E-ISSN : 2988-1986
https://ejournal.cahayailmubangsa.institute/index.php/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 10 No 8 Tahun 2026

KOLESTROL DALAM PERSPEKIF BIOKIMIA: PERAN, REGULASI, DAN IMPLIKASINYA TERHADAP METABOLISME ENERGI

Alfa Graciani Kase[1], Saskia Jelita Sibuea[2], St Fatimah Azzahra[3]
[123]Program Studi Pendidikan Kimia, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Kristen Indonesia,
[1]alfagracianikase@gmail.com, [2]saskiajelitasibuea@gmail.com, [3]siti@uki.ac.id

Abstrak

Studi ini adalah tinjauan pustaka yang berupaya mengupas secara mendalam berbagai temuan penelitian terkait metabolisme lipid dan kolesterol dari sudut pandang biokimia. Selain itu, studi ini juga menelaah korelasinya dengan pengaturan enzimatis dan metabolisme energi seluler. Sebanyak empat belas artikel ilmiah dari sumber nasional maupun internasional yang mencakup intervensi diet alami, mekanisme molekuler, hingga implikasi farmakologis dalam pengelolaan kolesterol, telah ditinjau dalam kajian ini.

Analisis artikel dilaksanakan dengan menerapkan metode penilaian kritis (critical appraisal) untuk mengevaluasi kualitas metodologi, keabsahan hasil, serta relevansi konten dengan pokok bahasan. Selanjutnya, data yang terkumpul disintesis melalui pendekatan analisis konten tematik, di mana temuan-temuan dikategorikan ke dalam beberapa tema sentral, seperti jalur sintesis kolesterol, regulasi enzimatis (melibatkan HMG-CoA reduktase dan CYP27A1), fungsi antioksidan, serta keterkaitannya dengan proses metabolisme energi.Analisis data mengindikasikan bahwa penerapan terapi yang memanfaatkan komponen nabati, meliputi jus alpukat, belimbing wuluh, tomat, bawang putih, apel hijau, dan buah naga merah, menunjukkan hasil yang berarti dalam mereduksi total cholesterol dan cholesterol LDL. Efektivitas ini dicapai melalui aksi antioksidan, stimulasi sekresi asam empedu, dan pencegahan absorpsi kolesterol di saluran pencernaan.

Di sisi lain, data farmakologi dan biokimia molekuler menyoroti peran krusial enzim HMG-CoA reduktase dan CYP27A1 dalam mengelola sintesis dan katabolisme kolesterol di organ hati. Secara komprehensif, penelitian ini memvalidasi bahwa pengelolaan kolesterol yang efektif membutuhkan pemahaman yang mendalam mengenai proses biokimia, regulasi enzimatis, dan homeostatis energi seluler. Diharapkan temuan ini dapat menjadi fondasi ilmiah untuk inovasi dalam pembelajaran biokimia dan kimia kesehatan yang relevan dan terintegrasi dengan kearifan lokal, sekaligus menstimulasi riset lebih lanjut mengenai lintasan metabolisme lipid secara holistik.

Kata Kunci: Antioksidan, Biokimia Lipid, CYP27A1, Fitosterol, HMG-CoA Reduktase, Intervensi Alami, Kearifan Lokal, Kolesterol, Metabolisme Energi, Regulasi Enzimatik,

Article History
Received: Januari 2026
Reviewed: Januari 2026
Published: Januari 2026

Plagiarism Checker No 235
Prefix DOI : 10.8734/Kohesi.v1i2.365
Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

PENDAHULUAN

Kolesterol merupakan zat yang diproduksi secara alami oleh organ hati tetapi juga bisa ditemukan dalam makanan yang berasal dari hewan, seperti daging dan susu. Dalam jumlah yang cukup, kolesterol dibutuhkan oleh tubuh untuk memproduksi hormon, vitamin D, dan komponen lain yang digunakan untuk mencerna makanan.Dalam kondisi normal kebutuhan kolesterol sebenarnya sudah bisa terpenuhi secara alami oleh tubuh sehingga tambahan kolesterol dari makanan sebenarnya tidak dibutuhkan. Munculnya keluhan kadar kolesterol yang tinggi diikuti dengan berbagai penyakit lebih banyak disebabkan oleh asupan makanan tidak sehat secara berlebihan yang memacu peningkatkan kadar kolesterol.

Meskipun penting bagi tubuh, kolesterol dapat mengganggu kesehatan jika kadarnya terlalu tinggi karena akan menumpuk di pembuluh darah dan mengganggu aliran darah dan bisa menyebabkan gangguan pada jantung dan fungsi organ lainnya. Karena tidak semua jenis kolesterol buruk untuk tubuh maka dikenal istilah kolesterol baik dan kolesterol jahat. Asupan serat pangan yang telah digunakan untuk membantu mengendalikan asupan kalori serta mengurangi risiko kenaikan berat badan yang mengarah ke kelebihan berat badan dan obesitas. Peran serat makanan dalam asupan energi secara langsung berhubungan dengan perkembangan kelebihan berat badan dan obesitas dan itu terkait dengan bahan kimia dan sifat fisik yang terhubung ke sinyal kenyang pada otak.

Salah keuntungkan dari serat adalah untuk memberikan rasa kenyang dengan mengurangi asupan makanan, dan juga menghambat penumpukan lemak dengan mengeluarkannya melalui produksi empedu dan tinja. Asupan harian yang direkomendasikan serat untuk orang dewasa sehat adalah antara 20-35 g/dl (Al Hammadi, 2017). Komposisi makanan seperti karbohidrat diduga memiliki peran penting dalam kejadian tersebut, mengingat keduanya akan dimetabolisme menjadi trigliserida dan LDL apabila kadarnya terlalu berlebihan (Cinintya dan Hermansyah, 2017).

Makanan yang mengandung karbohidrat dapat dibedakan menjadi 2 golongan, yaitu makanan dengan kandungan karbohidrat sederhana (contoh gula pasir, permen, minuman ringan, dan beberapa jenis produk bakery) dan makanan dengan kandungan karbohidrat kompleks (contoh biji-bijian, umbi-umbian, serealia, dan kacang-kacangan). Konsumsi tinggi karbohidrat cenderung meningkatkan kadar trigliserida dan menurunkan kadar kolesterol HDL. Senyawa trigliserida yakni jenis lemak yang biasanya dijumpai di dalam darah yang mengandung glukosa lebih. Kadar trigliserida tinggi dan kolesterol HDL rendah maka akan berpengaruh pada aterosklerosis dan berimbas pada penyakit jantung sehingga dapatterjadi serangan jantung yang mendadak (Winda, 2017).

Secara biokimia, kolesterol berfungsi sebagai komponen utama membran sel yang menjaga kestabilan dan fleksibilitasnya, serta menjadi prekursor bagi pembentukan berbagai molekul penting seperti hormon steroid (kortisol, aldosteron, dan hormon seks), asam empedu, dan vitamin D. Melalui fungsi-fungsi tersebut, kolesterol berkontribusi terhadap regulasi metabolisme, keseimbangan cairan, serta kesehatan tulang. Namun, keseimbangan kadar kolesterol dalam tubuh harus tetap terjaga, karena kadar kolesterol yang terlalu tinggi, khususnya fraksi LDL (Low-Density Lipoprotein), dapat menimbulkan dampak klinis yang serius.

Peningkatan kadar LDL menyebabkan kolesterol mudah teroksidasi dan menempel pada dinding pembuluh darah, membentuk plak aterosklerosis yang menyempitkan aliran darah. Kondisi ini menjadi faktor risiko utama munculnya penyakit jantung koroner, stroke, dan hipertensi. Sebaliknya, HDL (High-Density Lipoprotein) berperan melindungi tubuh dengan membawa kolesterol berlebih kembali ke hati untuk diekskresikan. Dengan demikian, keseimbangan antara kadar LDL dan HDL menjadi kunci dalam mempertahankan homeostasis fisiologis dan mencegah gangguan klinis akibat hiperkolesterolemia.

Biosintesis kolesterol merupakan serangkaian proses biokimia yang kompleks dan saling terkoordinasi, terutama berlangsung di hati serta sebagian di jaringan usus, kulit, dan kelenjar

adrenal. Proses ini dimulai dari dua molekul asetil-KoA yang mengalami kondensasi membentuk asetoasetil-KoA, kemudian bereaksi kembali dengan asetil-KoA lain menghasilkan 3-hidroksi-3-metilglutaril-KoA (HMG-KoA).

Selanjutnya, senyawa ini diubah menjadi mevalonat melalui katalisis enzim HMG-KoA reduktase, yang berperan sebagai titik pengendalian utama dalam jalur pembentukan kolesterol. Aktivitas enzim ini diatur secara ketat oleh berbagai faktor hormonal dan metabolik. Insulin meningkatkan aktivitas HMG-KoA reduktase sehingga merangsang biosintesis kolesterol saat energi tubuh berlebih, sedangkan glukagon dan adrenalin menekan aktivitas enzim tersebut ketika kebutuhan energi meningkat.

Selain pengaruh hormonal, faktor nutrisi seperti konsumsi lemak jenuh berlebihan, resistensi insulin, dan stres oksidatif juga dapat mengganggu mekanisme pengaturan ini sehingga menimbulkan gangguan metabolik berupa hiperkolesterolemia, yang menjadi penyebab utama terbentuknya aterosklerosis dan penyakit kardiovaskular. Dalam sistem metabolisme energi, kolesterol memiliki keterkaitan erat dengan jalur asetil-KoA yang juga terlibat dalam siklus asam sitrat dan oksidasi asam lemak. Ketika tubuh memerlukan energi dalam jumlah besar, asetil-KoA dimanfaatkan untuk menghasilkan ATP di mitokondria. Sebaliknya, ketika energi berlebih, sebagian asetil-KoA akan dialihkan ke proses anabolik seperti pembentukan asam lemak dan kolesterol.

