

FISILOGI HEWAN

Jilid 1

Rina Delfita



STAIN BATUSANGKAR PRESS

FISIOLOGI HEWAN

Jilid 1

Rina Delfita



STAIN Batusangkar Press
2014

Rina Delfita
Fisiologi Hewan Jilid I

Cet 1.-Batusangkar: STAIN Batusangkar Press, 2014

v + 181 hlm. ; 21 x 15 cm

ISBN : 978-602-329-009-3

1. *Fisiologi Hewan Jilid I*

1. Judul

Hak cipta dilindungi Undang-undang pada penulis

Cetakan Pertama, Oktober 2014

Fisiologi Hewan Jilid I

Penulis

Rina Delfita

Perwajahan Isi & Penata Letak

Marhen

Desain Cover

Marhen

Penerbit



STAIN Batusangkar Press, 2014

Jl. Sudirman No. 137 Lima Kaum Batusangkar

Telp : (0752) 71150, 574221, 574227, 71890, 71885.

Fax : (0752) 71879

Web : www.stainbatusangkar.ac.id

e-mail : press@stainbatusangkar.ac.id

stainbsk.press@gmail.com

PRAKATA

Alhamdulillah dipanjatkan kehadirat Allah Azza wa Jalla, yang telah melimpahkan rahmat, nikmat dan pertolongan-Nya, sehingga naskah ini dapat diselesaikan. Naskah buku ini merupakan kumpulan bahan ajar yang disampaikan pada mata kuliah Fisiologi Hewan di Tadris Pendidikan Biologi (S1) Sekolah Tinggi Agama Islam Batusangkar. Tulisan ini tidak semata-mata buah pikiran penulis sepenuhnya, tetapi sebagian juga merupakan kompilasi dari beberapa buku teks seperti tercantum dalam daftar pustaka. Tulisan ini disusun berdasarkan berbagai sumber referensi yang relevan dan sebagian besar diantaranya adalah buku acuan yang berlaku pada skala internasional yaitu Schmidt-Nielsen (1997) dan Rastogi (2007).

Fisiologi Hewan merupakan mata kuliah dasar yang wajib diikuti oleh mahasiswa Biologi. Mata kuliah mengkaji tentang bagaimana fungsinya tubuh hewan, baik pada level sel, jaringan maupun organ. Pada saat ini telah beredar beberapa buku Fisiologi Hewan yang berbahasa Indonesia, tetapi masih kurang lengkap pada beberapa kajian. Oleh karena itu dituliskan buku ini.

Secara umum naskah buku ini terdiri atas 7 bab. Bab I mengkaji konsep dasar fisiologi hewan, bab II mengkaji sel, struktur dan fungsinya serta transportasi zat melintasi membran, bab III mengkaji tentang nutrisi dan sistem pencernaan, bab IV mengkaji metabolisme energi, bab V mengkaji sistem sirkulasi, bab VI mengkaji sistem respirasi, dan bab VII mengkaji sistem ekskresi. Pada akhir buku disajikan glosarium agar mahasiswa mudah mempelajari dan memahami isi buku dengan baik. Buku ini selain bermanfaat bagi mahasiswa, juga bisa menjadi bahan pengayaan bagi guru Biologi SMA atau MA dan guru IPA SMP atau MTs.

Karena keterbatasan waktu selama penulisan buku ini, disadari tulisan ini masih jauh dari kesempurnaan sehingga masih diperlukan penyempurnaan. Akhirnya penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya STAIN Batusangkar atas kesempatan dan pembiayaan, sehingga buku ini terwujud. Ucapan terima kasih dan rasa syukur yang sangat mendalam kepada Allah SWT yang telah memberikan pria shaleh Andrizal, S.E.I., M.A dan tiga orang putra, M. Ghani al-Baroq, Adzka Adzkiya dan Gina Raudhatul Jannah. Keluarga yang selalu memberi semangat demi terwujudnya tulisan ini.

Semoga buku ini bermanfaat bagi pembaca, terutama mahasiswa S1 Pendidikan Biologi/Biologi yang sedang mendalami fisiologi hewan dan yang sedang menulis skripsi di bidang pendidikan dan pembelajaran.

Batusangkar, 28 April 2014

Rina Delfita, M.Si

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
TENTANG PENULIS	iii
DAFTAR ISI	iv
BAB I KONSEP DASAR FISILOGI	
HEWAN	1
1.1. Defenisi dan Ruang Lingkup	
Fisiologi Hewan	2
1.2. Cairan Tubuh Hewan	4
1.3. Homeostasis	6
1.4. Mekanisme Homeostasis	8
1.5. Mekanisme Aklimatisasi	10
1.6. Komponen Sistem Umpan Balik ...	11
BAB II TRANSPORTASI ZAT	
MELINTASI MEMBRAN.....	13
2.1. Membran plasma	14
2.2. Fungsi Membran	18
2.3. Mekanisme Transportasi Zat	20
BAB III NUTRISI DAN SISTEM	
PENCERNAAN	31
3.1. Nutrisi	31
3.2. Sistem Pencernaan	41
A. Cara Hewan Memperoleh Makanan.	42
B. Kebutuhan akan Sistem Pencernaan	49

	D. Struktur dan Fungsi Sistem Pencernaan	52
BAB IV	METABOLISME ENERGI	68
	4.1. Ruang Lingkup Metabolisme	68
	4.2. Konsep Energi	70
	4.3. Metabolisme Oksidatif Molekul Organik	73
	4.4. Penggunaan Energi dan Kontrol Enzimatis.....	81
	4.5. Metabolisme Basal	84
BAB V	SISTEM SIRKULASI	87
	5.1. Fungsi Sistem Sirkulasi	88
	5.2. Komponen Darah.....	88
	5.3. Komponen Sistem Sirkulasi.....	94
	5.4. Jantung Mamalia	100
	5.5. Aktivitas Fungsional Jantung	102
	5.6. Eksitasi, Konduksi Elektrik Jantung ...	104
	5.7. Tipe-tipe Sistem Sirkulasi	107
	5.8. Mekanisme Sirkulasi Vertebrata	114
	5.9. Dinamika Aliran Darah	123
	5.10. Kontrol Saraf terhadap Tekanan Darah	125
BAB VI	SISTEM RESPIRASI	127
	6.1. Fungsi Sistem Respirasi.....	128
	6.2. Gas di Udara dan Air	129
	6.3. Air dan Udara sebagai Media Respirasi	131
	6.4. Difusi Gas dalam Respirasi	132
	6.5. Desain Organ Respirasi Khusus	133
	6.6. Respirasi Melalui Difusi	134
	6.7. Respirasi dengan Insang	136

6.8. Respirasi dengan Trakhea	140
6.9. Respirasi dengan Paru-Paru	141
6.10. Proses Respirasi pada Mamalia	147
6.11. Kapasitas paru-paru	149
6.12. Transpor Gas Oksigen dan Karbon dioksida	152
6.13. Kontrol Respirasi	159
BAB VII	
SISTEM EKSRESI	162
7.1. Organ Ekskresi	162
7.2. Sistem Ekskresi Invertebrata	164
7.3. Sistem Ekskresi Vertebrata	169
GLOSARIUM	178
DAFTAR PUSTAKA	180

BAB I

KONSEP DASAR FISIOLOGI HEWAN

Hewan merupakan contoh tema pokok biologi. Setiap hewan harus bisa menyelenggarakan fungsi kehidupan, seperti bernafas, bergerak, makan, berkembang biak dan lain-lain. Untuk bisa melaksanakan fungsi kehidupan ini, hewan membutuhkan kondisi lingkungan tertentu. Setiap faktor lingkungan merupakan rangsang/stimulus bagi hewan, yang akan ditanggapi dengan cara tertentu/khusus. Mekanisme kerja fungsi kehidupan dan segala sesuatu yang dilakukan hewan agar tetap hidup merupakan inti kajian fisiologi hewan. Dengan kata lain, fisiologi hewan mengkaji fungsi normal tubuh hewan.

Kondisi lingkungan luar tubuh hewan tidak selalu konstan. Hal ini menyebabkan terjadinya perubahan pada lingkungan internal tubuh hewan. Apabila kondisi lingkungan internal tubuh hewan berubah, maka hewan harus berupaya agar perubahan lingkungan internal tersebut tidak berlanjut dengan cara mempertahankan diri atau beradaptasi sesuai dengan kemampuan yang dimiliki hewan tersebut. Respon atau tanggapan hewan terhadap rangsang/stimulus eksternal, merupakan kunci untuk memahami fisiologi hewan.

Pada bab ini menjelaskan tentang defenisi dan ruang lingkup fisiologi hewan, membedakan cairan intraseluler dan ekstraseluler, menjelaskan mekanisme homeostasis dan menjelaskan bagaimana

sistem regulasi memelihara dan menjaga lingkungan internal yang sesuai.

1.1. Defenisi dan Ruang Lingkup Fisiologi

Fisiologi hewan adalah ilmu yang mempelajari fungsi dan fenomena yang terjadi pada kondisi normal dari hewan dan menekankan kepada proses bagaimana hewan dapat hidup dan beraktivitas. Dengan kata lain fisiologi hewan adalah ilmu yang mempelajari tentang bagaimana sistem pencernaan, sistem pernapasan, sistem sirkulasi, sistem ekskresi serta fungsi-fungsi semua organ tubuh hewan lainnya. Ilmu ini dapat dikaji pada berbagai level, mulai dari level seluler, fungsi organ, hingga totalitas keseluruhan tubuh hewan. Pada tingkat seluler dapat dikaji bagaimana oksigen masuk ke dalam sel, sehingga metabolisme berlangsung. Pada tingkat fungsi organ dapat dikaji dari berbagai sistem yang ada dalam tubuh hewan seperti sistem pencernaan, pernafasan, ekskresi dan lain-lain. Pada tingkat totalitas keseluruhan tubuh hewan dapat dikaji bagaimana hewan menyesuaikan diri terhadap lingkungan eksternal yang berubah-ubah, seperti bagaimana invertebrata laut menyesuaikan diri terhadap perubahan salinitas, bagaimana hewan gurun menyesuaikan diri dari perubahan suhu yang drastis.

Lingkungan eksternal adalah tantangan terbesar bagi hewan. Lingkungan eksternal dibagi menjadi dua kategori, yaitu terestrial dan aquatis. Ada beberapa hewan dapat hidup di kedua lingkungan tersebut, tetapi pada tahapan perkembangan yang berbeda, misalnya katak dan serangga. Serangga dan katak semasa larva hidup di air tetapi bersifat semi-terestrial pada saat dewasa.

Pada umumnya, lingkungan eksternal hewan jarang sekali konstan. Misalnya, akan ada perubahan suhu, air, pH, konsentrasi gas dan sebagainya. Perubahan ini mungkin saja terjadi pada setiap hari atau musiman, dan mempengaruhi fungsi normal hewan. Apabila terjadi perubahan pada lingkungan eksternal hewan, maka plasma darah, hemolymph dan cairan ekstraselular, yang merupakan lingkungan internal yang mengelilingi sel-sel hewan akan terpengaruh. Jika terjadi perubahan yang besar maka akan

berdampak kepada keseluruhan sistem fisiologis hewan sehingga sangat beresiko bagi kelangsungan hidupnya. Oleh karena itu, hewan semaksimal mungkin harus mempertahankan kondisi lingkungan internal tersebut agar tidak berubah meskipun kondisi lingkungan eksternal berubah. Kebutuhan absolut hewan untuk mempertahankan kondisi lingkungan internalnya dalam keadaan konstan inilah yang disebut dengan homeostasis.

Fisiologi hewan sebagai salah satu cabang zoologi, terkait erat dengan bidang-bidang lainnya baik dalam ilmu biologi itu sendiri maupun bidang lainnya di luar biologi. Fisiologi hewan memerlukan dasar pemahaman yang baik di bidang anatomi hewan, histologi, perkembangan hewan, biologi sel, biologi molekuler, genetika, ekologi, dan kajian-kajian biologi secara umum. Selain itu juga dituntut pemahaman yang baik di bidang biokimia, kimia dan fisika khususnya tentang elektrofisika, dinamika gerak dan fluida. Penguasaan yang integratif dari berbagai bidang tersebut akan membantu kemudahan dalam menguasai kajian-kajian dalam fisiologi hewan secara baik.

Fisiologi hewan mempunyai cabang yaitu ekofisiologi, fisiologi evolusi dan fisiologi aplikatif. Ekofisiologi mengkaji tentang bagaimana proses-proses fisiologis hewan berlangsung dalam kaitannya dengan efek faktor lingkungan tempat hidupnya dan aspek-aspek ekologi lainnya yang berkontribusi terhadap mekanisme adaptasi fungsional. Dengan kata lain ekofisiologi lebih menekankan bagaimana hewan bisa tetap hidup dengan cara melakukan adaptasi fisiologis organ spesifik. Contohnya, hewan-hewan yang hidup di gurun seperti unta mempunyai mekanisme fisiologis khusus untuk bisa mengatasi kehilangan air tubuh dan pengaturan suhu tubuhnya. Contoh lainnya adalah pada hewan yang hidup di kutub, mempunyai mekanisme pengaturan panas tubuh yang spesifik, seperti mempunyai lapisan lemak yang tebal atau bagian-bagian tubuh/organ-organ tertentu dari hewan tersebut memiliki suhu yang berbeda-beda sehingga meminimalisir kehilangan panas tubuh. Fisiologi evolusi mengkaji bagaimana mekanisme fisiologi merefleksikan proses perubahan fundamental yang telah di alami hewan sebagai manifestasi tekanan evolusi

yang dialaminya dan bagaimana kaitan antar sistem-sistem fisiologis tersebut memberikan informasi evolusi yang elaboratif. Contohnya adalah bagaimana evolusi hewan berdasarkan kemiripan cara pengaturan suhu tubuh dan struktur otak. Fisiologi aplikatif, yaitu fisiologi yang meliputi pengetahuan dan pendekatan aplikasinya seperti fisiologi seranga, hematologi, imunologi, endokrinologi dan lain-lain.