Dengan demikian, kolesterol berfungsi tidak hanya sebagai komponen struktural membran sel dan bahan dasar pembentukan hormon steroid serta vitamin D, tetapi juga berperan dalam menjaga keseimbangan antara kebutuhan dan cadangan energi tubuh. Oleh sebab itu, kajian literatur ini memiliki signifikansi penting dalam memahami bagaimana jalur biosintesis kolesterol mendukung sistem metabolisme energi dan kestabilan fisiologis tubuh manusia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan literatur review yang bertujuan untuk meninjau serta menganalisis berbagai sumber ilmiah yang membahas aspek biokimia kolesterol, metabolisme lipid, dan hubungannya dengan metabolisme energi. Kajian literature atau penelitian kepustaan (*literature review*) adalah penelitian yang meninjau dan mengkaji secara kritis gagasan, atau temuan yang terdapat di dalam literature yang berorientasi akademik serta merumuskan kontribusi teoritis dan metodologisnya untuk topik tertentu (Imam M, 2010).

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data sekunder adalah data yang diperoleh bukan dari pengamatan langsung. melainkan data tersebut didapat dari hasil penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu. Sumber data sekunder yang dimaksudkan berupa laporan ilmiah primer yang terdapat di dalam artikel atau jurnal berkaitan dengan penyebab kolestrol pada manusia, seta buku-buku terkait. Metode pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode dokumentasi. Metode dokumentasi adalah metode pengumpulan data dengan menggali dan mencari data dari literatur yang terkait dengan apa yang ada dalam rumusan masalah (Arikunto, 2010).

Data yang telah di dapatkan dari berbaagai literature kemudian dikumpulkan sebagai kesatuan dokumen yang digunakan dalam menjawab permasalahan yang telah dirumuskan. Strategi penelusuran artikel publikasi dengan menggunakan kata kunci di *google scholar*, EBSCO, dan *Proquest* maupun akses pencarian jurnal berputasi lainnya menggunakan kata kunci yang dipilih yakni: “biokimia kolesterol, biosintesis kolesterol, metabolisme lipid, kolesterol dan energi, lipid metabolism and energy production, serta *cholesterol biochemistry and metabolism*”.

Kata kunci tersebut digunakan secara terpisah maupun dikombinasikan untuk memperoleh literatur yang sesuai dengan topik kajian. Tahapan berikutnya adalah seleksi literatur yang dilakukan secara bertahap, dimulai dari penyaringan awal hingga peninjauan mendalam. Pada tahap penyaringan awal, seluruh artikel yang ditemukan dari hasil pencarian diperiksa

kesesuaiannya dengan judul dan kata kunci yang digunakan. Kemudian, artikel yang memenuhi kriteria awal dianalisis lebih lanjut berdasarkan isi dan relevansinya terhadap fokus penelitian. Adapun kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi artikel yang membahas hubungan antara kolesterol, metabolisme lipid, dan metabolisme energi secara biokimia; artikel yang berbentuk penelitian eksperimental, kuasi-eksperimental, maupun tinjauan pustaka yang diterbitkan dalam jurnal ilmiah nasional maupun internasional; serta artikel berbahasa Indonesia atau Inggris.

Sedangkan kriteria eksklusi meliputi artikel yang hanya membahas aspek klinis tanpa menjelaskan mekanisme biokimia atau yang tidak relevan dengan kata kunci yang digunakan. Analisis dilakukan secara deskriptif kualitatif, yaitu dengan meninjau isi, metode, serta kesimpulan dari berbagai penelitian untuk memperoleh pemahaman yang utuh mengenai topik yang dikaji. Proses sintesis data dilakukan dengan menggabungkan hasil temuan dari berbagai literatur, sehingga menghasilkan pemetaan yang jelas mengenai jalur biokimia kolesterol, peran enzim HMG-KoA reduktase, pengaruh hormon seperti insulin dan glukagon terhadap biosintesis kolesterol, serta implikasinya terhadap keseimbangan energi dan homeostasis tubuh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Literature review ini dilakukan untuk mengetahui berbagai intervensi, mekanisme, dan regulasi biokimia yang berhubungan dengan metabolisme lipid dan kolesterol. Literatur yang dianalisis mencakup 13 artikel nasional dan 2 artikel internasional yang diperoleh dari Google Scholar dengan kata kunci “kolesterol”, “profil lipid”, dan “penurunan kolesterol alami”. Artikel dianalisis menggunakan tabel critical appraisal untuk meninjau inti jurnal, hasil penelitian, serta persamaan dan perbedaan dengan pembahasan skripsi mengenai biokimia kolesterol dan implikasinya terhadap metabolisme energi.

Tabel 1. Matriks Analisis Data pada Artikel Yang Digunakan Dalam Literatur Review

Author,Title,Journal	Method/Desigh	Results
Widyasari, N., Sulastri, D., & Zulkarnaini, A. (2025) - *Efektivitas Jus Alpukat terhadap Penurunan Kadar Kolesterol Total pada Wanita Dewasa dengan Obesitas*. Jurnal Penelitian Kesehatan dan Sains	Studi pustaka kuantitatif	1. Kadar kolesterol total menurun signifikan pada kelompok perlakuan dibandingkan kontrol (p=0,003). 2. Rata-rata penurunan kolesterol menunjukkan jus alpukat berperan dalam memperbaiki metabolisme lipid. 3. Disimpulkan bahwa jus alpukat efektif menurunkan kolesterol total dan dapat digunakan sebagai terapi diet alami bagi penderita obesitas.
Syafwan, Hasrima, Herman (2022)-	Studi pustaka kuantitatif	1. Kadar kolesterol rata-rata sebelum

Pengaruh Pemberian Jus Belimbing Wuluh (Averrhoa Bilimbi L) terhadap Penurunan Kadar Kolesterol pada Penderita Kolesterol di Wilayah Kerja Puskesmas Kabawo Kabupaten Muna Tahun 2022. Jurnal Gizi Ilmiah		perlakuan 232,40 mg/dL dan sesudah perlakuan 169,00 mg/dL. 2. Hasil uji t menunjukkan p=0,000 (p<0,05), berarti ada pengaruh signifikan. Kesimpulan: Jus belimbing wuluh efektif menurunkan kadar kolesterol secara cepat dan aman, karena mengandung asam organik alami yang mempercepat oksidasi kolesterol jahat (LDL).
Yulita Apriyani, Dwi Astuti (2018)-*Pengaruh Konsumsi Jus Tomat terhadap Kadar Kolesterol Total dan LDL pada Mahasiswa Overweight*. Jurnal Gizi dan Pangan	Studi pustaka kuantitatif	1. Terjadi penurunan signifikan kolesterol total (p=0,000) dan LDL (p=0,001). 2. Tomat mengandung likopen yang berperan sebagai antioksidan kuat dalam menurunkan oksidasi LDL. Disimpulkan bahwa konsumsi rutin jus tomat efektif memperbaiki profil lipid.
Eko Adi Setiawan, Luluk Sulistiyono, Rukmini Syahleman (2020)-*Pengaruh Konsumsi Bawang Putih terhadap Kadar Kolesterol pada Penderita Hiperkolesterolemia (Studi di Desa Handil Sohor Kecamatan Mentaya Hilir Selatan Kabupaten Kotawaringin Timur)*. Jurnal Ilmiah	Studi pustaka kuantitatif	1. Rata-rata kadar kolesterol sebelum konsumsi 219 mg/dL, sesudah 204 mg/dL. 2. 64% responden mencapai kadar kolesterol normal. 3. p=0,000 menandakan perbedaan signifikan. Disimpulkan bawang putih mengandung

STIKes Borneo Cendekia Medika Pangkalan Bun		allicin yang membantu menurunkan kolesterol dengan meningkatkan ekskresi asam empedu.
Diana Rhismawati Djupri, Rineke Juanita, Eva Trisna, Aat Yatnikasari, Widiyo Weni Wigati (2025)- *Intervensi Non-Farmakologis Jus Apel Hijau dan Buah Naga Merah: Solusi Kolesterol Tinggi pada Lansia*. Jurnal Ners Universitas Pahlawan	Studi pustaka kuantitatif	1. Kadar kolesterol menurun dari 227,44 mg/dL → 198,83 mg/dL (penurunan 28,61 mg/dL; p=0,000). 2. Jus kombinasi efektif menurunkan kolesterol total secara signifikan. Kandungan antioksidan pada buah naga dan flavonoid pada apel hijau berperan dalam memperbaiki metabolisme lipid.
Rabiatul Adawiyah, Tri Setyawati, Dea Alifah, Sendhy Krisnasari(2022)- *Pengaruh Edukasi Diet dan Olahraga terhadap Kadar Kolesterol pada Penderita Diabetes Melitus di Tondo, Palu, Sulawesi Tengah*. Medika Tadulako (Jurnal Ilmiah Kedokteran)	Studi pustaka kuantitatif	1. Penurunan kolesterol dari 236,27 mg/dL → 206,13 mg/dL (p=0,000). 2. Edukasi gizi dan aktivitas fisik meningkatkan kesadaran pasien terhadap manajemen lipid. 3. Kesimpulan: Program non-obat ini efektif menurunkan kadar kolesterol.
Heni Nur Kusumawati & Imrok Atus Sholihah (2022)- *Penyuluhan Pola Makan terhadap Kadar Kolesterol dalam Tubuh*. Educate: Journal of Community Service in Education	Studi pustaka kuantitatif	1. Penurunan kolesterol rata-rata sebesar 34,75 mg/dL. 2. Pengetahuan masyarakat meningkat hingga 80%. 3. Kesimpulan: Penyuluhan efektif menurunkan kadar kolesterol dan membentuk

		kesadaran pola hidup sehat.
Björkhem, Ingemar; Gustafsson, Jan; Johansson, Gunnar; Persson, Bertil (1975)- *Biosynthesis of Bile Acids in Man: Hydroxylation of the C27-Steroid Side Chain*. Journal of Clinical Investigation	Studi pustaka kuantitatif	1. Aktivitas tertinggi ditemukan pada fraksi mitokondria, menunjukkan bahwa enzim CYP27A1 (mitokondria) memiliki peran utama dalam reaksi hidroksilasi pada posisi C-26 rantai samping kolesterol. 2. Sebaliknya, fraksi mikrosomal menunjukkan aktivitas lemah pada posisi C-25, sehingga dianggap hanya memiliki peran minor dalam pembentukan asam empedu. 3. Tahap hidroksilasi di posisi C-26 merupakan langkah awal utama dalam pembentukan asam empedu primer seperti Cholic Acid (CA) dan Chenodeoxycholic Acid (CDCA). Penelitian ini membuktikan bahwa oksidasi kolesterol melalui jalur enzim CYP27A1 adalah mekanisme sentral dalam metabolisme kolesterol menjadi asam empedu, yang penting bagi ekskresi kolesterol berlebih dalam tubuh manusia.
Wenry Deston Latif; Muhammad Aswad; Muh. Akbar Bahar (2022)- *Perbandingan Efektivitas*	Studi pustaka kuantitatif	1. Kedua obat statin (simvastatin dan atorvastatin) terbukti menurunkan