1.2. Cairan Tubuh Hewan

Cairan tubuh hewan adalah cairan yang mengelilingi sel-sel hewan. Cairan tubuh hewan dalam berbagai hal memiliki komposisi yang berbeda dengan lingkungan eksternal hewan. Misalnya hewan terestrial, memiliki cairan tubuh yang dikelilingi oleh lingkungan eksternal berupa udara, atau hewan akuatis yang dikelilingi oleh lingkungan eksternal berupa air. Hal yang harus dilakukan oleh hewan adalah menjaga cairan tubuhnya dalam kondisi relatif konstan seperti konsentrasi ion-ion, gas terlarut, level nutrien dan lain-lainnya. Kemampuan hewan dalam mempertahankan kondisi cairan tubuh internalnya dalam level yang relatif konstan telah memberikan peluang kepadanya untuk mengkolonisasi berbagai tipe lingkungan termasuk lingkungan terestrial yang ekstrim. Transisi dari lingkungan akuatik ke terestrial hanya ditemukan pada insekta dan vertebrata dan sebagian kecil dari kelompok laba-laba dan moluska. Kemampuan untuk mengkolonisasi lingkungan terestrial mencerminkan tingkat kemampuan evolusi adaptif hewan dalam kurun waktu yang sangat panjang. Cairan tubuh hewan terdiri atas cairan ekstraseluler (*extracellular cell fluids-ECF*) dan intraseluler (*intracellular cell fluids-ICF*).

A. Cairan Ekstraseluler

Cairan ekstraseluler adalah cairan yang berada di luar sel-sel dari sebagian besar hewan. Cairan ini dikenal juga dengan cairan interstisial (*interstitial cell fluid-ISF*). Cairan ekstraseluler meliputi: (1) plasma darah, merupakan cairan tubuh yang terdapat di dalam jantung dan pembuluh darah; (2) cairan interstisial (cairan

jaringan), merupakan cairan tubuh yang terdapat di ruang antar sel; (3) cairan limfa, merupakan cairan tubuh yang terdapat di dalam pembuluh limfa dan organ limfatikus (nodus limfatikus, tonsil, timus dan limfa); (4) cairan sinovial, merupakan cairan tubuh yang terdapat di dalam rongga persendian; (5) cairan serebrospinal, merupakan cairan tubuh yang terdapat di dalam ruang-ruang otak dan canal sentral sum-sum tulang belakang; (6) aqueous humor dan vitreous humor, merupakan cairan tubuh yang terdapat di dalam bola mata; (7) endolimfa, merupakan cairan tubuh yang berada di dalam labirin membran; (8) perilymfa, merupakan cairan tubuh yang terdapat di dalam labirin tulang.

Cairan ekstraseluler pada protozoa (uniseluler) adalah berupa cairan di lingkungan tempat hidupnya. ECF pada hewan-hewan multiseluler sederhana yang hidup di laut hampir sama/identik dengan air laut. Ubur-ubur memiliki komposisi cairan ekstraseluler yang identik dengan air laut kecuali konsentrasi sulfat yang hanya setengah dari kadar yang ada di dalam air laut. Ini berarti perubahan pada konsentrasi sulfat akan memiliki efek signifikan terhadap kepekatan seluruh cairan tubuhnya. Hewan-hewan laut yang lebih maju, hewan air tawar, dan hewan terrestrial senantiasa mempertahankan kondisi cairan ekstraselulernya untuk berbeda dengan air laut. Komposisi yang detail dari masing-masing cairan ekstraseluler sangat beragam antar spesies. Kation utama dari cairan ekstraseluler adalah Na^+ dan anion yang utama adalah Cl^- .

B. Cairan intraseluler

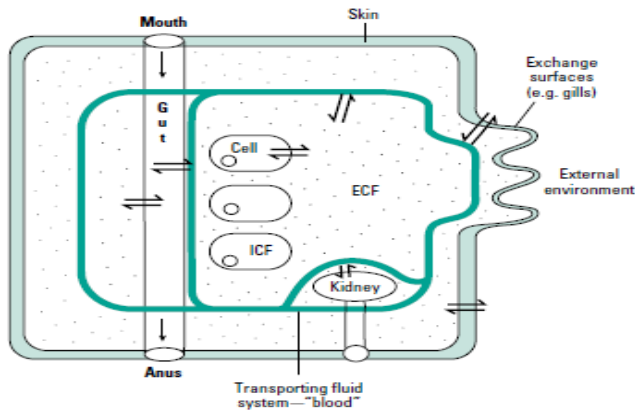
Cairan intraseluler (ICF) adalah cairan yang terdapat di dalam sel. Konsentrasi cairan intraseluler harus sama dengan cairan ekstraseluler. Jika tanpa adanya keseimbangan tersebut maka sel tidak akan stabil secara osmotik dan akan menimbulkan resiko perubahan ukuran sel dengan bertambahnya atau berkurangnya air di dalam sel yang akhirnya akan membahayakan bagi sel tersebut. Komposisi cairan intraseluler juga akan bervariasi antar spesies. Kation utama cairan intraseluler adalah K^+ . Bertolak belakang dengan ECF, semua konsentrasi elektrolit lebih rendah dan

terdapat sejumlah besar protein yang bersifat basa (alkalin). Kondisi ini ditemukan hampir pada semua hewan.

Tabel 1.1. Komposisi ion dalam cairan tubuh hewan invertebrata laut dan dalam air laut.

Spesies hewan	Konsentrasi ion (mmol/liter)					
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
Air laut	479,0	10,2	55,0	10,3	29,9	540,0
Ubur-Ubur	464,0	10,6	54,0	9,8	15,5	567,0
Rajungan	500,0	12,0	30,0	24,0	16,6	550,0
Kerang-kerangan	490,0	12,8	54,0	12,5	29,5	563,0

(Key, 1998: 163)

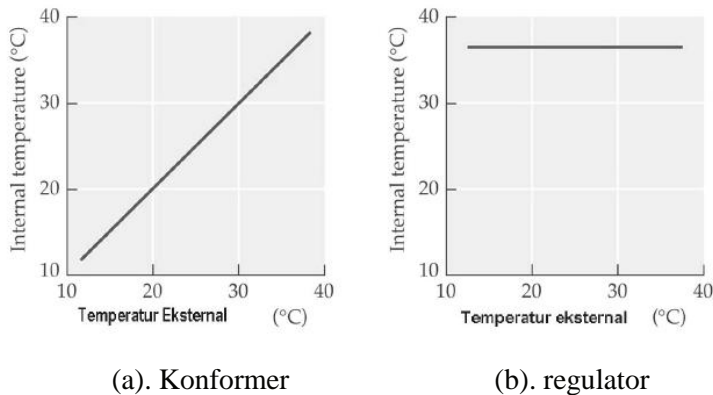


Gambar 1.1. Cairan intraseluler dan ekstraseluler

1.3. Homeostasis

Konsep homeostasis baru dikenal pada abad kesembilan belas (1857). Konsep ini diperkenalkan oleh ahli fisiologi Prancis, Claude Bernard. Homeostasis adalah tema sentral dalam fisiologi. Contoh dari homeostasis sangat banyak. Ketika hewan menjadi semakin kompleks dan terspesialisasi sepanjang proses evolusinya,

maka homeostasis juga menjadi semakin penting bagi fisiologi tubuh. Hewan yang tidak mampu mempertahankan kondisi lingkungan internalnya akibat perubahan lingkungan eksternalnya disebut **konformer**. Atau dengan kata lain, kelompok hewan konformer adalah kelompok hewan yang jika lingkungan internal tubuhnya berubah mengikuti perubahan lingkungan eksternalnya. Akan tetapi, terdapat batasan-batasan terhadap derajat perubahan yang terjadi yang dapat ditolerir oleh hewan tersebut. Jika melewati batas toleransi akan menyebabkan kematian atau setidaknya kerusakan yang signifikan. Oleh sebab itu, sebagian besar hewan yang maju tetap mempertahankan kondisi internalnya meskipun lingkungan eksternalnya berubah. Kelompok hewan ini disebut **regulator**. Dengan kata lain, kelompok hewan regulator adalah kelompok hewan yang mampu mempertahankan lingkungan internalnya meskipun lingkungan eksternalnya berubah. Dalam kondisi ini, lingkungan internal diregulasi melalui mekanisme-mekanisme kompleks yang tercakup dalam proses homeostasis sehingga kondisi yang ada tetap berbeda dan perbedaan itu relatif konstan.



Gambar 1.2. Prinsip umum dari contoh kelompok hewan konformer dan regulator terhadap perubahan suhu eksternal.

Banyak faktor yang mempengaruhi homeostasis. Faktor-faktor yang mempengaruhi homeostasis adalah: a). ketersediaan zat makanan sebagai sumber energi dalam kehidupan organisme; b). konsentrasi oksigen dan karbondioksida dalam tubuh yang berperan di dalam reaksi kimia; c). sisa metabolisme; d). pH berperan di dalam keseimbangan asam basa cairan tubuh dan kerja enzim; e). air, garam dan elektrolit akan mempengaruhi ukuran sel; f). volume dan tekanan; g) temperatur; h). parameter sosial pada serangga sosial.

1.4. Mekanisme Homeostasis

A. Sistem Umpan Balik (*Feedback*)

Sistem kontrol homeostatik yang paling utama dalam tubuh hewan adalah sistem umpan balik. Umpan balik terbagi atas dua yaitu umpan balik negatif dan positif. **Umpan balik negatif** dapat didefinisikan sebagai suatu perubahan sebuah variabel yang dilawan oleh suatu respon yang cenderung berkebalikan dengan perubahan tersebut. Contoh umpan balik negatif dapat dilihat pada burung dan mamalia yang harus menjaga suhu tubuhnya agar tetap normal/konstan. Peningkatan suhu tubuh akan menghasilkan respon-respon spesifik yang akan mengembalikan suhu tubuh kembali ke keadaan normal. Dengan kata lain, umpan balik negatif berperan dalam menjaga stabilitas fisiologis tubuh.

Sistem **umpan balik positif** merupakan kebalikan dari sistem umpan balik negatif, dimana perubahan awal pada suatu variabel akan menghasilkan perubahan yang lebih lanjut pada arah yang sama. Secara garis besar, sistem umpan balik positif hanya memiliki peran sangat kecil dalam menjaga homeostasis. Salah satu contohnya adalah koagulasi atau pembekuan darah. Proses koagulasi bekerja berdasarkan mekanisme umpan balik positif dan dapat dianggap sebagai suatu proses yang terlibat dalam menjaga volume sirkulasi darah agar tetap konstan. Dalam banyak hal, keterlibatan mekanisme umpan balik positif dalam mengontrol fungsi-fungsi fisiologis normal hewan akan dapat berubah menjadi suatu bencana (kerusakan). Misalnya, dalam proses termoregulasi

pada mamalia. Jika sistem tersebut bekerja berdasarkan mekanisme umpan balik positif maka suhu tubuh yang tinggi akan semakin tinggi sehingga pada akhirnya akan menimbulkan resiko yang fatal. Contoh lain dari sistem umpan balik positif adalah dalam fungsi sel-sel saraf. Dalam hal ini, influks awal dari ion Na^+ selama tahap awal potensial aksi akan menghasilkan depolarisasi yang selanjutnya akan meningkatkan influks Na^+ . Proses ini akan diikuti oleh depolarisasi yang semakin meningkat dan influks Na^+ juga semakin aktif. Contoh lainnya adalah proses laktasi. Secara umum, contoh-contoh proses biologi yang memperlihatkan sistem umpan balik positif sangat sedikit.

B. Sistem Umpan Kedepan (*Feedforward*)

Sistem umpan ke depan merupakan mekanisme fisiologis lain yang penting dalam menjaga homeostatis tubuh. Mekanisme ini adalah aktivitas antisipasi, suatu perilaku yang bekerja untuk meminimalisir kerusakan sebelum kerusakan itu sendiri terjadi. Contoh dari mekanisme ini adalah proses makan dan minum yang berlangsung sekaligus. Aktivitas memakan memiliki potensi untuk terjadinya dehidrasi karena peningkatan konsentrasi osmolaritas di dalam saluran pencernaan, sehingga menyebabkan kehilangan air dari cairan tubuh guna menjaga stabilitas osmolaritas tersebut hingga tetap isotonik. Untuk meminimalisir adanya gangguan pada osmolaritas cairan tubuh, umumnya hewan minum air pada waktu yang bersamaan dengan makan.

C. Mekanisme Homeostasis Nonfisiologis

Mekanisme homeostasis nonfisiologis atau disebut juga dengan **homeostasis ekuilibrium** merupakan suatu sistem kontrol tanpa melibatkan mekanisme fisiologis. Hal ini dapat dilihat pada hewan-hewan akuatis baik vertebrata maupun invertebrata yang hidup di dalam badan air yang sangat luas sehingga perubahan temperatur lingkungan menjadi sangat kecil. Temperatur tubuh hewan-hewan tersebut akan selaras dengan temperatur lingkungannya sehingga jika perubahan temperatur air sangat kecil, maka kemungkinan

besar temperatur tubuh hewan tetap konstan (tidak akan berubah). Sehingga hewan tidak perlu melibatkan mekanisme kontrol fisiologis tubuhnya untuk mengatur suhu tubuh agar tetap konstan tetapi cukup dengan hanya tinggal di badan perairan yang suhunya relatif stabil. Dengan kata lain, apabila temperatur air mengalami perubahan, maka hewan tersebut hanya perlu berpindah ke badan perairan yang suhunya relatif konstan.

Secara esensinya, hewan akan berkonformasi dengan suhu lingkungan eksternal. Akan tetapi apakah homeostasis ini adalah homeostasis sebenarnya atau bukan masih menjadi masalah yang kontroversial.

1.5. Mekanisme Aklimatisasi

Homeostasis merupakan upaya integratif dari hewan dalam mempertahankan kondisi fisiologisnya agar tetap konstan atau berada dalam level perubahan yang masih dapat ditoleransi. Cakupan dari semuanya itu berupa kemampuan hewan untuk merubah kisaran dari perubahan-perubahan variabel fisiologis yang terus dipertahankan. Kemampuan hewan untuk merubah kisaran inilah disebut dengan **aklimatisasi**. Dengan kata lain aklimatisasi adalah hasil penyesuaian fisiologis atau adaptasi fisiologis hewan pada lingkungan baru.

Mekanisme aklimatisasi ini berlangsung sebagai efek kumulatif dari perubahan lingkungan eksternal dan kemampuan sistem tubuh untuk meregulasi kondisi internalnya dengan berbagai mekanisme homeostasis. Dengan kata lain, regulasi tersebut adalah produk dari sistem kontrol dasar hewan yang bekerja sama dengan efek-efek lingkungan terhadap variabel tertentu. Contohnya, fisiologi hewan yang hidup di dataran rendah atau sekitar pantai berbeda dengan hewan yang sama spesiesnya tetapi tinggal di tempat yang lebih tinggi seperti di pegunungan (karena kadar oksigen akan berbeda pada ketinggian tempat yang berbeda). Ketersediaan oksigen akan menurun dengan bertambahnya ketinggian tempat. Hal ini menyebabkan orang yang tinggal di dataran tinggi akan memperlihatkan beragam adaptasi fisiologis dan anatomis dibandingkan dengan orang yang tinggal di dataran

rendah dan daerah pantai. Perbedaan tersebut misalnya dari aspek sensitifitas reseptor tubuh dalam mendeteksi level oksigen dalam darah, perbedaan struktur pembuluh darah yang membawa darah miskin oksigen kembali ke paru-paru, dan perbedaan dari aspek jumlah serta fungsi eritrositnya.

1.6. Komponen Sistem Umpan Balik (*Feedback*)

Komponen-komponen sistem umpan balik terdiri atas stimulus, reseptor, pusat integrasi, efektor dan respon. Akan tetapi terdapat tiga komponen utama yaitu **reseptor, pusat integrasi dan efektor**.

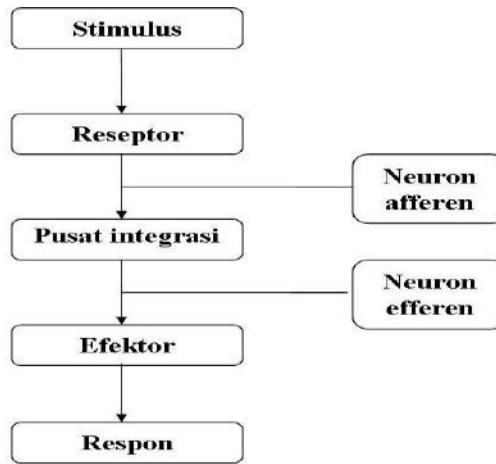
Reseptor bertanggung jawab dalam mendeteksi perubahan di lingkungan hewan, baik lingkungan internal maupun eksternal dimana hewan tersebut berada. Pada hewan, terdapat banyak sekali reseptor yang masing-masingnya akan memonitor bagian spesifik dari lingkungan. Fungsi reseptor adalah mengkonversi perubahan yang terdeteksi di lingkungan menjadi suatu potensial aksi yang dikirimkan melalui bagian aferen sistem saraf menuju ke pusat integrasi. Contoh reseptor adalah kulit, lidah, hidung, mata dan telinga (alat indera).

Pusat integrasi biasanya berupa otak atau medula oblongata. Peranan pusat integrasi adalah untuk mempertimbangkan informasi yang diterimanya sehubungan dengan variabel spesifik dan bagaimana variabel tersebut seharusnya. Contohnya, daerah hipotalamus di otak adalah pusat integrasi untuk mengontrol suhu tubuh pada mamalia. Berdasarkan informasi yang diterimanya dari termoreseptor, hipotalamus akan memutuskan respon apa yang harus dimulai untuk mengembalikan suhu tubuh ke kondisi normal. Respon tersebut kemudian dibawa melalui aksi efektor yang distimulasi melalui jalur neuron eferen (neuron motorik).

Pusat integrasi yang dapat berupa jaringan atau organ, harus memiliki suatu nilai awal (*set point*) dari suatu variabel yang dikontrolnya. *Set point* tersebut dikenal dengan titik seting dan merupakan nilai yang harus dijaga oleh sistem tubuh hewan agar tetap konstan. Dalam hal temperatur tubuh, bagi mamalia *set*

pointnya adalah 37°C. Namun, suhu tubuh sebenarnya dapat mengalami perubahan dalam batas toleransi $\pm 1^\circ\text{C}$. Untuk hewan lainnya, nilai tersebut akan bervariasi. Beberapa spesies burung akan menjaga suhu tubuhnya sekitar 42°C, sedangkan mamalia lainnya tidak dapat menjaga temperatur tubuh tetap konstan.

Efektor adalah istilah umum untuk struktur yang membawa respon biologis. Respon-respon tersebut dapat berupa aktivasi muskular, neural atau endokrin.

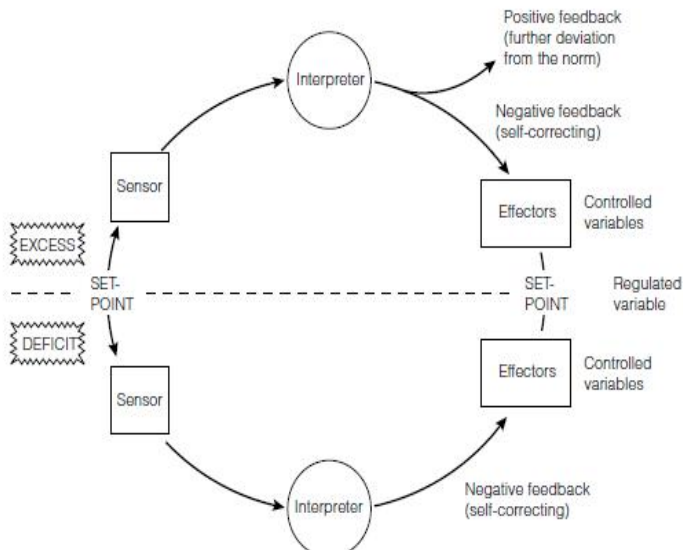


Gambar 1.3. Komponen dasar dari sistem umpan balik

Setiap variabel fisiologis memiliki kisaran tersendiri dan sangat bervariasi. Plasma darah memiliki pH antara 7,35-7,45 dan konsentrasi ion K^+ antara 3-5,5 mmol/l. Kisaran sebenarnya yang masih dapat ditolerir oleh sistem fisiologis sangat bervariasi antar variabel yang berbeda. Beberapa variabel cenderung lebih dikontrol daripada variabel lainnya. pH darah dan cairan tubuh lainnya adalah salah satu variabel yang dikontrol sangat ketat. Hal ini terkait dengan peranan pH dalam mempengaruhi keberlangsungan sistem tubuh terutama kerja enzim. Perubahan pada pH akan menyebabkan perubahan sangat signifikan dari status ionisasi ikatan pada enzim yang terlibat dalam interaksi ion yang pada akhirnya akan menyebabkan kerusakan pada struktur enzim. Jika

hal tersebut terjadi, maka akan menjadi sangat destruktif bagi hewan. Sementara oksigen adalah variabel fisiologis yang kurang dikontrol secara ketat dalam darah mamalia dimana level oksigen dapat turun 30-40% sebelum efek-efeknya muncul terhadap pernafasan.

Sistem kontrol homeostasis yang beragam akan bekerja sama secara kooperatif. Sebagai contoh, pada hewan yang hidup di gurun, pada siang hari mengalami stres suhu yang sangat ekstrim yang akan berakibat terjadinya peningkatan suhu tubuh secara drastis. Satu-satunya jalan untuk melawan perubahan tersebut adalah dengan meningkatkan evaporasi sehingga akan menurunkan suhu tubuh. Akan tetapi hal tersebut akan menimbulkan masalah baru karena akan terjadi kehilangan air secara berlebihan.



Gambar 1.4. Mekanisme umpan balik negatif dalam regulasi tubuh. *Set point* merupakan variabel regulasi (Jurd, 2004: 98).

BAB II

TRANSPORTASI ZAT MELINTASI MEMBRAN SEL

Untuk memahami fungsi tubuh hewan dengan baik perlu memiliki pemahaman yang baik pula mengenai struktur sel, jaringan, organ dan tubuh hewan. Pemahaman tentang struktur sangat penting mengingat bahwa fungsi tubuh hewan dapat terjadi pada tingkat organ, jaringan ataupun sel. Sel adalah bangunan bermembran yang merupakan unit terkecil penyusun tubuh hewan. Untuk berlangsungnya metabolisme sel, berbagai zat harus diangkut ke luar atau ke dalam sel melalui membran sel. Oleh sebab itu, pada bab ini lebih difokuskan kepada struktur dan fungsi membran sel dalam proses transpor zat dari pada organel lainnya.

Setelah mempelajari bab ini, anda diharapkan mampu menjelaskan tentang arti membran permiabel, dan proses transpor zat melalui membran baik secara aktif maupun pasif.

2.1. Membran Plasma

Bagian sel yang terbesar adalah sitoplasma atau cairan sel dan merupakan medium berupa cairan yang aktif yang membantu menjaga aktivitas kehidupannya. Sitoplasma berupa cairan bersifat koloid yang komposisi utamanya adalah air. Kira-kira 30 % dari total masa larutan ini mengandung berbagai macam substansi. Substansi-substansi ini, 60 % nya adalah protein, karbohidrat, lipid

dan substansi organik lainnya serta substansi anorganik. Sitoplasma diselubungi oleh membran yang disebut dengan **membran plasma**. Membran plasma ini dikenal juga dengan membran sitoplasma.

Membran plasma membantu pengaturan lalu lintas berbagai zat yang boleh masuk dan keluar sel. Dengan kata lain membran sel membantu mengatur keseimbangan lingkungan eksternal dan internal sel, suatu konsep yang mendasari homeostasis. Kemampuan mengatur ini berkaitan dengan permeabilitas membran sel, yaitu kemampuan membran sel untuk dilewati/ditembus zat-zat. Umumnya membran sel adalah semipermeabel atau permeabel selektif, yaitu permeabel terhadap air dan beberapa zat terlarut tetapi tidak permeabel terhadap zat-zat lain. Selektivitas inilah yang mengatur lalu lintas zat-zat. Disamping sebagai pentranspor material-material seluler, ion, air dan makromolekul, membran juga berfungsi dalam mekanisme sinyal transmembran dan interaksi antar sel.

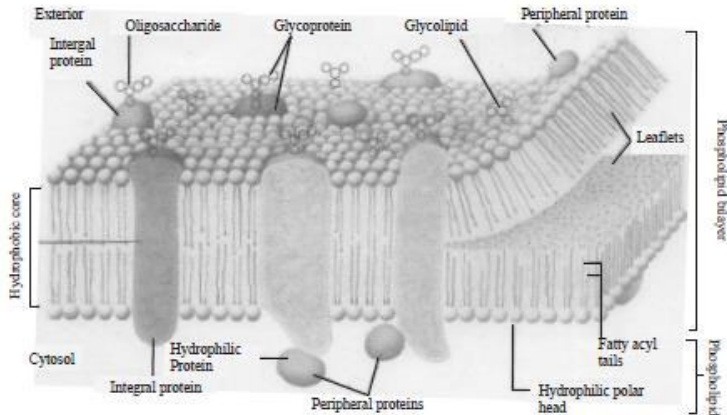
Membran terdiri atas lipid, protein, karbohidrat, dan air. Rasio protein dan lipid sangat besar. Sebagai contoh, membran dalam mitokondria memiliki 76% protein, sedangkan membran miyelin dari saraf hanya mengandung 18% protein. Perbedaan pada aspek rasio protein dan lipid tersebut penting bagi fungsi spesifik suatu organel yang diselimuti oleh membran.