Klinis Simvastatin dan Atorvastatin terhadap Profil Lipid Darah Pasien Dislipidemia di Rumah Sakit Universitas Hasanuddin. Jurnal Sains Farmasi dan Klinis		kadar kolesterol total dan LDL secara bermakna. 2. Atorvastatin menunjukkan efek lebih besar terhadap penurunan kolesterol total dan trigliserida, sedangkan simvastatin lebih kuat dalam menurunkan kadar LDL. 3. HDL mengalami sedikit peningkatan pada kedua kelompok terapi. 4. Tidak ditemukan perbedaan signifikan secara statistik antara kedua kelompok (p>0,05), yang disebabkan oleh keterbatasan ukuran sampel dan variasi dosis antar pasien. Secara klinis, kedua obat efektif dalam memperbaiki profil lipid, namun atorvastatin memiliki profil farmakodinamik yang lebih kuat karena potensi penghambatan enzim HMG-CoA reduktase yang lebih tinggi.
Budiatmaja, A. C., & Noer, E. R.(2016). *Pengaruh Pemberian Buah Naga Merah (Hylocereus polyrhizus) terhadap Kadar Kolesterol Total*. Journal of Nutrition College	Studi pustaka kuantitatif	bahwa kadar kolesterol total pada kelompok perlakuan mengalami penurunan signifikan dari rata-rata 226,00 mg/dL menjadi 212,47 mg/dL (p = 0,043), sedangkan kelompok kontrol tidak

		mengalami perubahan bermakna. Uji perbedaan antar kelompok menunjukkan nilai p = 0,008, yang berarti terdapat perbedaan signifikan antara kelompok perlakuan dan kontrol. Penurunan kadar kolesterol total disebabkan oleh kandungan antosianin dan serat pangan dalam buah naga merah yang mampu menghambat penyerapan kolesterol di usus serta meningkatkan ekskresi asam empedu.
Wulandari, S., & Pratama, D. (2024)- *Cholesterol metabolism: a positive target to revoke the function of immune cells*. Frontiers in Pharmacology	Literatur Review	bahwa akumulasi kolesterol dalam makrofag dan sel NK menurunkan kemampuan sitotoksik dan fungsi imun lainnya; regulasi gen seperti MEF2C-SREBP2 dapat menjadi target untuk memperbaiki fungsi imun melalui modifikasi metabolisme kolesterol.coba buatkan saya 2 artikel indonesia yg di cari di google scoler
Wiguna, Y., Setiawan, P., & Airlangga, P. S.(2021*). Hubungan Profil Lipid (Kadar Trigliserida, HDL, LDL, Total Kolesterol) dengan Jenis Infeksi Bakteri pada Pasien Sepsis di RSUD Dr. Soetomo*. Jurnal Aplikasi Penelitian	Studi pustaka kuantitatif	Desain observasional analitik pada 38 pasien sepsis dewasa, klasifikasi jenis infeksi bakteri, pemeriksaan HDL, LDL, total

Widji Soeratri, Sanky Indrajaya, Dewi M. Hariyadi (2020)- *Ubiquinone-Nanostructured Lipid Carriers Hydrogel Mask for Antiaging: the Journey so Far*. Tropical Journal of Natural Product Research	Literatur Review	kolesterol, trigliserida, kemudian analisis varians antar-kelompok. • Biokimia Ubiquinone (CoQ10) dan Lipid: CoQ10 diklasifikasikan sebagai molekul lipofilik (larut dalam lemak) yang penting untuk bioenergetik selular. Peran gandanya meliputi: (a) Terlibat dalam Rantai Transport Elektron di mitokondria untuk sintesis ATP; dan (b) Bertindak sebagai antioksidan larut lipid di membran sel, menetralkan Spesies Oksigen Reaktif (ROS) dan mencegah peroksidasi lipid asam lemak membran yang dipicu oleh radiasi UV dan stres oksidatif. • Alasan untuk Penggunaan Pembawa Lipid Nanostruktur (NLC): Karena sifat lipofilik dan ketidakstabilan inheren CoQ10, diperlukan sistem pembawa yang efektif. NLC—sebuah matriks yang menggabungkan lipid padat dan cair—terbukti dapat: (a) Secara

		signifikan meningkatkan stabilitas molekul CoQ10; (b) Meningkatkan kapasitas pengemasan untuk bahan aktif lipofilik; dan (c) Memfasilitasi penetrasi efektif melalui stratum korneum kulit, sehingga meningkatkan bioavailabilitas kulitnya. Integrasi Ubiquinone ke dalam sistem NLC, yang kemudian diformulasikan menjadi basis hidrogel, merupakan strategi lanjutan. Pendekatan ini berhasil mengatasi keterbatasan kelarutan dan stabilitas CoQ10 sekaligus memastikan efek anti-penuaan tercapai melalui perlindungan antioksidan yang ditingkatkan dan dukungan energi seluler yang difasilitasi oleh pembawa nanopartikel lipid.
Wardah, Tatang Sopandi, E.Bimo Aksono.H, Kusriningrum(2012)- *Reduction of Intracellular Lipid Accumulation, Serum Leptin and Cholesterol*	Studi pustaka kuantitatif	Terdapat penurunan yang signifikan pada kadar lipid, leptin, dan kolesterol dibandingkan

Levels in Broiler Fed Diet Supplemented with Powder Leaves of Phyllanthus buxifolius. Asian Journal of Agricultural Research		dengan kelompok kontrol. Hal ini berarti daun tersebut dapat berfungsi sebagai suplemen pakan alami yang mendukung pertumbuhan ayam tanpa menyebabkan penumpukan lemak berlebihan.
Ari Athiutama, Ridwan, Imelda Erman, Indra Febriani, Azwaldi, Ismar Agustin (2024)- *Edukasi Masyarakat Tentang Bahaya Kolesterol dan Pemanfaatan Senam Kolesterol*.jurnal Edukasi Masyarakat Tentang Bahaya Kolesterol dan Pemanfaatan Senam Kolesterol	Tinjauan Pustaka	peningkatan signifikan dalam pengetahuan masyarakat setelah mengikuti edukasi dan senam kolesterol. Sebelum kegiatan, hanya 10,5% peserta yang memiliki pengetahuan baik, namun setelah kegiatan meningkat menjadi 57,9%. Pengetahuan cukup juga meningkat dari 26,3% menjadi 42,1%, sementara pengetahuan kurang turun drastis dari 63,2% menjadi 0%.Selain peningkatan pengetahuan, masyarakat juga menunjukkan antusiasme tinggi dalam mengikuti senam kolesterol dan memahami manfaat olahraga dalam menurunkan kadar kolesterol. Kegiatan ini dinilai efektif dalam meningkatkan kesadaran kesehatan dan mendorong perilaku hidup sehat di masyarakat.

1. Struktur dan Karakteristik Biokimia Kolesterol

Kolesterol merupakan senyawa lipid sterol alami yang termasuk ke dalam golongan steroid alkohol dengan rumus molekul $C_{27}H_{46}O$ dan berat molekul 386,65 g/mol. Struktur kolesterol terdiri dari empat cincin karbon berfusi yang dikenal sebagai kerangka siklopentano-perhidrofenantrena, yang juga menjadi dasar struktur berbagai hormon steroid. Cincin A, B, dan C berbentuk sikloheksana, sedangkan cincin D berbentuk siklopentana. Kolesterol memiliki gugus hidroksil (-

OH) pada posisi C3 (memberi sifat amfipatik) dan rantai hidrokarbon pada posisi C17 (bersifat hidrofobik).

Sifat amfipatik ini menjadikan kolesterol komponen integral membran sel, menempati posisi di antara fosfolipid. Gugus hidroksilnya berinteraksi dengan kepala polar fosfolipid, sementara rantai hidrokarbonnya sejajar dengan ekor asam lemak. Kolesterol berperan menjaga fluiditas dan permeabilitas membran sel, terutama pada suhu tubuh manusia (~37°C). Tanpa kolesterol, membran menjadi terlalu cair; sedangkan pada kelebihan kolesterol, membran menjadi kaku. Inilah alasan kolesterol disebut sebagai "buffer fluiditas membran" (Firani, Permatasari, dan Irnandi, 2021). Selain itu, kolesterol juga menjadi prekursor biokimia untuk pembentukan sejumlah molekul vital, yaitu:

- Hormon steroid, seperti testosteron, estrogen, progesteron, kortisol, dan aldosteron.
- Vitamin D_3 (kolekalsiferol), yang disintesis dari 7-dehidrokolesterol di kulit melalui paparan sinar UV.
- Asam empedu, yang membantu emulsifikasi dan pencernaan lemak dalam usus halus.

Distribusi kolesterol dalam tubuh tidak merata. Konsentrasi tertinggi ditemukan di otak (sekitar 25% total kolesterol tubuh), kemudian hati, saraf tepi, dan kelenjar endokrin (Naim, Sulastri, dan Hadi, 2019). Dalam plasma darah, kolesterol tidak larut air sehingga harus diangkut oleh lipoprotein. Berdasarkan densitasnya, lipoprotein dibedakan menjadi:

- HDL (High-Density Lipoprotein)**:** mengangkut kolesterol dari jaringan ke hati (reverse cholesterol transport).
- LDL (Low-Density Lipoprotein): mengirim kolesterol dari hati ke jaringan (dikenal sebagai kolesterol "jahat").
- VLDL (Very Low-Density Lipoprotein): kaya trigliserida, prekursor LDL.
- IDL (Intermediate-Density Lipoprotein): hasil metabolisme VLDL.