Tabel 2.1. Variasi kandungan protein, lipid, dan karbohidrat pada beberapa membran.

Tipe membran	Komposisi Kimiawi (%)		
	Protein	Lipid	Karbohidrat
Miyelin	18	79	3
Eritrosit manusia	49	43	8
Membran dalam mitokondria	79	24	0
Plasma membran Amoeba	54	42	4

(Rastogi, 2007: 186).

peripheral yang terletak pada sisi intraseluler atau ekstraselular membran sel. Protein ini berperan sebagai reseptor hormon.



Gambar 2.2. Susunan membran dan lipid bilayer (Rastogi, 2007: 187)

C. Karbohidrat

Karbohidrat pada membran plasma dalam bentuk molekul yang berikatan kovalen dengan protein dan lipid. Ada dua tipe karbohidrat pada membran yaitu **glikoprotein** dan **glikolipid**. Karbohidrat yang umumnya berasosiasi dengan lipid adalah D-glukosa, D-galaktosa dan D-mannosa, yang merupakan oligosakarida. Selain gula sederhana tersebut juga ada turunan gula sederhana seperti N-asetil D-glusamin, dan N-asetil D-neuramin (asam sialic).

D. Koneksi intraseluler

Koneksi atau hubungan intraseluler dapat berupa (a) **tigh junction** (*occludens zonula*) merupakan penghubung antara sel (sering sel epitel), yang merupakan jalur masuk atau keluar untuk zat terlarut, dan tergantung pada ukuran dan karakteristik tigh junction. Contohnya pada tubulus distal ginjal, berbeda zat terlarut yang

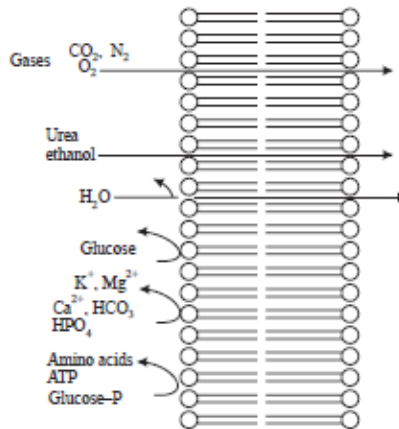
dilewatkannya dengan zat yang dilewatkan pada tubulus proksimal ginjal dan kandung empedu. (b). **Gap Junction** adalah penghubung antara sel-sel yang memungkinkan terjadinya komunikasi antar sel, misalnya, memungkinkan aliran arus dan kopling listrik antara sel miokardiak.

2.2. Fungsi Membran Dalam Transportasi Zat

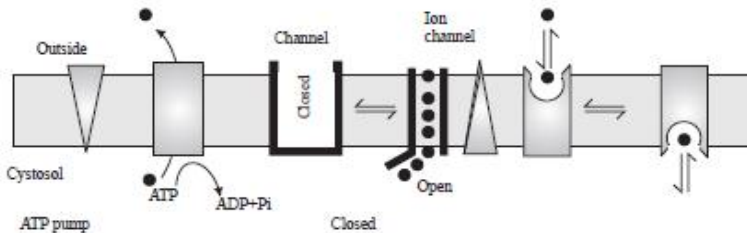
Membran plasma merupakan pemisah antara sitoplasma dengan cairan di luar sel, mengatur keluar masuknya ion-ion dan molekul-molekul dari dan ke dalam sel dan membantu membantu memelihara ketepatan konsentrasi zat-zat yang diperlukan agar fungsi sel berjalan secara optimal. Membran bersifat permieabel terhadap gas seperti CO₂ dan O₂ serta molekul-molekul kecil seperti etanol. Molekul-molekul tersebut dapat melewati membran tanpa bantuan protein pembawa. Selain itu energi juga tidak dibutuhkan karena pergerakannya menuruni gradien konsentrasi. Pada membran-membran yang impermeabel, hanya molekul air yang dapat lewat sedangkan molekul-molekul terlarut dalam air lainnya tidak dapat lewat seperti hidrogen, sodium, dan kalium. Protein pembawa atau protein transpor memegang peranan penting dalam transportasi molekul-molekul dan ion tersebut melewati seluruh membran seluler.

Beberapa protein yang berada di membran berfungsi sebagai canal ion untuk mentranspor ion-ion menuruni gradien konsentrasi. Struktur tersebut membentuk jalur lintas yang dilapisi oleh protein pada membran dimana ion bergerak secara simultan dalam satu lapisan dengan laju yang cepat (10⁸ molekul/detik). Sebagai contoh, membran plasma seluruh sel hewan kaya akan ion K⁺ dan pergerakan ion tersebut menuruni gradien melalui canal yang selalu terbuka akan menghasilkan potensial listrik melewati membran. Kebanyakan tipe canal protein lainnya biasanya tertutup dan hanya terbuka jika ada sinyal spesifik. Kelompok lainnya dari protein membran dikenal dengan transporter, yang menggerakkan berbagai macam ion dan molekul melewati membran. Transporter tersebut hanya mengikat satu atau beberapa molekul substrat pada waktu yang sama, yang akan diikuti dengan perubahan konformasi

untuk mentranspor molekul melewati membran. Perubahan konformasi protein membutuhkan energi untuk pergerakan, kendati gerakannya sangat lamban, skitar 102-104 molekul/detik.

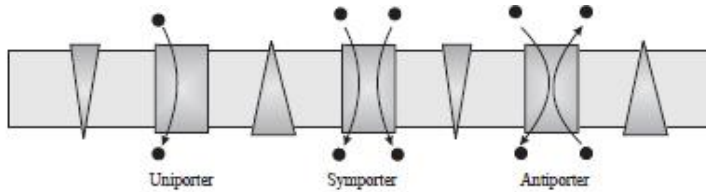


Gambar 2.3. Tipe-tipe utama dari protein transpor. Salah satu tipe berhubungan dengan hidrolisis ATP untuk melawan gradient konsentrasi, dua tipe lainnya tidak memerlukan ATPase untuk mentranspor ion-ion menuruni gradient konsentrasi (Rastogi, 1998: 192).



Gambar 2.4. Tipe protein transport. Pertama dimana ATP diperlukan untuk mentranspor molekul, kedua berupa canel tertutup yang akan membuka jika ada sinyal molekul spesifik, ketiga canel terbuka sepanjang waktu, keempat protein transporter yang membawa molekul melalui perubahan konformasi (Rastogi, 1998: 192).

Ada tiga tipe molekul transporter yaitu **uniporter**, **antiporter** dan **symporter**. Uniporter mentranspor satu molekul pada suatu waktu menuruni gradien konsentrasi. Antiporter dan symporter mengkatalisasi pergerakan satu tipe ion atau molekul melawan gradien konsentrasi, bersamaan dengan pergerakan ion atau molekul lainnya. Ini sering dianggap transpor aktif tetapi tanpa adanya hidrolisis ATP.



Gambar 2.5. Tiga tipe molekul transporter protein yaitu uniporter, simporter, dan antiporter berdasarkan arah pergerakan molekul (Rastogi, 1998: 193).

2.3. Mekanisme Transpor Zat Melintasi Membran

Secara umum, mekanisme transpor zat pada membran dibagi berdasarkan ukuran molekul yang diangkut yaitu molekul besar dan molekul kecil. Molekul besar diangkut dengan mekanisme spesifik yaitu **endositosis**, **eksositosis**, dan **pinositosis**. Sedangkan molekul kecil diangkut dengan dua cara berbeda yaitu **transpor pasif** dan **transpor aktif**. Transpor pasif dapat berupa difusi sederhana dan difusi difasilitasi. Transpor aktif terdiri atas pompa ion dan kotranspor.

A. Transpor Pasif

Transpor pasif merupakan proses perpindahan molekul antar dua sistem yang digerakkan oleh perbedaan gradien konsentrasi. Perbedaan paling mendasar antara transpor pasif dan transpor aktif adalah tidak dibutuhkannya ATP pada transpor pasif.

(1). Difusi Sederhana

Difusi sederhana adalah satu-satunya transportasi zat yang menuruni gradien konsentrasi dan tidak dimediasi oleh protein transpor. Difusi sederhana juga diartikan sebagai proses pergerakan ion atau molekul dari tempat yang berkonsentrasi tinggi menuju tempat yang berkonsentrasi rendah. Difusi ini tidak memerlukan energi dalam prosesnya.

Dalam sistem biologis, difusi sederhana dapat berlangsung pada proses pergerakan oksigen melintasi sel-sel di alveolus dan masuk ke dalam kapiler paru-paru dan perpindahan gas karbondioksida melintasi membran sel dari kapiler darah menuju paru-paru. Contoh lainnya adalah hormon-hormon steroid. Ketiga zat tersebut dapat dengan mudah melintasi membran karena sifatnya yang mudah larut dalam lemak. Difusi sederhana berlangsung berdasarkan azas perbedaan konsentrasi antara dua sistem yang dipisahkan oleh membran.

Sedangkan zat-zat yang tidak bisa larut dalam lemak, tetapi larut dalam air misalnya ion-ion masuk melalui pori-pori membran yang diyakini dibentuk oleh protein khusus yang disebut *aquaporin*. Beberapa pori membran tetap terbuka sehingga memungkinkan lalu lintas molekul-molekul kecil dan ion-ion tertentu secara bebas dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah.

Difusi bisa diukur menggunakan rumus :

$$J = -PA (C_1 - C_2),$$

dimana

J = flux (aliran) [mmol/dtk]

P = permeability (cm/dtk)

A = area (cm²)

C₁ = konsentrasi (mmol/L)

C₂ = konsentrasi (mmol/L)

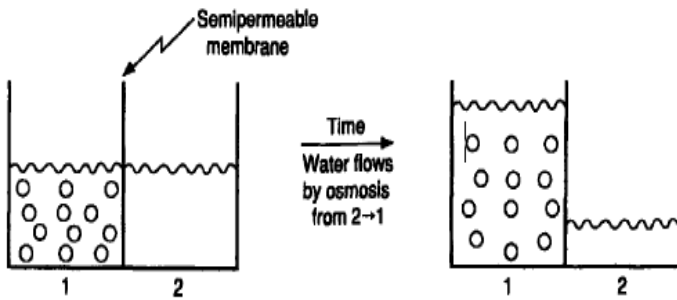
Contoh soal: Konsentrasi urea darah adalah 10 mg/100 ml. Konsentrasi urea dari cairan tubulus proksimal adalah 20 mg/100 ml. Jika permeabilitas untuk urea adalah 1×10^{-5} cm / detik dan luas permukaan 100 cm², tentukan besar dan arah aliran urea?

$$\begin{aligned}
 \text{Flux} &= \left(\frac{1 \times 10^{-5} \text{ cm}}{\text{sec}} \right) (100 \text{ cm}^2) \left(\frac{20 \text{ mg}}{100 \text{ ml}} \right) - \left(\frac{10 \text{ mg}}{100 \text{ ml}} \right) \\
 &= \left(\frac{1 \times 10^{-5} \text{ cm}}{\text{sec}} \right) (100 \text{ cm}^2) \left(\frac{10 \text{ mg}}{100 \text{ ml}} \right) \\
 &= \left(\frac{1 \times 10^{-5} \text{ cm}}{\text{sec}} \right) (100 \text{ cm}^2) \left(\frac{0.1 \text{ mg}}{\text{cm}^3} \right) \\
 &= 1 \times 10^{-4} \text{ mg/dtk dari lumen tubulus ke dalam darah} \\
 &\quad \text{(konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah)}
 \end{aligned}$$

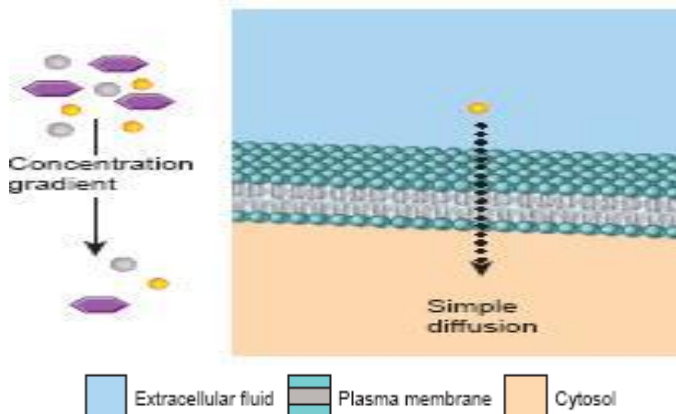
Catatan: Tanda minus pada rumus menunjukkan bahwa arah fluks atau aliran, adalah dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah. - Juga perhatikan: 1 ml = 1 cm³.

Pada berbagai sistem, sering kali terdapat membran semi permeabel atau selektif permeabel. **Selektif permeabel** artinya membran plasma “memilih atau menyaring” zat-zat apa yang boleh masuk dan keluar sel. Disamping itu membran plasma juga mengatur kecepatan zat-zat yang melintasi membran.