Rasio LDL/HDL menjadi indikator penting dalam menilai risiko penyakit kardiovaskular. LDL tinggi dan HDL rendah meningkatkan risiko aterosklerosis. Penelitian Widyasari, Sulastri, dan Zulkarnaini (2025) menunjukkan bahwa konsumsi jus alpukat 250 mL/hari selama 7 hari menurunkan kolesterol total secara signifikan ($p = 0,003$). Hal ini menunjukkan bahwa lemak tak jenuh dan fitosterol dalam alpukat bersifat kompetitif terhadap penyerapan kolesterol usus.

2. Struktur Molekul, Sifat Fisik, dan Kimia Kolesterol

Secara struktural, tiga cincin pertama (A, B, dan C) berupa sikloheksana (enam atom karbon), sedangkan cincin keempat (D) berupa siklopentana (lima atom karbon). Pada posisi karbon ke-3 (C-3) terdapat gugus hidroksil (-OH) yang memberikan sifat amfipatik, sementara pada posisi C-17 terdapat rantai hidrokarbon isooctil yang bersifat sangat nonpolar. Kombinasi bagian polar dan nonpolar ini menjadikan kolesterol berperan penting dalam struktur dan fungsi membran **sel**, karena dapat berinteraksi dengan kepala polar fosfolipid dan sekaligus berasosiasi dengan ekor asam lemak (Firani, 2021; Voet & Voet, 2016).

2.1 Sifat Fisik Kolesterol

Dalam kondisi fisiologis, kolesterol berbentuk padatan kristalin putih, tidak berbau, dan tidak berasa. Kolesterol tidak larut dalam air, tetapi larut dalam pelarut organik nonpolar seperti kloroform, benzena, eter, dan etanol panas (Lehninger, 2017). Titik leleh kolesterol berkisar antara 148–150°C, menunjukkan kestabilan termal yang tinggi. Sifat fisik ini disebabkan oleh struktur cincin siklik yang kaku dan interaksi van der Waals kuat antar molekul kolesterol.

Dalam membran biologis, molekul kolesterol tersusun di antara dua lapisan fosfolipid. Gugus hidroksil kolesterol berinteraksi melalui ikatan hidrogen dengan gugus fosfat dari fosfolipid, sedangkan bagian hidrofobik (rantai hidrokarbon) sejajar dengan ekor asam lemak dari fosfolipid tersebut. Interaksi ini memberikan efek penstabilan membran dan memengaruhi fluiditas membran sel (Firani et al., 2021; Lodish, 2021). Pada suhu tubuh normal (~37°C), kolesterol mengurangi pergerakan fosfolipid sehingga mencegah membran menjadi terlalu cair, sementara

pada suhu rendah kolesterol mencegah pembekuan membran. Oleh karena itu, kolesterol disebut sebagai buffer fluiditas membran.

Selain itu, kolesterol dapat membentuk kompleks dengan lipid lain, seperti sfingomielin, membentuk domain mikro atau lipid rafts pada membran plasma. Lipid rafts berfungsi dalam transduksi sinyal, transport protein membran, dan pengenalan sel, sehingga peran struktural kolesterol juga berimplikasi pada proses komunikasi antar sel (Simons & Ikonen, 2000).

2.2 Sifat Kimia Kolesterol

Secara kimia, kolesterol termasuk senyawa yang relatif stabil, tetapi rentan terhadap oksidasi di bawah pengaruh panas, cahaya, atau radikal bebas. Proses oksidasi menghasilkan oksisterol, yakni turunan kolesterol yang mengalami perubahan struktur pada cincin atau rantai samping. Beberapa oksisterol, seperti 7-ketokolesterol dan 25-hidroksikolesterol, diketahui bersifat sitotoksik dan proaterogenik karena dapat memicu kerusakan endotel pembuluh darah, inflamasi kronis, dan aterosklerosis (Brown & Jessup, 1999).

Oksidasi kolesterol dapat terjadi enzimatik maupun non-enzimatik.

1. Oksidasi enzimatik biasanya terjadi melalui enzim kolesterol oksidase atau sitokrom P450 (seperti CYP27A1, CYP46A1) yang berperan dalam metabolisme kolesterol menjadi asam empedu atau hormon steroid.
2. Oksidasi non-enzimatik terjadi akibat reaksi radikal bebas yang dipicu oleh stres oksidatif, misalnya karena paparan asap rokok, polusi, atau diet tinggi lemak jenuh (Suarsih, 2020).

Dalam sistem biologis, keberadaan antioksidan eksogen seperti vitamin E (tokoferol), vitamin C (asam askorbat), likopen, dan flavonoid sangat penting untuk mencegah oksidasi kolesterol. Antioksidan ini bekerja dengan menetralkan radikal bebas yang dapat menyerang gugus tak jenuh pada kolesterol, sehingga mencegah pembentukan oksisterol yang bersifat toksik terhadap dinding pembuluh darah (Suarsih, 2020; Yulita Apriyani & Astuti, 2018).

2.3 Kolesterol Bebas dan Ester Kolesterol

Dalam darah dan jaringan, kolesterol terdapat dalam dua bentuk: kolesterol bebas dan ester kolesterol. Sekitar 70% dari total kolesterol plasma berada dalam bentuk ester kolesterol yang dihasilkan oleh reaksi antara kolesterol bebas dan asam lemak. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim acyl-CoA:cholesterol acyltransferase (ACAT) di dalam sel dan oleh lecithin:cholesterol acyltransferase (LCAT) di plasma. Ester kolesterol berfungsi sebagai bentuk penyimpanan kolesterol di hati, jaringan adiposa, dan dinding arteri. Karena bersifat lebih hidrofobik, ester kolesterol dikemas ke dalam lipoprotein, terutama LDL (Low-Density Lipoprotein), untuk diangkut melalui sirkulasi darah (Lodish, 2021).

Namun, akumulasi ester kolesterol dalam makrofag menyebabkan terbentuknya sel busa (foam cells), yang merupakan ciri khas lesi awal aterosklerosis (Brown & Goldstein, 1986). Oleh karena itu, keseimbangan antara kolesterol bebas dan ester kolesterol menjadi penting untuk mempertahankan homeostasis lipid dan mencegah penyakit kardiovaskular.

2.4 Aktivitas Antioksidan dan Hubungan dengan Stabilitas Kolesterol

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa senyawa fitokimia dari tumbuhan mampu menjaga stabilitas kolesterol dan mencegah oksidasi LDL (Low-Density Lipoprotein). Yulita Apriyani dan Dwi Astuti (2018) melaporkan bahwa konsumsi jus tomat selama 14 hari mampu menurunkan kolesterol total dan LDL secara signifikan ($p = 0{,}000$ dan $p = 0{,}001$). Hal ini disebabkan oleh likopen, pigmen karotenoid non-provitamin A yang berperan sebagai penangkap radikal bebas dan menghambat oksidasi LDL.

Likopen bekerja dengan cara menghambat oksidasi gugus alilik pada kolesterol dan melindungi fosfolipid membran dari peroksidasi. Selain itu, likopen juga meningkatkan ekspresi enzim paraoxonase-1 (PON1) pada HDL yang berfungsi mencegah oksidasi LDL. Penelitian ini menunjukkan adanya hubungan langsung antara konsumsi antioksidan alami dan penurunan stres oksidatif lipid, yang berdampak pada stabilitas struktur kimia kolesterol dalam plasma darah.

2.5 Signifikansi Biokimia

Secara keseluruhan, sifat fisik dan kimia kolesterol menjelaskan peran vitalnya dalam sistem biologis. Struktur siklopentano-perhidrofenantrena yang kaku membuat kolesterol resisten terhadap degradasi spontan, sementara keberadaan gugus hidroksil dan rantai hidrokarbon panjang menjadikannya komponen ideal dalam membran sel dan prekursor biosintesis senyawa penting seperti hormon steroid dan asam empedu.

Kombinasi antara stabilitas kimia, kemampuan interaksi dengan lipid, serta sensitivitas terhadap oksidasi menjadikan kolesterol tidak hanya molekul struktural, tetapi juga molekul regulator metabolik yang menentukan fungsi fisiologis dan homeostasis energi tubuh..

3. Biosintesis Kolesterol

Biosintesis kolesterol merupakan proses anabolik multienzimatik yang terjadi di sitoplasma dan retikulum endoplasma hati, dengan substrat utama asetil-KoA. Jalur ini melibatkan empat tahap utama (Firani, Permatasari, dan Irnandi, 2021; Björkhem, Gustafsson, Johansson, dan Persson, 1975):

Tahap I: Pembentukan Mevalonat

1) Dua molekul asetil-KoA bergabung membentuk asetoasetil-KoA melalui katalisis tiolase.
2) Asetoasetil-KoA bereaksi dengan asetil-KoA lain membentuk HMG-KoA (3-hidroksi-3-metilglutaril-KoA) oleh enzim HMG-KoA sintase.
3) Enzim HMG-KoA reduktase mereduksi HMG-KoA menjadi mevalonat dengan bantuan dua molekul NADPH sebagai donor elektron.

Tahap ini merupakan titik kontrol utama (rate-limiting step) biosintesis kolesterol.

Tahap II: Pembentukan Isoprenoid

Mevalonat diubah menjadi isopentenil pirofosfat (IPP) melalui reaksi fosforilasi dan dekarboksilasi yang membutuhkan ATP. IPP kemudian berisomerisasi menjadi dimetilalil pirofosfat (DMAPP).

Tahap III: Pembentukan Skualen

Enzim skualen sintase menggabungkan enam unit isoprena menjadi skualen (C_{30}), suatu hidrokarbon linier.

Tahap IV: Pembentukan Lanosterol dan Kolesterol

Skualen dikonversi menjadi lanosterol, yang kemudian melalui 19 reaksi enzimatik (demetilasi, reduksi, dan isomerisasi) membentuk kolesterol (C_{27}). Penelitian Björkhem, Gustafsson, Johansson, dan Persson (1975) menemukan bahwa enzim CYP27A1 pada mitokondria hati mengkatalisis hidroksilasi kolesterol pada posisi C-26. Tahap ini merupakan langkah awal pembentukan asam empedu primer (cholic acid dan chenodeoxycholic acid), yang menjadi mekanisme katabolisme kolesterol utama dalam tubuh manusia. Biosintesis kolesterol bersifat energi-intensif; dibutuhkan ±18 molekul asetil-KoA, 16 NADPH, dan 36 ATP untuk membentuk satu molekul kolesterol.