Membran plasma menjadi pemisah antara dua sistem yang memiliki gradien konsentrasi. Perbedaan konsentrasi akan memicu terjadinya pergerakan molekul dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah, akan tetapi karena ukuran molekul yang terlarut tersebut relatif besar sehingga tidak dapat menembus membran, maka proses difusi sederhana tidak dapat terjadi. Sistem akan tetap berkecenderungan untuk mencapai kesetimbangan dengan terjadinya osmosis atau dikenal sebagai **difusi air**. Molekul air mampu menembus membran yang selektif permeabel sehingga air akan bergerak menembus membran dari sistem dengan konsentrasi molekul terlarut rendah menuju ke sistem yang memiliki konsentrasi molekul terlarut lebih tinggi (lebih pekat).



Gambar 2.6. Proses osmosis (difusi air) dari dua sistem yang berbeda konsentrasi zat terlarutnya. Dalam proses ini, molekul air lah yang melakukan pergerakan melintasi membran menuju sistem yang berkonsentrasi lebih tinggi untuk mencapai suatu kesetimbangan.

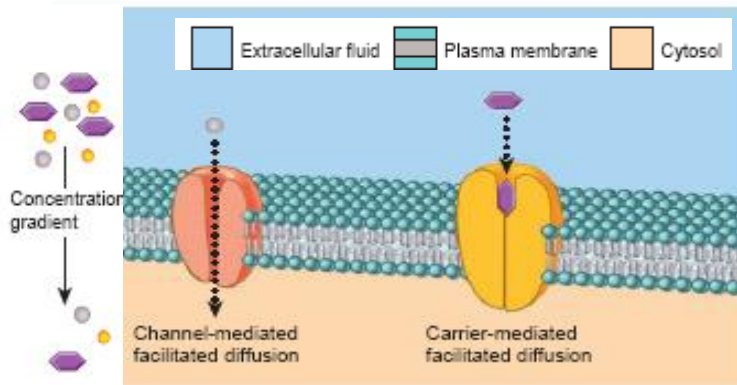


Gambar 2.7. Proses difusi sederhana dari dua sistem yang berbeda konsentrasi zat terlarutnya. Dalam proses ini, molekul terlarut melakukan pergerakan melintasi membran menuju sistem yang berkonsentrasi lebih rendah untuk mencapai suatu kesetimbangan (Champbell dkk, 2008: 133).

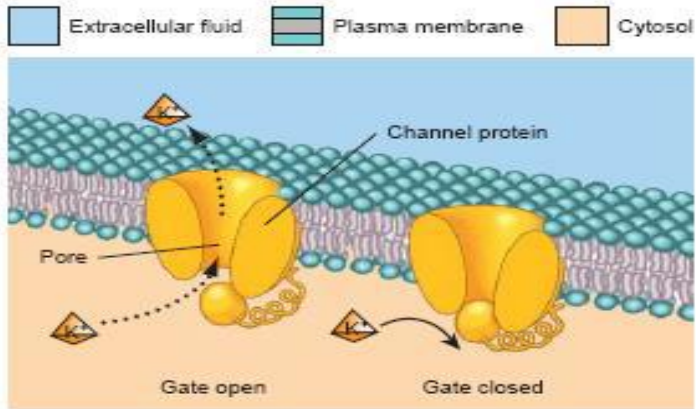
(2). Difusi Difasilitasi

Pada difusi difasilitasi, dalam prosesnya memerlukan molekul lain sebagai pembawa atau pembantu yang memfasilitasi perpindahannya. Laju perpindahan molekul melalui mekanisme ini sangat tergantung kepada jumlah fasilitator yang ada yang akan mengangkutnya. Jika unit pembawa atau fasilitator telah habis, maka proses difusi ini akan berhenti meskipun ada perbedaan konsentrasi yang signifikan. Akan tetapi, laju difusi melalui proses ini cenderung lebih tinggi dari pada difusi sederhana.

Dalam prosesnya, terdapat dua macam fasilitator difusi yaitu canal protein dan permease. **Canal protein** terdiri atas canal ion dan canal bergerbang (*gated channel*). Canal ion dapat berupa peptida sederhana atau molekul protein yang kecil. Bagian permukaan luar canal bersifat hidrofilik sedangkan di dalam hidrofobik. Sedangkan canal bergerbang memiliki mekanisme kerja yang lebih kompleks dari pada canal ion. Proses ini dianalogikan dengan sistem menutup dan membukanya gerbang, jika ada stimulus listrik atau kimiawi maka gerbang akan membuka sehingga molekul dapat berpindah melalui canal tersebut. Contoh molekul yang bisa dilewatkan adalah D-glukosa.



Gambar 2.8. Difusi difasilitasi dengan menggunakan canal protein protein transpor (Champbell dkk, 2008: 135).



Gambar 2.9. Difusi difasilitasi dengan menggunakan canal bergerbang (Chambell dkk, 2008: 135).

Fasilitator kedua yaitu **permease**, memiliki mekanisme yang lebih kompleks dari pada canal protein. Proses ini dapat ditemukan pada proses difusi glukosa ke dalam eritrosit yang melibatkan permease glukosa. Ada mekanisme khusus dimana terjadi perubahan struktur suatu molekul yang akan ditransportasikan dari luar ke dalam sel. Perubahan konformasi dari molekul tersebut terjadi pada satu sisi yang bertujuan untuk menciptakan gradien konsentrasi antar dua sistem. Misalnya pada eritrosit, molekul glukosa di dalam sitoplasma akan mengalami fosforilasi menjadi glukosa fosfat sehingga seolah-olah konsentrasi glukosa di sitoplasma menjadi lebih rendah dari pada di luar sel. Dengan demikian akan tercipta gradien konsentrasi sehingga glukosa di luar sel akan berdifusi ke dalam sel.

B. Transpor Aktif

Mekanisme transpor aktif pada dasarnya mirip dengan difusi difasilitasi, hanya saja pada transpor aktif zat diangkut dari gradien konsentrasi rendah ke konsentrasi tinggi dengan menggunakan energi. Transpor aktif yang sederhana (melewatkan satu macam zat saja), dapat digambarkan bahwa pada protein transpor terdapat dua

tempat perlekatan (*binding site*). Sisi perlekatan pertama untuk zat yang akan diangkut melintasi membran dan sisi perlekatan kedua untuk tempat perlekatan ATP. Dengan adanya energi yang dibebaskan akibat pemecahan molekul ATP menyebabkan molekul protein berubah bentuk dan melakukan perputaran sehingga molekul atau zat yang melekat padanya dapat diangkut melintasi membran (dapat menindahkan zat keluar atau ke dalam sel). Model transpor aktif yang lain dapat digambarkan dengan perubahan molekul protein dalam bentuk membuka dan menutupnya celah protein. Kebanyakan transpor aktif mengangkut dua macam zat melintasi membran pada saat yang sama pada arah yang berlawanan.

Transpor aktif merupakan proses pemompaan molekul atau ion melalui membran melawan gradien konsentrasi. Proses ini membutuhkan protein transmembran (biasanya suatu kompleks protein) yang disebut **protein transpor** atau **transporter** dan membutuhkan ATP. ATP ada yang digunakan secara langsung atau tidak langsung. Pada proses transpor aktif langsung (*direct active transport*), beberapa transporter berikatan dengan ATP secara langsung dan menggunakan energi tersebut untuk melaksanakan transport aktif. Sedangkan pada transpor aktif tidak langsung (*indirect active transport*), unit transporter menggunakan energi yang sudah disimpan dalam suatu gradien ion yang dipompa secara langsung.

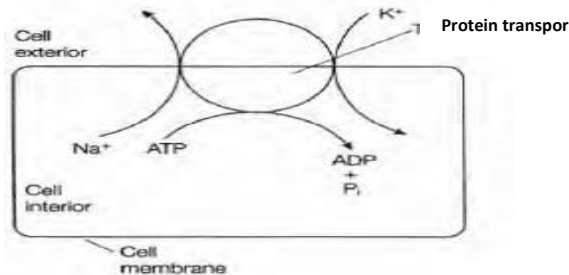
Transpor aktif langsung dari ion akan menciptakan gradien konsentrasi. Transpor aktif langsung terdiri atas (a) Na^+/K^+ ATPase, (b). H^+/K^+ ATPase, (c). Ca^{2+} ATPase, dan (c). pompa ABC. Sedangkan proses **transpor aktif tidak langsung** terdiri atas dua tipe pompa yaitu pompa searah (*symport pump*), dan pompa berlawanan arah (*antiport pump*). Mekanisme-mekanisme dari berbagai proses transpor aktif tersebut melibatkan influs dan eflus ion.

(1). Tranposr aktif langsung

(a). Pompa Na^+/K^+ ATPase

Sitosol sel-sel hewan mengandung ion K^+ 20 kali lebih tinggi dari pada cairan ekstraseluler. Sedangkan ion Na^+ di luar sel 10 kali lebih tinggi dari pada di dalam sel. Gradien konsentrasi ion tersebut tercipta karena adanya transpor aktif dari kedua macami on dan transporter yang disebut Na^+/K^+ ATPase. Energi yang digunakan berasal dari hidrolisis ATP. Energi dibutuhkan untuk mentranspor 3 ion Na^+ secara aktif keluar sel dan 2 ion K^+ dipompa ke dalam sel melawan gradien konsentrasi.

Mekanisme ini memiliki fungsi vital secara fisiologis dalam membantu terbentuknya perbedaan muatan listrik pada membran sel (dimana di sebelah dalam lebih negatif sedangkan di sebelah luar lebih positif), yang disebut dengan *resting potential membrane* yang esensial bagi kerja otot dan sel saraf. Akumulasi ion Na^+ di luar sel akan menarik air ke luar sel dan memungkinkan adanya mekanisme pemeliharaan keseimbangan osmotik sel. Gradien konsentrasi ion Na^+ juga dibutuhkan untuk menyediakan energi yang diperlukan untuk melangsungkan berbagai transpor aktif tak langsung. Hampir sepertiga energi total yang dihasilkan oleh mitokondria dalam sel-sel hewan digunakan hanya untuk melangsungkan proses pompa Na^+/K^+ ATPase ini .



Gambar 2.10. Mekanisme pompa Na^+/K^+ yang melibatkan ATPase dan molekul ATP sebagai sumber energi.

(b). Pompa H^+/K^+ ATPase

Proses ini dapat ditemukan pada mekanisme sekresi cairan lambung dalam sel-sel parietal lambung. Sel-sel parietal lambung mentranspor proton (H^+) dari dalam sel dengan konsentrasi H^+ sekitar 4×10^{-8} M menuju sisi luar sel dengan konsentrasi H^+ 0,15 M dalam cairan lambung (*gastric juice*) sehingga pHnya mendekati 1. Sel-sel parietal lambung memiliki mitokondira dan memanfaatkan sejumlah besar energi untuk memompa proton tersebut melawan gradien konsentrasi yang sangat ekstrim.

(c). Pompa Ca^{++} ATPase

Ion Ca^{++} berada di dalam membran plasma seluruh sel eukariot. Proses ini dapat ditemukan pada aktivitas kontraksi dan relaksasi otot yang sangat memerlukan mobilisasi ion Ca^{++} . Dibutuhkan energi dari satu molekul ATP untuk memompa satu ion Ca^{++} keluar sel. Aktivitas pompa tersebut membantu dalam menjaga gradien konsentrasi Ca^{++} sampai 20.000 kali antara sitosol dengan cairan ekstraseluler.

(d). Pompa ABC (ATP-Binding Cassette)

Transporter ABC adalah protein transmembran yang terekspos dengan suatu daerah yang berikatan dengan ligan khusus di salah satu sisi permukaan dan berikatan dengan ATP di sisi yang lain. Daerah yang berikatan dengan ligan biasanya berupa molekul tipe tunggal. Ikatan ATP di sisi lainnya diperlukan untuk menyediakan energi untuk memompa ligan melintasi membran. Transporter ABC diduga terlibat dalam sejarah awal kehidupan. Buktinya, domain yang terikat dengan ATP pada archeabacteria, eubacteria dan eukariot semuanya memiliki homologi struktural yang disebut kaset terikat ATP.

(2). Transpor aktif tak langsung

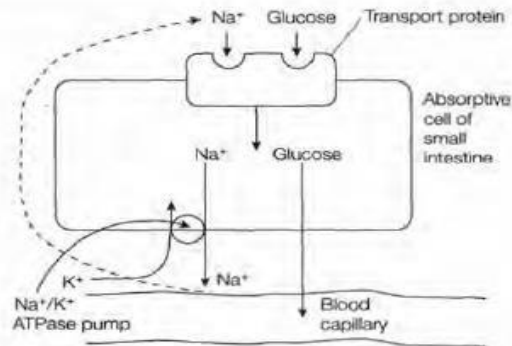
Mekanisme transpor aktif tak langsung/sekunder menggunakan aliran menuruni gradient konsentrasi dari suatu ion untuk memompa molekul atau ion lainnya melawan gradient konsentrasi.

Ion penggeraknya biasanya adalah Na^+ yang gradien konsentrasinya diciptakan oleh pompa Na^+/K^+ ATPase.