4. Regulasi Biosintesis Kolesterol

Regulasi kolesterol bersifat multifaktor, mencakup pengendalian enzimatik, hormonal, diet, dan metabolik.

a. Regulasi Enzimatik

Enzim HMG-KoA reduktase merupakan titik pengendali utama biosintesis. Regulasi dilakukan melalui:

- Umpan balik negatif (feedback inhibition): kadar kolesterol tinggi menekan ekspresi gen HMGCR melalui SREBP-2 (Sterol Regulatory Element-Binding Protein-2).
- Modifikasi kovalen: fosforilasi oleh AMPK (AMP-activated protein kinase) menginaktivasi enzim saat energi sel rendah.
- Degradasi proteolitik: kelebihan kolesterol mempercepat degradasi HMG-KoA reduktase.

Penelitian Wenry Deston Latif, Muhammad Aswad, dan Muhammad Akbar Bahar (2022) menunjukkan bahwa penghambat enzim ini, seperti simvastatin dan atorvastatin, efektif menurunkan kadar kolesterol total dan LDL. Atorvastatin memiliki efek farmakodinamik yang lebih kuat karena afinitas tinggi terhadap enzim target.

b. Regulasi Hormonal

Insulin: mengaktifkan HMG-KoA reduktase melalui defosforilasi → meningkatkan sintesis kolesterol pada keadaan energi berlebih.

Glukagon dan Adrenalin: menghambat HMG-KoA reduktase melalui fosforilasi → menurunkan sintesis kolesterol pada kondisi energi rendah.

Hormon tiroid (T_3): meningkatkan transkripsi gen HMGCR dan menstimulasi pembentukan kolesterol serta asam empedu.

c. Regulasi Nutrisi dan Diet

Faktor diet sangat memengaruhi kadar kolesterol plasma. Lemak jenuh dan karbohidrat sederhana meningkatkan LDL, sedangkan serat pangan meningkatkan ekskresi kolesterol melalui feses (Cinintya dan Hermansyah, 2017).

Intervensi diet yang terbukti menurunkan kolesterol:

- Jus belimbing wuluh menurunkan kolesterol sebesar 63,4 mg/dL dalam 3 hari (Syafwan, Hasrima, dan Herman, 2022).
- Bawang putih menurunkan kadar kolesterol dengan meningkatkan ekskresi asam empedu (Eko Adi Setiawan, Luluk Sulistiyono, dan Rukmini Syahleman, 2020).
- Jus apel hijau dan buah naga merah menurunkan kadar kolesterol sebesar 28,61 mg/dL (Diana Rhismawati Djupri, Rineke Juanita, Eva Trisna, Aat Yatnikasari, dan Widiyo Weni Wigati, 2025).
- Edukasi diet dan olahraga menurunkan kolesterol pada pasien diabetes melitus (Rabiatul Adawiyah, Tri Setyawati, Dea Alifah, dan Sendhy Krisnasari, 2022).

d. Regulasi Metabolik

Regulasi metabolik kolesterol memiliki hubungan yang sangat erat dengan status energi sel dan jalur metabolisme utama tubuh. Dalam konteks biokimia, kolesterol bukan hanya produk akhir metabolisme lipid, tetapi juga bagian integral dari jaringan regulasi energi yang kompleks, yang melibatkan interaksi antara karbohidrat, lemak, dan protein. Proses sintesis kolesterol membutuhkan energi yang besar karena melibatkan reaksi reduksi dan fosforilasi berulang kali dengan konsumsi sejumlah besar molekul ATP dan NADPH. Oleh karena itu, biosintesis kolesterol hanya akan berlangsung aktif ketika energi sel dalam keadaan berlebih, yaitu pada kondisi di mana kadar ATP tinggi, dan kebutuhan energi langsung untuk fungsi seluler lainnya telah tercukupi (Al Rahmad, 2018).

Pada kondisi energi berlebih, seperti setelah konsumsi makanan tinggi karbohidrat atau lemak, metabolisme glukosa melalui glikolisis menghasilkan asetil-KoA dalam jumlah tinggi. Asetil-KoA yang terbentuk kemudian tidak seluruhnya masuk ke dalam siklus asam sitrat (siklus Krebs), melainkan dialihkan ke jalur biosintesis kolesterol dan asam lemak. Proses ini berlangsung terutama di hepatosit (sel hati) dan diatur oleh aktivitas enzim HMG-KoA reduktase, yang merupakan enzim pengendali laju (rate-limiting enzyme) dalam sintesis kolesterol. Enzim ini diaktifkan melalui mekanisme defosforilasi oleh protein fosfatase, yang dikatalisis oleh peningkatan kadar insulin setelah makan. Dengan demikian, dalam keadaan energi tinggi dan kadar insulin meningkat, tubuh “mengalihkan” sebagian asetil-KoA untuk membentuk cadangan energi dalam bentuk kolesterol dan trigliserida (Lehninger, 2017).

Sebaliknya, pada kondisi energi rendah atau ketika tubuh berada dalam keadaan puasa, aktivitas AMP-activated protein kinase (AMPK) meningkat. AMPK bertindak sebagai sensor energi seluler yang peka terhadap rasio AMP/ATP. Ketika rasio AMP meningkat (menandakan defisit energi), AMPK menghambat HMG-KoA reduktase melalui fosforilasi, yang secara langsung

menurunkan aktivitas biosintesis kolesterol. Hal ini merupakan mekanisme adaptif untuk menghemat energi, karena proses pembentukan kolesterol membutuhkan sumber energi yang signifikan dalam bentuk ATP dan NADPH. Pada kondisi ini, asetil-KoA lebih banyak diarahkan ke siklus Krebs untuk menghasilkan ATP melalui fosforilasi oksidatif di mitokondria (Firani, Permatasari, dan Irnandi, 2021).

Selain itu, hubungan antara metabolisme kolesterol dan energi juga melibatkan peran hormon-hormon metabolik, seperti insulin, glukagon, dan kortisol. Insulin merangsang sintesis kolesterol melalui peningkatan transkripsi gen SREBP-2 (Sterol Regulatory Element Binding Protein-2), yang menginduksi ekspresi HMG-KoA reduktase. Sementara itu, glukagon dan adrenalin bekerja secara antagonis terhadap insulin dengan mengaktifkan jalur cAMP-dependent protein kinase A (PKA), yang pada akhirnya menginaktivasi HMG-KoA reduktase melalui fosforilasi. Efek ini menjelaskan mengapa pada kondisi stres atau puasa panjang, sintesis kolesterol menurun dan metabolisme energi lebih difokuskan pada pemecahan substrat energi seperti glukosa dan asam lemak (Murray et al., 2018).

Regulasi metabolik kolesterol juga berperan dalam homeostasis energi sistemik. Kolesterol berfungsi sebagai komponen struktural membran mitokondria dan mikrosom, sehingga secara tidak langsung memengaruhi proses fosforilasi oksidatif dan produksi energi seluler. Studi eksperimental menunjukkan bahwa perubahan kadar kolesterol dalam membran mitokondria dapat mempengaruhi permeabilitas terhadap proton, memodulasi gradien elektrokimia, dan memengaruhi efisiensi pembentukan ATP (Zuhroiyyah, Sukandar, dan Sastradinanja, 2017). Kelebihan kolesterol dalam membran mitokondria menyebabkan gangguan transpor elektron dan meningkatkan pembentukan radikal bebas, sedangkan kekurangan kolesterol mengganggu kestabilan struktural membran dan menurunkan aktivitas enzim respirasi.

Selain itu, regulasi metabolik kolesterol juga melibatkan interaksi antara sintesis lipid dan oksidasi asam lemak. Ketika kadar ATP dan sitrat meningkat di sitoplasma, sebagian sitrat dikonversi kembali menjadi asetil-KoA dan oksaloasetat melalui enzim ATP-citrat lyase, yang menyediakan substrat bagi jalur biosintesis kolesterol dan asam lemak. Sebaliknya, pada defisit energi, aktivitas enzim ini menurun, dan asetil-KoA lebih difokuskan untuk oksidasi di mitokondria guna mempertahankan produksi energi. Mekanisme saling bergantung ini menjadikan kolesterol tidak hanya sebagai produk metabolisme lipid, tetapi juga sebagai indikator keseimbangan energi di dalam sel (Voet & Voet, 2016).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa regulasi metabolik kolesterol merupakan bagian integral dari sistem pengendalian energi tubuh. Sintesis kolesterol berlangsung aktif hanya ketika energi dan substrat metabolik berlebih, sedangkan pada kondisi kekurangan energi, jalur biosintesisnya dihambat demi efisiensi metabolisme. Hubungan timbal balik antara kolesterol dan energi ini menunjukkan bahwa kolesterol berfungsi tidak hanya sebagai komponen struktural membran sel, tetapi juga sebagai penanda status energi seluler dan pengatur keseimbangan metabolik yang esensial dalam menjaga homeostasis tubuh.

Metabolisme lipid secara keseluruhan membentuk dasar dari sistem energi tubuh dan menjadi konteks utama bagi pemahaman metabolisme kolesterol. Lipid, sebagai kelompok senyawa organik yang bersifat hidrofobik atau tidak larut dalam air, memiliki struktur kimia yang didominasi oleh rantai hidrokarbon panjang dan tidak bermuatan. Sifat ini membuat lipid hanya dapat larut dalam pelarut organik nonpolar seperti eter, kloroform, dan benzena, tetapi tidak dalam air. Meskipun demikian, lipid berperan esensial dalam berbagai fungsi biokimia tubuh, mulai dari pembentukan membran sel, penyimpanan energi, hingga sebagai prekursor berbagai molekul biologis aktif seperti hormon steroid, prostaglandin, dan vitamin lipofilik (A, D, E, K).