(a). Pompa Simport/kotransport

Pada proses transpor aktif tak langsung tipe simport ini, ion penggerak (Na^+) dan molekul yang dipompakan melalui membran dipompa dengan arah yang sama. Proses ini dapat ditemukan pada **transporter Na^+ /glukosa** dimana protein transmembran tersebut memungkinkan ion Na^+ dan glukosa untuk masuk bersama-sama. Ion Na^+ mengalir menuruni gradien konsentrasi sedangkan molekul glukosa dipompakan melawan gradien. Selanjutnya, ion Na^+ akan dipompakan kembali keluar sel oleh pompa Na^+/K^+ ATPase.

Transporter Na^+ /glukosa juga digunakan untuk mentranspor secara aktif glukosa keluar intestinum dan juga keluar dari tubulus ginjal dan kembali ke dalam darah. Semua asam amino dapat ditranspor secara aktif dengan mekanisme pompa simport yang digerakkan oleh ion Na^+ ini. Transporter lainnya adalah **Na^+ /iodida transporter** yang dapat ditemukan pada mekanisme pompa simport ion-ion iodida ke dalam sel-sel kelenjar tiroid dan sel-sel kelenjar mammae.



Gambar 2.11. Mekanisme simport (kotransport) Na^+ /glukosa transporter pada epitel usus. Simport membawa dua substansi sekaligus tapi satu arah. Glukosa di meninggalkan sel epitel menuju pembuluh darah dengan difusi difasilitasi (Key, 1998: 144).

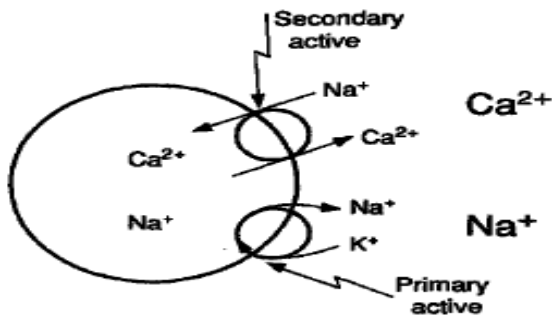
(b). Pompa Antiport

Pada pompa antiport, ion penggeraknya juga berupa Na^+ yang berdifusi melalui sistem pompa. Pada salah satu sisi akan menyediakan energi untuk transpor aktif dan molekul atau ion lainnya pada arah yang berlawanan. Misalnya ion Ca^{++} dipompakan keluar sel oleh pompa antiport yang digerakkan oleh ion Na^+ .

Tabel 2.2. Perbedaan masing-masing transpor zat melewati membran.

Tipe transpor	Gradien elektrokimia	Protein Transpor	Kebutuhan Energi	Gradien Na^+	Penghambatan oleh Pompa Na^+/K^+
Difusi sederhana	Konsentrasi tinggi ke rendah	Tidak	Tidak	Tidak	-
Difusi difasilitasi	Konsentrasi tinggi ke rendah	Ia	tidak	Tidak	-
Transpor aktif langsung	Konsentrasi rendah ke tinggi	Ia	Ia	-	Dihambat oleh pompa Na^+/K^+
Transpor aktif tidak langsung (kotransport)	Konsentrasi rendah ke tinggi*	Ia	Tidak langsung	Ia, beberapa searah	Dihambat
Transpor aktif tidak langsung (antiport)	Konsentrasi rendah ke tinggi *	Ia	Tidak langsung	Ia, berlawanan arah	Dihambat

* Satu atau lebih zat terlarut ditransportasikan dari konsentrasi rendah ke konsentrasi tinggi; Na^+ ditransportasikan dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah



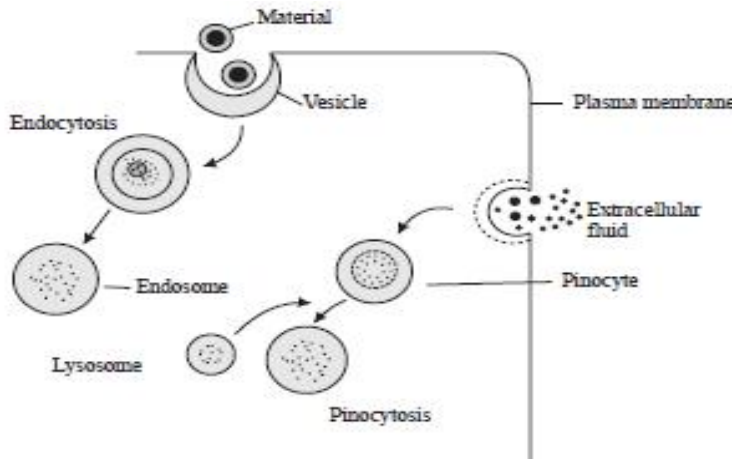
Gambar 2.12. Mekanisme transpor aktif tidak langsung antiport. Antiport membawa dua substansi berlawanan sekaligus (Na^+ memasuki sel dan Ca^{2+} ke luar sel) (Key, 1998: 145).

C. Transpor Molekul Besar (*Bulk Transport*)

Sel juga mengembangkan mekanisme spesifik untuk mentransfer molekul besar seperti protein, polisakarida, polinukleotida dan sebagainya melewati membran. Proses ini dikenal dengan endositosis. Pada mekanisme lainnya, misalnya sekresi hormon dan protein-protein tertentu keluar sel dilakukan dengan eksositosis. Kedua proses transportasi ini melibatkan pembentukan vesikel-vesikel.

(a). Endositosis

Endositosis adalah proses yang secara esensial sangat tergantung kepada energi dan dapat ditemukan pada hampir semua tipe sel eukariot. Makromolekul di luar sel akan ditelan dan ditransportasikan ke dalam sel yang kemudian akan diselubungi secara progresif oleh sebagian kecil membran plasma. Tipe-tipe endositosis adalah **fagositosis** (menelan makromolekul padat), **pinositosis** (menelan cairan) dan **endositosis yang dimediasi oleh reseptor** (receptor-mediated endocytosis) yang melibatkan reseptor spesifik pada sel.

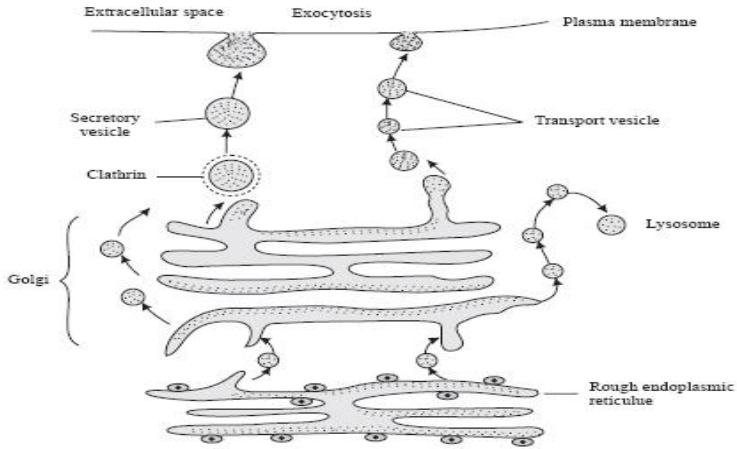


Gambar 2.13. Mekanisme endositosis tipe fagositosis dan pinositosis (Rastogi, 2007: 200).

(b). Eksositosis

Proses eksositosis adalah kebalikan dari endositosis dimana vesikel yang terikat membran bergerak ke permukaan sel dan akan berfusi dengan membran plasma. Vesikel-vesikel eksositosis dibentuk dengan berbagai cara. Beberapa vesikel adalah endosom di dalam sel, sedangkan yang lainnya adalah bagian yang terbentuk dari endosom sebelum berfusi dengan lisosom. Sebagian vesikel lainnya mungkin dibentuk dari retikulum endoplasma dan badan golgi yang akan membawa produk-produknya ke permukaan sel.

Eksositosis berperan penting dalam mengembalikan jumlah normal membran plasma, dan untuk mempertahankan karakteristik membran sebagai permukaan sel yang terdiri atas protein-protein. Proses eksositosis juga membantu dalam mensekresikan berbagai komponen matriks ekstraseluler. Eksositosis lisosom akan mensuplai membran dengan material yang banyak diperlukan untuk memperbaiki ikatan struktural pada membran tersebut.



Gambar 2.14. Mekanisme eksositosis yang ditemukan pada badan golgi dan reticulum endoplasma sel (Rastogi, 2007: 201).

BAB III

NUTRISI DAN SISTEM PENCERNAAN

Hewan merupakan organisme heterotrof yang bergantung kepada suplai makanan secara reguler dari organisme lain, baik tumbuhan atau hewan lainnya. Hewan memperoleh energi dalam jumlah yang cukup dari makanan yang dimakan. Akan tetapi seing makanan yang dimakan masih dalam ukuran yang besar dan sangat kompleks sehingga energi yang ada didalamnya tidak dapat langsung digunakan. Hewan harus mencerna makanan tersebut terlebih dahulu agar dapat memanfaatkan energi yang dikandung di dalamnya.

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan anda mampu menjelaskan macam-macam dan fungsi zat makanan yang diperlukan tubuh, menjelaskan mekanisme mendapatkan makanan pada hewan, menjelaskan struktur dan sistem pencernaan hewan invertebrata, vertebrata, dan ruminansia. Anda juga diharapkan mampu menjelaskan mekanisme pencernaan makanan, mulai dari mulut sampai usus halus (sampai makanan siap diserap oleh usus).

3.1. Nutrisi

Dalam arti yang sempit, **nutrisi** atau zat-zat makanan diartikan sebagai substansi makanan yang dibutuhkan oleh suatu organisme. Dalam arti yang luas, nutrisi merupakan rangkaian proses dimana suatu organisme memasukkan makanan ke dalam tubuhnya,

dicerna, kemudian makanan tersebut diubah menjadi sel, jaringan baru dan energi yang sangat penting bagi berbagai macam aktivitas tubuh. Proses tersebut meliputi : (1) cara memasukkan makanan; (2) pencernaan makanan dan (3) asimilasi makanan.

Nutrisi berfungsi untuk: (1) menyediakan bahan yang penting untuk pembentukan protoplasma yang rusak; (2) menyediakan energi yang sangat penting untuk berbagai macam aktivitas tubuh seperti kontraksi otot, sekresi kelenjar, sintesis berbagai macam substansi, absorpsi makanan di saluran pencernaan, reabsorpsi di tubuli ginjal, pertumbuhan dan reproduksi; (3) menyediakan substansi esensial untuk pengaturan fungsi sel, alat tubuh atau tubuh secara keseluruhan.

A. Macam-Macam Nutrisi

Nutrisi yang dibutuhkan hewan agar tetap hidup bermacam-macam. Nutrisi tersebut adalah **protein dan asam amino, karbohidrat, lemak dan lipid, mineral/garam-garam anorganik, vitamin dan air**.

(1) Protein dan Asam Amino

Protein berfungsi sebagai komponen struktural jaringan, sebagai enzim-enzim, dan sebagai sumber energi, apabila dirubah dulu menjadi glukosa melalui glukoneogenesis. Protein jaringan hewan tersusun atas 20 macam asam amino.

Kemampuan hewan dalam mensintesis protein berbeda-beda, tergantung jenis hewan. Asam amino yang tidak dapat disintesis sendiri oleh hewan tetapi diperlukan untuk sintesis protein esensial dinamakan **asam amino esensial** untuk hewan yang bersangkutan. Pada manusia contohnya adalah histidin, yang sangat esensial bagi bayi. Sedangkan asam amino yang dapat disintesis sendiri oleh hewan dinamakan **asam amino nonesensial**. Protein dan asam amino dapat ditemukan pada hewan dan tumbuhan. Protein yang ditemukan pada hewan dikenal dengan protein hewani dan protein yang ditemukan pada tumbuhan dikenal

dengan protein nabati. Sumber utama protein dan asam amino adalah daging, telur, keju, jagung, dan kacang-kacangan.

(2). Karbohidrat

Karbohidrat digunakan terutama sebagai sumber energi kimia utama dan sebagai zat metabolik antara. Sumber utama karbohidrat yaitu nasi, kentang, ketela dan umbi-umbian lainnya serta glikogen yang tersimpan di dalam jaringan hewan.

(3). Lemak dan Lipid

Molekul-molekul lemak dan lipid merupakan sumber energi kimia kedua setelah karbohidrat. Molekul-molekul lemak dan lipid meliputi asam-asam lemak, monogliserida, trigliserida, steroid dan fosfolipid. Untuk setiap gram, lemak menyediakan energi dua kali lipat energi kalor dibandingkan dengan energi setiap gram karbohidrat atau protein. Lemak pada umumnya disimpan oleh hewan sebagai cadangan energi pada saat defisit kalori, yaitu pada saat pengeluaran energi melebihi pemasukan energi. Lemak dan lipid penting dalam komponen jaringan khusus seperti membran plasma, membran organel dan selubung mielin akson.

Lemak dapat ditemukan pada hewan dan tumbuhan. Sumber utama lemak dan lipid adalah daging, susu, mentega, kuning telur, minyak kelapa sawit, minyak kelapa dan kacang tanah.

(4). Mineral

Mineral, merupakan senyawa anorganik yang tidak menyediakan energi, namun memiliki peranan yang sangat penting bagi tubuh. Mineral terbagi menjadi dua kelompok yaitu mineral makro, yang dibutuhkan tubuh dalam jumlah besar dan mineral mikro, yang dibutuhkan tubuh dalam jumlah sedikit. Yang termasuk mineral makro adalah seperti: natrium, kalium, fosfor, magnesium, klor dan belerang. Sedangkan mineral mikro seperti mangan, kromium, kobalt, tembaga dan seng. Sumber utama mineral adalah produk susu, daging, sayuran hijau gelap, polong-polongan, biji-bijian dan buah-buahan.

Beberapa mineral seperti klor, sulfat, fosfat dan garam-garam karbonat dari kalsium, kalium, natrium, dan magnesium merupakan isi penting dari cairan intraseluler dan ekstraseluler. Kalsium fosfat berperan dalam mengeraskan tulang vertebrata dan cangkang Mollusca. Besi, tembaga dan logam lainnya diperlukan untuk reaksi redoks dan untuk pengangkutan dan pengikatan oksigen. Enzim-enzim juga memerlukan beberapa logam untuk fungsi katalitiknya. Jaringan hewan juga memerlukan banyak ion-ion seperti Ca, P, K, Na, Mg dan Cl dan sedikit ion-ion Mn, Fe, S, Co, Cu, Zn dan S.

Tabel 3.1. Senyawa mineral esensial dan fungsi fisiologisnya bagi hewan

Mineral	Sumber	Fungsi fisiologi
<i>Makronutrien</i>		
Kalsium (Ca)	Sayur-sayuran, legum, susu	Pembentukan tulang dan gigi, pembekuan darah, fungsi saraf dan otot
Fosfor (P)	Daging, biji-bijian, susu	Pembentukan tulang dan gigi, keseimbangan asam-basa, sintesis nukleotida
Sulfur (S)	Protein dari bahan makanan)	Komponen asam amino
Potasium (K)	Sayur-sayuran, biji-bijian dan buah, susu	Keseimbangan asam-basa, keseimbangan air, fungsi saraf
Klorin (Cl)	Garam-garam	Keseimbangan asam-basa, keseimbangan air, fungsi saraf
Sodium (Na)	Garam-garam	Keseimbangan asam-basa, keseimbangan air, fungsi saraf

<i>Mikronutrien</i>		
Besi (Fe)	Daging, telur, legum, sayur hijau	Komponen Hb, metabolisme
Magnesium (Mg)	Biji-bijian, sayur hijau	Komponen utama enzim, kerja saraf
Fluorin (F)	Air minum, teh, makanan dari laut	Pemeliharaan struktur gigi dan tulang
Seng (Zn)	Daging, makanan dari laut, biji-bijian	Komponen utama enzim pencernaan dan protein
Tembaga (Cu)	Makanan dari laut, kacang, daging	Komponen enzim dalam metabolisme besi
Mangan (Mn)	Makanan dari laut, kacang, daging	Komponen utama enzim
Iodin (I)	Garam beriodium, makanan dari laut, susu	Komponen hormon tiroid
Kobalt (Co)	Daging dan susu	Komponen vitamin B-12
Selenium (Se)	Makanan laut, daging, biji-bijian	Komponen enzim, terlibat dalam aktivitas fisiologis vitamin E
Molibdenum (Mo)	Legum, beberapa sayuran dan biji-bijian	Komponen enzim
Kromium (Cr)	Makanan hepar, daging, makan laut, Beberapa jenis Sayur	Terlibat dalam metabolisme glukosa dan energi

(5). Vitamin

Vitamin merupakan senyawa organik yang dibutuhkan tubuh dalam jumlah yang kecil. Walaupun kecil, namun sangat bermanfaat bagi kestabilan tubuh. Vitamin ada yang bisa larut dalam air, seperti vitamin B dan C dan vitamin yang hanya bisa larut dalam lemak seperti vitamin A, D, E dan K. Vitamin yang larut di dalam lemak dapat disimpan dalam tumpukan lemak tubuh, tetapi yang larut di dalam air tidak dapat disimpan oleh tubuh dan akan dikeluarkan bersama urin.

Vitamin-vitamin yang larut dalam air dapat dikendalikan sedemikian rupa konsentrasinya dalam tubuh sehingga jika kelebihan akan segera dinetralisir melalui mekanisme ekskresi di ginjal. Vitamin yang larut dalam air tidak bersifat toksik jika dikonsumsi berlebihan. Sedangkan vitamin-vitamin yang larut dalam lemak sukar untuk diatur kadarnya jika terlalu berlebihan (overdosis) karena tidak dapat dikurangi melalui mekanisme sekresi di ginjal secara cepat. Terkadang akan menumpuk di dalam jaringan lemak sehingga dapat bersifat toksik.

Fungsi vitamin adalah sebagai koenzim dalam metabolisme tubuh (metabolisme karbohidrat, lemak, protein), digunakan dalam sintesis kolagen (untuk tulang sejati, tulang rawan dan gusi), sebagai antioksidan, membantu dalam detoksifikasi, memperbaiki penyerapan besi, kalsium, fosfor, dan dalam penggumpalan darah.

Defisiensi beberapa vitamin ditandai dengan gejala-gejala tertentu. Defisiensi vitamin B2 (riboflavin) ditandai dengan gejala pelukaan pada kulit. Defisiensi vitamin B6 (piridoksin) ditandai dengan kekejangan otot, anemia, kaki kehilangan rasa, koordinasi kurang baik. Defisiensi vitamin A akan menyebabkan permasalahan penglihatan, kulit kering dan bersisik.

Kemampuan hewan dalam mensintesis vitamin berbeda-beda. Vitamin-vitamin esensial yang tidak dapat diproduksi sendiri oleh hewan harus diperoleh dari makanan atau dari sumber-sumber lainnya seperti mikroba. Contohnya vitamin C (asam askorbat) yang disintesis oleh banyak hewan, kecuali manusia. Vitamin K dan B12 diproduksi oleh mikroba usus yang ada di dalam usus

manusia. Sumber utama vitamin adalah produk susu, daging, biji-bijian, sayur-sayuran, telur, buah-buahan, kacang-kacangan.

Tabel 3.2. Berbagai vitamin dan fungsinya dalam aktivitas fisiologis tubuh

Vitamin	Sumber	Fungsi fisiologi
<i>Larut dalam lemak</i>		
A (aseroftol)	Sayur dan buah-bauahan	Komponen pigmen penglihatan, penjaga struktur epitel
D (kalsiferol/ergosterol)	Susu, kuning telur	Membantu absorpsi kalsium dan fosfor, memacu pertumbuhan tulang
E (tokoferol)	Minyak sayur, kacang dan biji-bijian	Antioksidan, pencegah kerusakan membran sel dan molekul lainnya
K (filoquinon)	Sayur-sayuran, teh,	Penting dalam proses pembekuan disintesis dalam tubuh oleh mikroba darah
<i>Larut dalam air</i>		
B-1 (thiamin)	Legum, biji-bijian, daging	Koenzim yang penting dalam pelepasan CO ₂ dari ikatan organik
B-2 (riboflavin)	Daging, susu, sayur, biji-bijian	Komponen koenzim FAD
Niacin/as. Nikotin	Biji-bijian, daging	Komponen koenzim NAD ⁺ dan NADP ⁺
B-6 (Piridoksin)	Daging, sayuran, biji-bijian	Koenzim dalam metabolisme asam amino
Asam pantotenat	Daging, susu, biji-	Komponen asetil koenzim A

	bijian	
As. folat (folasin)	Daging, sayuran	Koenzim dalam metabolisme asam nukleat dan asam amino, pembentukan bumbung neural saat perkembangan embrio
B-12	Daging, telur, susu	Koenzim dalam metabolisme asam nukleat dan pematangan eritrosit
Biotin	Legum, sayuran, daging	Koenzim dalam sintesis lemak, glikogen, dan asam amino
C (as. askorbat)	Sayuran dan buah	Penting dalam sintesis kolagen (tulang, akartilago dan (elemen matriks), antioksidan, membantu absorpsi Fe, membantu proses detoksifikasi

(6). Air

Air merupakan elemen utama sel, yang merupakan 95 % lebih dari berat jaringan tubuh hewan. Pada kebanyakan hewan, kebutuhan air dipenuhi dengan cara minum, melalui makanan, dan dengan produksi metaboliknya selama oksidasi lemak dan karbohidrat. Pada hewan laut dan gurun pasir tergantung pada air dari sisa metabolik untuk mengganti kehilangan air lewat penguapan, defekasi dan urinasi.

3. 2. Sistem Pencernaan

Sistem pencernaan dikenal juga dengan sistem gastrointestinal. Fungsi sistem pencernaan adalah:

1. Menyelenggarakan aktivitas makan (feeding) yaitu mengantarkan makanan ke bagian awal dari saluran pencernaan. Hal ini melibatkan kerja sama dengan sistem tubuh lainnya

- seperti sistem gerak, dan berbagai sistem sensoris (pendengaran dan penglihatan serta penciuman).
2. Pencernaan (digestion) yaitu proses dimana bahan makanan yang ditelan akan dihancurkan secara fisika dan kimiawi sehingga dapat diserap oleh dinding usus dan selanjutnya dijadikan suplai energi dan proses-proses fisiologis lainnya.
 3. Absorpsi yaitu penyerapan bahan makanan yang telah dicerna di saluran pencernaan untuk kemudian ditransfer ke sel-sel tubuh lainnya atau disimpan untuk sementara.
 4. Eliminasi atau ekskresi yaitu mengeliminasi segala sisa-sisa makanan yang tidak dapat dicerna dan diserap yang harus dibuang ke luar tubuh.

Seperti halnya dengan sistem tubuh lainnya, sistem pencernaan ini memperlihatkan pola-pola spesifik antar satu kelompok hewan dengan kelompok lainnya. Perbedaan pola antar kelompok tersebut dapat meliputi mekanisme pencernaannya, jenis atau tipe makanan yang dicerna serta aspek-aspek lain yang berkenaan dengan nutrisi yang diperlukan dan tidak diperlukan oleh tubuh.

A. Cara Hewan Memperoleh Makanan

Semua hewan adalah heterotrof dimana dalam rangka memenuhi seluruh kebutuhan energi untuk hidup bergantung kepada makanan yang ditelannya. Jenis makanan yang ditelan oleh hewan sangat bervariasi, mulai dari bakteri dan plankton yang sangat kecil hingga pada hewan-hewan berukuran besar seperti kelompok mamalia atau vertebrata lainnya. Dengan demikian adalah hal yang mungkin untuk menyusun suatu generalisasi tentang perilaku makan dari hewan-hewan yang ada sekaligus mengklasifikasikannya menjadi beberapa kelompok seperti pada tabel berikut ini.

Tabel 3.3. Klasifikasi Hewan Berdasarkan Cara Makannya (*Feeding Method*)

Bentuk makanan	Tipe cara makan	Contoh hewan
Partikel kecil	Pseudopodia dan vakuola pencerna	Protozoa (Amoeba)
	Dengan cilia	Bivalvia (Moluska)
	Dengan tentakel	Beberapa echinodermata (ex. Seaurchin)
	Pembentukan mukus	Beberapa urochordata
	Penggunaan seta	Beberapa crustacea, paus baleen, flangmingo
	Menelan makanan inaktif	Beberapa anelida (ex. cacing tanah)
	Menggali dan mengebor	Beberapa gastropoda (Moluska)
Partikel besar	Memburu makanan	Karnivora
Cairan	Menghisap tanpa penetrasi	Lebah madu, burung kolibri
Makanan siap serap	Menghisap dengan penetrasi	Lintah, pacet, kelelawar vampir
	Absorpsi melalui permukaan tubuh	Endoparasit, beberapa invertebrata

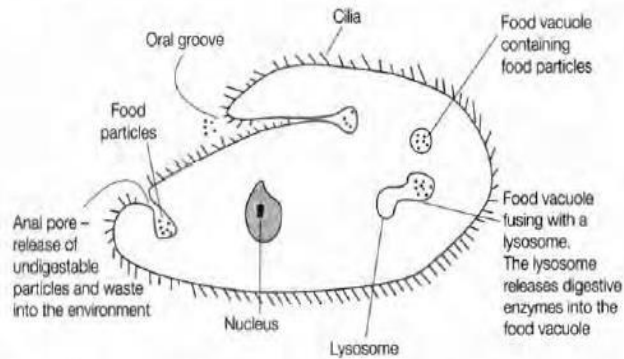
	Absorpsi dari partner simbiotik	aquatik Koral, hewan spons, mamalia Ruminansia
--	---------------------------------	--

(1). Pencernaan Partikel kecil

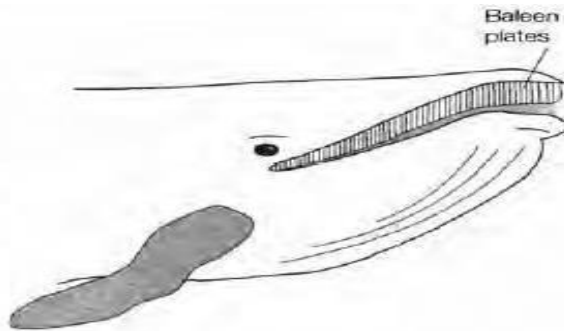
Pencernaan partikel kecil disebut juga pencernaan suspensi. Umumnya terbatas untuk hewan-hewan akuatik terutama hewan yang hidup di air laut. Hal tersebut dimungkinkan karena adanya sumber makanan yang potensial dalam jumlah lebih banyak seperti bakteri, mikro alga, invertebrata kecil dan sebagainya di dalam air laut.