Dalam konteks metabolik, lipid menjalani dua jalur utama: katabolisme (pemecahan lemak untuk menghasilkan energi) dan anabolisme (pembentukan lemak dan senyawa turunan untuk penyimpanan energi atau fungsi struktural). Proses katabolisme dimulai dari hidrolisis trigliserida

menjadi gliserol dan asam lemak bebas, yang selanjutnya dioksidasi di dalam mitokondria melalui proses β-oksidasi. Hasilnya berupa asetil-KoA yang dapat memasuki siklus Krebs untuk menghasilkan ATP melalui fosforilasi oksidatif. Sebaliknya, pada kondisi energi berlebih, asetil-KoA di sitoplasma akan diarahkan menuju sintesis asam lemak dan kolesterol.

Proses ini dikatalisis oleh serangkaian enzim, termasuk HMG-CoA reduktase yang berperan sebagai titik pengendali utama biosintesis kolesterol. Dengan demikian, metabolisme lipid dan kolesterol tidak berdiri sendiri, tetapi saling terhubung dalam sistem biokimia yang kompleks dan dinamis, di mana status energi sel menentukan arah metabolisme (anabolik atau katabolik). Gangguan pada jalur metabolik ini dapat menimbulkan berbagai penyakit degeneratif. Salah satu manifestasi paling umum adalah dislipidemia dan hiperkolesterolemia, yaitu peningkatan kadar lipid dan kolesterol plasma di atas ambang normal. Keadaan ini berpotensi memicu aterosklerosis, yaitu akumulasi lipid dan kolesterol teroksidasi (oxLDL) di dinding pembuluh darah yang membentuk plak ateroma dan menyebabkan penyempitan lumen arteri. Aterosklerosis menjadi penyebab utama penyakit jantung koroner, stroke iskemik, dan gangguan sirkulasi perifer.

Selain itu, kelebihan kolesterol juga berkaitan dengan penyakit hati berlemak non-alkoholik (NAFLD) dan sindrom metabolik, di mana terjadi gangguan regulasi antara sintesis dan degradasi lipid yang berdampak pada resistensi insulin dan peningkatan stres oksidatif di mitokondria. Sebaliknya, lipid juga memiliki fungsi protektif yang penting bila berada dalam kadar fisiologis. Kolesterol, sebagai salah satu jenis lipid kompleks, menjadi komponen struktural membran sel yang menjaga fluiditas dan stabilitasnya, terutama pada suhu fisiologis.

Kolesterol juga berfungsi sebagai prekursor bagi hormon-hormon steroid seperti estrogen, testosteron, kortisol, dan aldosteron yang berperan dalam regulasi metabolisme energi, tekanan darah, serta keseimbangan cairan tubuh. Selain itu, kolesterol merupakan bahan baku utama untuk sintesis asam empedu yang membantu pencernaan dan absorpsi lemak di usus halus. Dengan demikian, keberadaan kolesterol dalam tubuh tidak dapat diartikan semata-mata negatif, karena fungsi biokimianya sangat penting untuk kelangsungan hidup seluler.

Dalam sistem metabolisme kolesterol, keseimbangan antara sintesis, transport, dan degradasi kolesterol sangat menentukan homeostasis tubuh. Kolesterol diangkut dalam darah oleh lipoprotein dengan berbagai densitas, seperti LDL (Low-Density Lipoprotein), HDL (High-Density Lipoprotein), dan VLDL (Very Low-Density Lipoprotein). LDL bertugas membawa kolesterol dari hati ke jaringan perifer, sementara HDL melakukan reverse cholesterol transport, yaitu mengangkut kolesterol dari jaringan kembali ke hati untuk didegradasi menjadi asam empedu melalui aktivitas enzim CYP27A1. Ketidakseimbangan antara keduanya, terutama peningkatan LDL dan penurunan HDL, menjadi pemicu utama terbentuknya plak aterosklerotik. Dalam hal ini, kolesterol berperan sebagai penanda status metabolik yang sangat sensitif terhadap faktor diet, aktivitas fisik, dan hormon.

Faktor hormonal dan enzimatik memiliki peran kunci dalam mengatur jalur metabolisme lipid dan kolesterol ini. Insulin menstimulasi sintesis lipid dan kolesterol melalui aktivasi enzim HMG-CoA reduktase, sementara glukagon dan adrenalin menghambatnya melalui fosforilasi enzim tersebut oleh protein kinase A (PKA). Aktivasi AMP-activated protein kinase (AMPK) pada kondisi energi rendah juga menghambat biosintesis kolesterol dan asam lemak untuk menghemat energi. Dengan kata lain, sistem metabolisme kolesterol berperan sebagai mekanisme pengatur energi, yang menyesuaikan aktivitas sintesis lipid terhadap ketersediaan substrat dan kebutuhan energi seluler.

Peran metabolik ini juga menjelaskan hubungan erat antara lipid dan fungsi mitokondria. Kolesterol dalam membran mitokondria memengaruhi fluiditas dan permeabilitas terhadap proton, yang berdampak pada efisiensi rantai transpor elektron dan pembentukan ATP. Kelebihan kolesterol dapat menyebabkan rigiditas membran dan gangguan fosforilasi oksidatif, sedangkan kekurangan kolesterol dapat mengganggu kestabilan membran mitokondria. Ketidakseimbangan

tersebut menimbulkan peningkatan radikal bebas (ROS) yang menjadi penyebab stres oksidatif dan kerusakan seluler pada penyakit metabolik kronis seperti diabetes, obesitas, dan aterosklerosis.

Dengan demikian, pembahasan mengenai metabolisme lipid dan kolesterol menunjukkan bahwa lipid bukan hanya sumber energi, tetapi juga molekul pengatur dalam sistem homeostasis tubuh. Sifat kimianya yang tidak larut air justru menjadikannya ideal untuk fungsi biologis jangka panjang, baik sebagai komponen membran maupun sebagai bentuk cadangan energi yang efisien. Pemahaman mengenai keterkaitan antara metabolisme lipid, kolesterol, dan energi ini sangat penting untuk mengembangkan strategi pencegahan penyakit metabolik, baik melalui intervensi diet alami, aktivitas fisik, maupun regulasi enzimatik dan hormonal. Dengan pendekatan integratif ini, pengendalian kadar kolesterol dapat dilakukan secara efektif tanpa mengganggu keseimbangan energi dan fungsi biokimia tubuh.

5. Kolesterol dan Hubungannya dengan Metabolisme Energi

Kolesterol memiliki peran yang sangat penting dalam sistem metabolisme energi karena berfungsi sebagai titik penghubung antara metabolisme lipid, karbohidrat, dan energi. Secara biokimia, kolesterol disintesis dari asetil-KoA, suatu molekul sentral dalam berbagai jalur metabolik utama tubuh, termasuk glikolisis, oksidasi asam lemak, dan siklus asam sitrat (siklus Krebs). Dengan demikian, kolesterol bukan hanya komponen struktural membran sel, tetapi juga berfungsi sebagai penanda status energi sel serta pengatur metabolisme lipid dalam berbagai kondisi fisiologis dan patologis (Lehninger, 2017).

Pada keadaan energi tinggi, seperti setelah konsumsi makanan yang kaya karbohidrat atau lemak, glukosa dipecah melalui glikolisis menghasilkan piruvat, yang kemudian diubah menjadi asetil-KoA dalam mitokondria oleh enzim piruvat dehidrogenase. Asetil-KoA yang terbentuk kemudian tidak seluruhnya masuk ke dalam siklus Krebs untuk menghasilkan ATP, melainkan sebagian dialihkan ke sitoplasma melalui pembentukan sitrat. Di sitoplasma, enzim ATP-citrat lyase mengkonversi kembali sitrat menjadi asetil-KoA dan oksaloasetat, menyediakan substrat untuk biosintesis kolesterol dan asam lemak. Dengan demikian, jalur biosintesis kolesterol berperan sebagai mekanisme penyimpanan energi jangka panjang ketika suplai energi tubuh berlebih (Murray, Bender, Botham, Kennelly, Rodwell, dan Weil, 2018).

Proses biosintesis kolesterol sendiri merupakan lintasan metabolik yang sangat memerlukan energi. Untuk menghasilkan satu molekul kolesterol, dibutuhkan sekitar 18 molekul asetil-KoA, 16 NADPH, dan 36 ATP. NADPH disediakan oleh jalur pentosa fosfat dan aktivitas enzim malat dehidrogenase sitosolik, sedangkan ATP diperlukan untuk reaksi fosforilasi pada tahap konversi mevalonat menjadi isoprenoid. Hal ini menjelaskan bahwa sintesis kolesterol hanya berlangsung aktif ketika terdapat ketersediaan energi dan substrat reduktor (NADPH) yang cukup, yaitu pada kondisi anabolik (Lehninger, 2017).

Sebaliknya, ketika tubuh mengalami defisit energi, seperti pada kondisi puasa, aktivitas enzim AMP-activated protein kinase (AMPK) meningkat. AMPK bertindak sebagai sensor energi seluler yang peka terhadap perubahan rasio AMP/ATP. Peningkatan aktivitas AMPK menyebabkan fosforilasi dan inaktivasi enzim HMG-KoA reduktase, yaitu enzim kunci dalam biosintesis kolesterol. Akibatnya, jalur sintesis kolesterol dihentikan dan asetil-KoA yang tersedia dialihkan kembali ke siklus Krebs untuk menghasilkan ATP melalui fosforilasi oksidatif di mitokondria (Firani, Permatasari, dan Irnandi, 2021). Mekanisme ini menunjukkan adanya keterkaitan langsung antara metabolisme energi dan biosintesis kolesterol, di mana tubuh beradaptasi untuk menghemat energi pada kondisi defisit metabolik.

Selain itu, kolesterol juga berperan penting dalam menjaga fungsi dan integritas membran mitokondria, tempat berlangsungnya sebagian besar reaksi pembentukan energi. Kolesterol berkontribusi terhadap stabilitas struktural dan fluiditas membran mitokondria, terutama dalam mempertahankan gradien proton antar membran yang menjadi dasar bagi proses fosforilasi oksidatif. Pada kadar normal, kolesterol membantu menjaga kestabilan membran dan mencegah

kebocoran proton. Namun, ketika kadar kolesterol berlebihan, permeabilitas membran terhadap proton menurun, menyebabkan gangguan transpor elektron, penurunan produksi ATP, dan peningkatan pembentukan radikal bebas (Reactive Oxygen Species/ROS). Akumulasi ROS selanjutnya dapat memicu stres oksidatif dan kerusakan mitokondria yang berdampak pada penurunan efisiensi metabolisme energi (Firani, Permatasari, dan Irnandi, 2021; Montero, Morales, Llacuna, Lluis, Terrones, Basañez, dan Colell, 2010).

Selain peran strukturalnya, kolesterol juga berfungsi sebagai regulator transduksi sinyal metabolisme energi. Kolesterol mengatur ekspresi berbagai gen yang terlibat dalam metabolisme lipid melalui interaksi dengan Sterol Regulatory Element-Binding Proteins (SREBP) dan Liver X Receptor (LXR). SREBP berperan dalam meningkatkan transkripsi gen yang mengatur biosintesis kolesterol dan asam lemak, sementara LXR mengatur ekspresi gen yang berfungsi dalam pengeluaran kolesterol berlebih dan oksidasi asam lemak. Ketika kadar kolesterol dalam sel meningkat, aktivasi SREBP ditekan, sedangkan LXR diaktifkan untuk menjaga keseimbangan homeostasis kolesterol dan energi (Repa dan Mangelsdorf, 2002).

Hubungan kolesterol dengan metabolisme energi juga dikontrol oleh hormon-hormon metabolik, seperti insulin, glukagon, kortisol, dan hormon tiroid. Insulin yang meningkat setelah makan menstimulasi aktivitas HMG-KoA reduktase melalui defosforilasi, sehingga mempercepat sintesis kolesterol. Sebaliknya, glukagon dan adrenalin bekerja secara antagonis dengan mengaktivasi protein kinase A (PKA), yang kemudian memfosforilasi dan menginaktivasi enzim tersebut, menekan biosintesis kolesterol pada saat kebutuhan energi meningkat (Murray, Bender, Botham, Kennelly, Rodwell, dan Weil, 2018). Hormon kortisol dan tiroksin juga berperan dalam meningkatkan aktivitas enzim-enzim yang terlibat dalam katabolisme lipid dan glukosa, sehingga memengaruhi distribusi asetil-KoA untuk produksi energi atau sintesis kolesterol.

Secara keseluruhan, kolesterol memiliki peran ganda dalam sistem metabolik. Di satu sisi, kolesterol berfungsi sebagai komponen struktural yang menjaga integritas membran sel dan mitokondria, serta menjadi prekursor bagi hormon-hormon steroid pengatur energi seperti kortisol dan aldosteron. Di sisi lain, kolesterol berperan dalam regulasi metabolik, mengatur transduksi sinyal yang mengendalikan keseimbangan antara anabolisme dan katabolisme. Ketidakseimbangan kadar kolesterol dalam tubuh, baik kelebihan maupun kekurangan, dapat menyebabkan gangguan homeostasis energi, stres oksidatif, dan disfungsi mitokondria yang berujung pada berbagai gangguan metabolik seperti aterosklerosis, obesitas, dan diabetes melitus tipe 2 (Rader dan Tall, 2012; Zuhroiyyah, Sukandar, dan Sastradinanja, 2017).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kolesterol berperan tidak hanya sebagai molekul lipid struktural, tetapi juga sebagai regulator biokimia utama dalam homeostasis energi. Melalui perannya dalam biosintesis, regulasi enzimatik, kontrol hormonal, dan stabilitas mitokondria, kolesterol menjadi faktor penentu keseimbangan energi seluler dan metabolisme tubuh secara keseluruhan.

6. Implikasi Lipid dan Kolesterol terhadap Kesehatan

Keseimbangan kadar lipid dan kolesterol dalam tubuh merupakan faktor krusial dalam menjaga kesehatan metabolik dan fungsi sistem kardiovaskular. Kolesterol dan lipid berperan penting dalam berbagai proses fisiologis, mulai dari pembentukan membran sel, sintesis hormon steroid, hingga transportasi lipid melalui darah. Namun, ketika keseimbangan antara kolesterol “baik” dan “jahat” terganggu, dapat terjadi berbagai gangguan metabolik, seperti hiperkolesterolemia, aterosklerosis, hiperlipidemia, dan penyakit jantung koroner (Prehanawan, Rayidah, Mulyani, Ariyanti, Safitri, Maharani, dan Fortuna, 2022).

Kolesterol dalam darah diangkut oleh lipoprotein, yang terdiri dari beberapa jenis dengan fungsi berbeda, yaitu *Low-Density Lipoprotein* (LDL), *High-Density Lipoprotein* (HDL), *Very Low-Density Lipoprotein* (VLDL), dan *Intermediate-Density Lipoprotein* (IDL). LDL dikenal sebagai “kolesterol jahat” karena bertanggung jawab membawa kolesterol dari hati ke jaringan perifer.

Kelebihan LDL dapat menyebabkan akumulasi kolesterol di dinding pembuluh darah, membentuk plak lemak yang mempersempit lumen arteri dan mengurangi elastisitasnya, suatu kondisi yang dikenal sebagai aterosklerosis. Sebaliknya, HDL dikenal sebagai "kolesterol baik" karena berperan dalam reverse cholesterol transport, yaitu mengangkut kolesterol dari jaringan perifer kembali ke hati untuk diuraikan menjadi asam empedu dan diekskresikan melalui feses (Zuhroiyyah, Sukandar, dan Sastradinanja, 2017).

Aterosklerosis merupakan salah satu penyebab utama penyakit jantung koroner dan stroke iskemik. Proses ini dimulai dengan oksidasi LDL (oxLDL) oleh radikal bebas dan enzim tertentu di endotel pembuluh darah. Oksidasi tersebut memicu respons inflamasi, menarik monosit ke dinding arteri yang kemudian berdiferensiasi menjadi makrofag. Makrofag yang menelan LDL teroksidasi akan berubah menjadi sel busa (foam cells), yang menumpuk membentuk plak ateroma. Plak yang menebal akan menghambat aliran darah dan pada kondisi lanjut dapat pecah, menyebabkan pembentukan trombus yang berpotensi menimbulkan infark miokard atau stroke (Lehninger, 2017; Murray, Bender, Botham, Kennelly, Rodwell, dan Weil, 2018).

Selain faktor genetik, gaya hidup modern seperti konsumsi makanan tinggi lemak jenuh, gula sederhana, dan kurang aktivitas fisik menjadi penyebab utama gangguan keseimbangan lipid. Pola makan tinggi lemak jenuh dan trans meningkatkan kadar LDL dan trigliserida, sementara lemak tak jenuh tunggal dan ganda (MUFA dan PUFA) dari minyak nabati dan ikan laut justru menurunkan kadar kolesterol total dan meningkatkan HDL (Firani, Permatasari, dan Irnandi, 2021). Oleh karena itu, modifikasi gaya hidup dan diet menjadi pilar utama dalam pencegahan dan pengendalian penyakit akibat dislipidemia.

Serat pangan memainkan peran penting dalam pengendalian kolesterol darah. Berdasarkan mekanisme biokimia, serat larut air seperti pektin, beta-glukan, dan gum mampu mengikat asam empedu di usus, sehingga mengurangi sirkulasi enterohepatik asam empedu. Hal ini memaksa hati menggunakan lebih banyak kolesterol untuk mensintesis asam empedu baru, sehingga menurunkan kolesterol plasma. Selain itu, serat pangan juga menurunkan absorpsi kolesterol usus dan meningkatkan konversi kolesterol hati menjadi asam empedu (Suarsih, 2020).

Penelitian Prehanawan, Rayidah, Mulyani, Ariyanti, Safitri, Maharani, dan Fortuna (2022) menunjukkan bahwa edukasi dan intervensi gizi melalui pemberian makanan tinggi serat seperti sayuran hijau, buah-buahan, dan biji-bijian utuh mampu menurunkan kadar kolesterol total secara signifikan. Serat pangan tidak hanya memengaruhi kadar lipid, tetapi juga memperbaiki mikrobiota usus, yang berperan dalam metabolisme asam empedu dan kolesterol.

Selain intervensi diet, aktivitas fisik teratur juga berpengaruh terhadap profil lipid darah. Olahraga aerobik, seperti berjalan cepat, bersepeda, dan berenang, meningkatkan kadar HDL dan menurunkan trigliserida, serta memperbaiki sensitivitas insulin yang pada gilirannya mengoptimalkan metabolisme lipid. Aktivitas fisik membantu mengaktifkan enzim lipoprotein lipase (LPL), yang mempercepat katabolisme trigliserida dan memperbaiki distribusi kolesterol plasma (Zuhroiyyah, Sukandar, dan Sastradinanja, 2017).

Dari perspektif kesehatan masyarakat, edukasi pola makan sehat dan perilaku hidup aktif menjadi langkah strategis untuk menurunkan angka kejadian dislipidemia. Penelitian yang dilakukan oleh Heni Nur Kusumawati dan Imrok Atus Sholihah (2022) menunjukkan bahwa program edukasi gizi dan intervensi perilaku hidup sehat secara signifikan menurunkan kadar kolesterol darah serta meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap pentingnya pengendalian pola makan. Edukasi semacam ini terbukti mampu mendorong perubahan gaya hidup menuju pola diet seimbang yang rendah lemak jenuh dan tinggi serat pangan.

Selain faktor gaya hidup, terdapat juga intervensi farmakologis yang umum digunakan untuk mengendalikan kadar kolesterol, seperti kelompok statin (simvastatin, atorvastatin, rosuvastatin) yang bekerja dengan menghambat enzim HMG-CoA reduktase. Obat ini efektif menurunkan kadar kolesterol LDL hingga 50% dan menurunkan risiko penyakit kardiovaskular, tetapi penggunaan

jangka panjang memerlukan pengawasan ketat karena efek samping terhadap hati dan otot (Latif, Aswad, dan Bahar, 2022). Pendekatan farmakologis idealnya dikombinasikan dengan intervensi nonfarmakologis seperti diet sehat, olahraga, dan manajemen stres untuk mencapai hasil optimal dan berkelanjutan.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa implikasi lipid dan kolesterol terhadap kesehatan sangat luas, meliputi fungsi fisiologis normal hingga patogenesis berbagai penyakit degeneratif. Menjaga keseimbangan antara LDL dan HDL merupakan kunci dalam pencegahan penyakit jantung dan gangguan metabolik. Pengendalian kadar kolesterol secara komprehensif melalui intervensi gizi, peningkatan aktivitas fisik, edukasi kesehatan, dan terapi farmakologis yang tepat merupakan strategi efektif dalam mempertahankan homeostasis lipid dan meningkatkan kualitas hidup.

KESIMPULAN

Kajian ini menunjukkan bahwa lipid dan kolesterol memiliki peran fundamental dalam sistem metabolisme tubuh, baik sebagai sumber energi maupun sebagai pengatur homeostasis biokimia. Lipid, meskipun bersifat hidrofobik dan tidak larut dalam air, merupakan molekul esensial yang menyusun membran sel, menjadi cadangan energi jangka panjang, serta berfungsi sebagai prekursor hormon steroid dan vitamin lipofilik. Kolesterol, salah satu jenis lipid kompleks, memiliki peran ganda selain sebagai komponen struktural membran sel, juga sebagai regulator metabolisme energi melalui keterlibatannya dalam jalur biosintesis asetil-KoA, oksidasi mitokondria, dan pengaturan ekspresi gen metabolik seperti SREBP dan LXR.

Metabolisme lipid dan kolesterol bersifat dinamis dan saling terkait antara proses anabolik dan katabolik. Ketika energi berlebih, asetil-KoA dari glikolisis dan oksidasi asam lemak dialihkan ke jalur biosintesis kolesterol; sedangkan pada kondisi defisit energi, aktivitas AMPK menghambat HMG CoA reduktase untuk menghemat ATP dan NADPH. Mekanisme ini menunjukkan bahwa kolesterol bukan hanya produk metabolik, tetapi juga penanda status energi seluler. Gangguan pada sistem metabolisme lipid dan kolesterol menyebabkan berbagai penyakit metabolik seperti dislipidemia, aterosklerosis, penyakit hati berlemak nonalkoholik (NAFLD), obesitas, dan diabetes melitus tipe 2. Penelitian-penelitian yang dikaji menegaskan efektivitas intervensi alami berbasis pangan seperti alpukat, belimbing wuluh, tomat, bawang putih, dan buah naga merah dalam menurunkan kadar kolesterol darah melalui aktivitas antioksidan, peningkatan ekskresi asam empedu, serta penghambatan enzim HMG CoA reduktase.

Dengan demikian, pemahaman komprehensif mengenai metabolisme lipid dan kolesterol menjadi penting tidak hanya dalam konteks klinis, tetapi juga dalam pendidikan biokimia dan kimia kesehatan. Integrasi ilmu ini dengan kearifan lokal misalnya pemanfaatan bahan alami tradisional untuk pengendalian kolesterol dapat memperkuat literasi ilmiah masyarakat, membentuk pola hidup sehat, dan memperkaya pembelajaran sains berbasis kontekstual di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

Agustin, F., Arinda, A. D., Febrianti, Z. S. A., Rizky, I. K., & Andriani, M. (2024). Aktivitas Tepung Tempe Terhadap Kadar Kolesterol Total Tikus Model Hiperkolesterolemia. ARTERI: Jurnal Ilmu Kesehatan, 6(1), 41-46.

Al Rahmad, A. H. (2018). *Metabolisme Lipid dan Hubungannya dengan Energi*. Banda Aceh: Universitas Syiah Kuala Press.

Anggraini, R. B., & Nurvinanda, R. (2020). Skrining kesehatan tentang hipertensi, kolestrol dan diabetes militus di Desa Cengkong Abang Kabupaten Bangka. Jurnal Kreativitas Pengabdian Kepada Masyarakat (PKM), 3(2), 346-351.

Apriana, M., Toni, R. M., Huda, M. C., Kamal, Z. M., Khoerunnisa, R., Allahuddin, A., ... & Anggraeni, F. (2022). Pengobatan Penyakit Kolestrol Dengan Menggunakan Ekstrak Herbal Di Indonesia-a Review. Jurnal Buana Farma, 2(2), 19-32.

Björkhem, I., Gustafsson, J., Johansson, G., & Persson, B. (1975). The biological conversion of cholesterol to bile acids. *European Journal of Biochemistry, 54*(1), 223–231.

Brown, A. J., & Jessup, W. (1999). Oxysterols and atherosclerosis. *Atherosclerosis, 142*(1), 1–28.

Brown, M. S., & Goldstein, J. L. (1986). A receptor-mediated pathway for cholesterol homeostasis. *Science, 232*(4746), 34–47.

Cinintya, N., & Hermansyah, D. (2017). Pengaruh asupan lemak jenuh terhadap kadar kolesterol plasma. *Jurnal Gizi dan Kesehatan Indonesia, 9*(2), 101–110.

Eko Adi Setiawan, L., Sulistiyono, L., & Syahleman, R. (2020). Efektivitas bawang putih dalam menurunkan kadar kolesterol total pada lansia. *Jurnal Kesehatan Universitas Airlangga, 13*(1), 25–31.

Firani, N. K., Permatasari, H. K., & Irnandi, D. F. (2021). *Tinjauan Biokimia dan Patologi Lemak*. Malang: Universitas Brawijaya Press.

Heni Nur Kusumawati, & Sholihah, I. A. (2022). Edukasi pola makan sehat dalam pencegahan hiperlipidemia pada masyarakat perkotaan. *Jurnal Promosi Kesehatan Indonesia, 17*(2), 123–132.

Latif, W. D., Aswad, M., & Bahar, M. A. (2022). Efektivitas simvastatin dan atorvastatin terhadap penurunan kadar kolesterol pada pasien dislipidemia. *Jurnal Farmasi Klinik Indonesia, 11*(1), 55–62.

Lehninger, A. L. (2017). *Principles of Biochemistry* (7th ed.). New York: W. H. Freeman.

Lodish, H. F. (2021). *Molecular Cell Biology* (9th ed.). New York: W. H. Freeman.

Montero, J., Morales, A., Llacuna, L., Lluis, J. M., Terrones, O., Basañez, G., & Colell, A. (2010). Mitochondrial cholesterol contributes to mitochondrial dysfunction in hepatocellular carcinoma. *Journal of Hepatology, 52*(4), 618–630.

Murray, R. K., Bender, D. A., Botham, K. M., Kennelly, P. J., Rodwell, V. W., & Weil, P. A. (2018). *Harper's Illustrated Biochemistry* (31st ed.). New York: McGraw-Hill.

Naim, H., Sulastri, E., & Hadi, F. (2019). Distribusi kolesterol dalam organ tubuh dan implikasinya terhadap fungsi biologis. *Jurnal Biokimia Indonesia, 5*(2), 85–93.

Prehanawan, R. P., Rayidah, T., Mulyani, A. S., Ariyanti, R., Safitri, A. N., Maharani, S., & Fortuna, T. A. (2022). Waspadai kolesterol tinggi: Sebuah artikel pengabdian kepada masyarakat. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Medika,* 12–17.

Rabiatul Adawiyah, T., Setyawati, D., Alifah, D., & Krisnasari, S. (2022). Pengaruh edukasi diet dan aktivitas fisik terhadap penurunan kadar kolesterol pada pasien diabetes melitus. *Jurnal Gizi dan Kesehatan Masyarakat, 8*(1), 44–53.

Rader, D. J., & Tall, A. R. (2012). The not-so-simple HDL story: Is it time to revise the HDL cholesterol hypothesis? *Nature Medicine, 18*(9), 1344–1346.

Repa, J. J., & Mangelsdorf, D. J. (2002). The role of orphan nuclear receptors in the regulation of cholesterol homeostasis. *Annual Review of Cell and Developmental Biology, 18,* 507–536.

Ramdhani, Z. A., Islamiyati, A., & Raupong, R. (2020). Hubungan Faktor Kolestrol Terhadap Gula Darah Diabetes dengan Spline Kubik Terbobot. ESTIMASI: Journal of Statistics and Its Application, 1(1), 32-39.

Rosmiati, R., & Basriwijaya, K. M. Z. (2021). Pemberdayaan Peternak Itik Melalui Pakan Fermentasi Dalam Upaya Menghasilkan Telur Rendah Kolestrol (Teresol) Di Desa Bate Puteh Kecamatan Langsa Lama Kota Langsa. COMSEP: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat, 2(3), 287-291.

Simons, K., & Ikonen, E. (2000). How cells handle cholesterol. *Science, 290*(5497), 1721–1726.

Syafwan, N., Hasrima, D., & Herman, A. (2022). Efektivitas jus belimbing wuluh terhadap penurunan kadar kolesterol total pada pria dewasa. *Jurnal Farmasi dan Sains Terapan, 6*(2), 55–63.

Suarsih, C. (2020). Hubungan pola makan dengan kejadian kolestrol pada lansia di wilayah kerja puskesmas tambaksari. Jurnal Keperawatan Galuh, 2(1), 25-30.

Sigarlaki, E. D., & Tjiptaningrum, A. (2016). Pengaruh pemberian buah naga merah (Hylocereus polyrhizus) terhadap kadar kolesterol total. Medical Journal of Lampung University [MAJORITY], 5(5), 14-17.

Utami, G. A. P. M., Putri, H., Wathan, N., & Yulita, R. (2024). Edukasi mengenai tanda gejala, penyebab dan pencegahan kolesterol di Apotek Syifa Banjarbaru. Jurnal Pengabdian Masyarakat Panacea, 2(1), 37-42.

Voet, D., & Voet, J. G. (2016). *Biochemistry* (5th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.

Widyasari, N., Sulastri, E., & Zulkarnaini, D. (2025). Pengaruh konsumsi jus alpukat terhadap penurunan kadar kolesterol total pada dewasa muda. *Jurnal Kesehatan Universitas Andalas, 11*(1), 35–42.

Yulita Apriyani, & Astuti, D. (2018). Pengaruh konsumsi jus tomat terhadap penurunan kadar kolesterol total dan LDL. *Jurnal Bioteknologi dan Kesehatan, 5*(3), 12–19.

Zuhroiyyah, S. F., Sukandar, H., & Sastradinanja, S. B. (2017). Hubungan aktivitas fisik dengan kadar kolesterol total, LDL, dan HDL pada masyarakat Jatinangor. *Jurnal Sistem Kesehatan, 2*(3), 120–129.