Tipe paling sederhana dari proses pencernaan ini adalah **fagositosis** yang dapat ditemukan pada kelompok protozoa. Mekanisme lainnya adalah dengan menggunakan **silia** seperti pada gastrópoda bivalvia. Pada bivalvia dan kecebong, partikel-partikel makanan yang kecil akan terperangkap di insang lalu didorong secara aktif oleh silia-silia menuju ke sistem pencernaan untuk dicerna. Di mulut, makanan akan diseleksi berdasarkan ukurannya sehingga makanan akan terpisah dari sampah-sampah atau kotoran lainnya. Dalam banyak hal, proses memakan suspensi ini merupakan proses yang kontinyu selama air melewati insang, juga terus berlangsung pada proses respirasi. Pada kelompok hewan lainnya, terkadang juga ada **mukus** yang berfungsi untuk memerangkap makanan. Misalnya pada beberapa urochordata, dimana dia akan membentuk jaring-jaring mukus yang akan menjerat partikel makanan secara efektif.

Mekanisme memakan suspensi juga ditemukan pada hewan vertebrata seperti pada ikan paus baleen dan beberapa kelompok burung. Pada paus ballen terdapat barisan-barisan keping ballen yang menjulur dari atap mulut sebagai penyaring dan ketika mulut tersebut diisi air maka akan segera tertutup dengan cepat. Selanjutnya air akan dikeluarkan sedangkan bahan makanan akan terkumpul di alat penyaring tersebut.



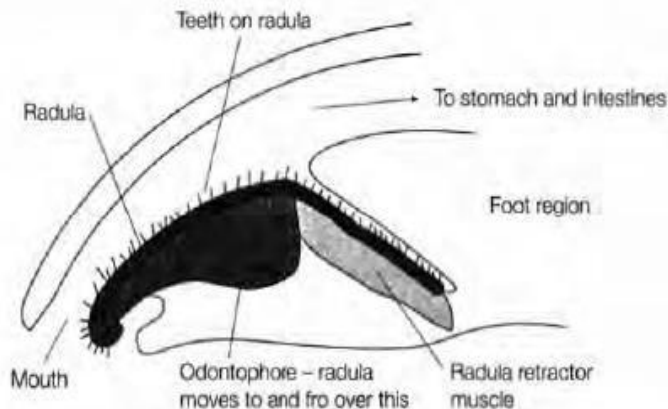
Gambar 3.1. Mekanisme memakan partikel kecil pada protozoa. Partikel memasuki vakuola makanan tempat pencernaan makanan. Sisa pencernaan akan dikeluarkan ke lingkungan (Key, 1998: 127).



Gambar 3.2. Mekanisme memperoleh makanan berupa plankton pada paus ballen. Barisan-barisan keping ballen yang menjulur dari atap mulut sebagai penyaring dan ketika mulut tersebut diisi air maka akan segera tertutup dengan cepat. Selanjutnya air akan dikeluarkan sedangkan bahan makanan akan terkumpul di alat penyaring tersebut (key, 1998: 128).

(2). Pencernaan Partikel Besar

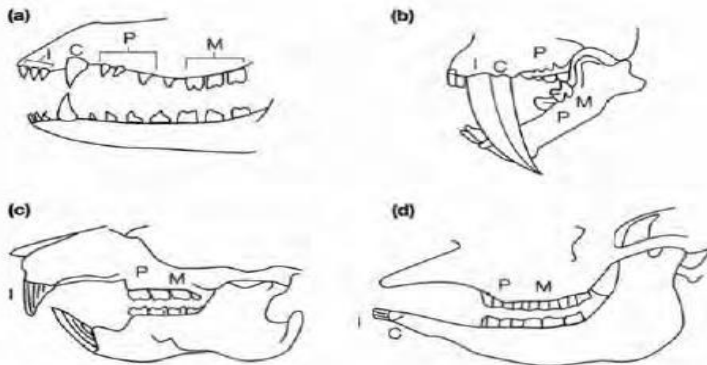
Cara untuk memperoleh bahan makanan berupa partikel besar adalah dengan **menelan makanan yang inaktif**. Dengan demikian bahan makanan tidak perlu ditangkap. Sering kali bahan makanan yang diperlukan tersebut adalah lingkungan tempat hidupnya, seperti pada cacing tanah *Lumbricus* yang secara sederhana akan menelan tanah di sekitarnya. Cara alternatif lainnya berkenaan dengan massa partikel makanan yang inaktif dapat ditemukan pada kelompok gastropoda (misalnya siput). Pada hewan ini, terdapat radula-radula yang terletak di atas struktur seperti lidah yang disebut **odontofor**. Radula digerakkan maju mundur, mengikis partikel makanan yang kemudian dimasukkan ke dalam saluran pencernaan.



Gambar 3.3. Mekanisme memperoleh makanan pada siput (snail). Radula digerakkan maju mundur untuk mengikis makanan. Partikel makan tersebut dilewatkan ke saluran pencernaan (Key, 1998:129).

Hewan-hewan lain, seperti karnivora harus melakukan perburuan dalam memperoleh makanannya. Pola berburu makanan tersebut sangat menguntungkan karena bahan makanan yang diperoleh sangat kaya nutrisi. Hal ini bertolak belakang dengan

herbivora yang bahan makanannya susah untuk dicerna dan sebagian besar mungkin akan menjadi sisa yang tak dapat diabsorpsi. Akan tetapi kerugian bagi kelompok karnivora adalah tidak terjaminnya ketersediaan makanan setiap waktu sebab proses berburu kadang juga menemui kegagalan. Hewan tangkapan dapat dicerna terlebih dahulu dalam rongga mulut sebelum ditelan atau sekaligus ditelan tanpa proses pencernaan di dalam rongga mulut seperti pada ular. Oleh karenanya, sehubungan dengan cara mencerna makanannya, maka hewan-hewan karnivora memiliki beragam variasi dari organ pada sistem pencernaannya seperti adanya taring, rahang yang elastik, saliva yang mengandung toksin atau racun yang memang secara sistematis dikeluarkan melalui gigitan. Pada cephalopoda, terdapat dua struktur seperti paruh di mulutnya yang dapat memperkecil ukuran makanan melalui gigitan dengan organ tersebut.



Gambar 3.4. Gigi mamalia. (a) struktur umum gigi mamalia; (b) karnivora (harimau); (c) rodensia; (d) herbivora. I, incisor; C, gigi taring; P, premolar; M, molar. (Withers, P. *Comparative Animal Physiology*, 1992, Saunders Collage Publishing cit Key, 1998: 129).

(3). Makanan Berupa Cairan

Cara untuk memperoleh makanan dalam bentuk cairan adalah dengan mengambil bahan makanan tersebut dari sumbernya tanpa harus melakukan penetrasi. Hal ini ditemukan pada lebah madu dan burung kolibri yang memakan nektar tumbuh-tumbuhan. Secara morfologis, hewan-hewan tersebut juga memiliki modifikasi struktural misalnya adanya rostrum yang panjang pada kolibri yang memungkinkannya untuk memperoleh nektar dengan mudah.

Bagi kelompok hewan lainnya yang juga memakan cairan, bahan makanannya hanya dapat diperoleh dengan cara menusuk tubuh hewan lain dengan menggunakan alat khusus dari mulutnya. Contohnya adalah beragam kelompok lintah, pacet, kelelawar vampir dan nyamuk. Beberapa serangga bahkan memiliki enzim pencernaan ke dalam tubuh hewan yang dihisapnya sehingga dapat dengan mudah menyerap bahan makanan berupa cairan tubuh tersebut.

(4). Penyerapan Nutrien Secara Langsung

Cara termudah dalam memperoleh makanan adalah dengan mengabsorpsi nutrien melalui permukaan tubuh. Dalam hal ini, makanan yang diperlukan telah dicerna secara sempurna sehingga dapat langsung diabsorpsi atau mungkin dicerna sebagian tetapi tidak memerlukan proses yang terlalu rumit untuk mencernanya. Endoparasit yang hidup pada saluran pencernaan hewan merupakan hewan yang langsung dapat menyerap makanan yang sudah dicerna oleh inangnya. Sebagai konsekuensinya, hewan-hewan tersebut biasanya mengalami reduksi saluran pencernaan karena tidak diperlukan mencerna makanan yang diperlukan. Beberapa cacing parasit dan protozoa memiliki tipe pencernaan demikian.

Beberapa hewan lainnya masuk ke dalam partner simbiotiknya berupa organisme lainnya. Contohnya pada beberapa koral, anemon laut, dan bivalve yang hidup bersimbiosis dengan alga hijau (*Zoochloellae*) atau dengan alga coklat (*Zooxanthelle*). Contoh unik lainnya adalah pada druminansia, dimana hewan

ruminansia bersimbiosis dengan mirkoba dalam mencerna selulosa. Kelompok ruminansia tidak memiliki enzim selulase untuk mencerna bahan makanan yang kaya selulosa, sehingga fungsi pencernaan enzimatik dijalankan oleh mikroba yang hidup di dalam saluran pencernaannya.

3.4. Kebutuhan Akan Sistem Pencernaan

Proses pencernaan diklasifikasikan menjadi dua tipe utama, yaitu sistem pencernaan intraseluler dan ekstraseluler. Tipe proses pencernaan lainnya adalah proses pencernaan transisi atau dikenal dengan proses pencernaan kontak (*contact digestion*).

A. Sistem pencernaan intraseluler

Sistem pencernaan intraseluler ini ditemukan pada protozoa dan spons. Dalam rangka memperoleh makanan, hewan ini harus mencerna bahan makanannya sehingga bahan makanan tersebut dapat digunakan. Proses pencernaan terjadi di dalam sel yaitu di **vakuola makanan**. Proses pencernaan intraseluler ini hanya dapat berjalan secara efektif jika kondisi lingkungan optimal, misalnya pH optimum di vakuola harus dijaga untuk stabilitas kerja enzim. Hal ini adalah salah satu kekurangan dari proses pencernaan tipe intraseluler. Kekurangan lainnya adalah seluruh proses pencernaan baik berupa lipid, karbohidrat, maupun protein hanya berlangsung di tempat yang sama yaitu di vakuola makanan, dan proses pencernaan tidak dapat dilaksanakan secara spasial ataupun periodik tetapi berlangsung secara simultan sehingga ritme pencernaan tidak dapat diatur sedemikian rupa. Bentuk kekurangan lainnya adalah keterbatasan ukuran partikel yang akan dicerna dimana ukurannya harus lebih kecil dari pada ukuran sel itu sendiri. Sebagai contoh, protozoa tidak dapat mencerna partikel makanan yang lebih besar dari tubuhnya. Hal ini tentu akan membatasi jenis dan jumlah makanan yang dapat diperoleh.

Proses pencernaan kontak merupakan proses pencernaan yang bersifat transisi/peralihan antara proses pencernaan intraseluler dan ekstraseluler. Tipe pencernaan ini ditemukan pada

beberapa Coelenterata seperti anemon laut. Pada anemon laut, dalam memperoleh makanan berupa partikel makanan berukuran besar, maka partikel makanan ini akan masuk ke rongga saluran pencernaan (Coelenteron). Di dalam rongga saluran pencernaan ini berisi air laut yang akan merangsang enzim-enzim inefektif jika memasuki rongga saluran pencernaan ini. Pada proses pencernaan ini, filamen-filamen pada permukaan endotelium rongga saluran pencernaan akan menyelubungi partikel makanan dan akan mengeluarkan enzim-enzim pencernaan. Hasil pencernaan partikel makanan langsung diserap oleh sel yang sama. Untuk partikel makanan berukuran kecil, Coelenterata tetap mengalami proses pencernaan intraseluler.

B. Sistem pencernaan ekstraseluler

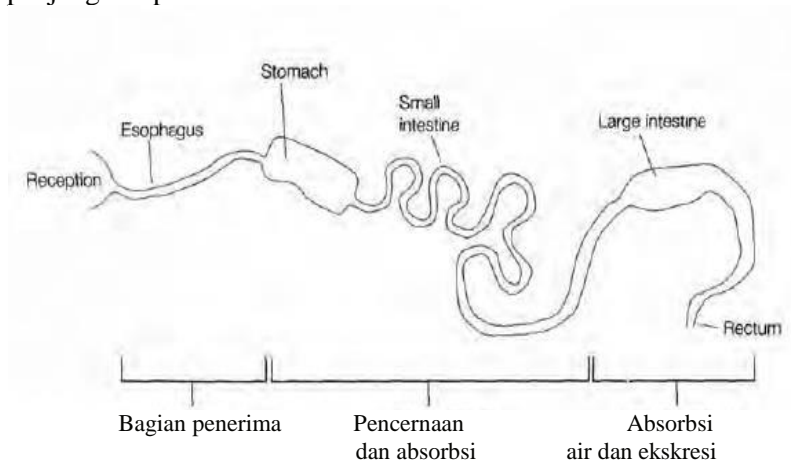
Pada kelompok hewan yang lebih maju memiliki sistem pencernaan yang lebih kompleks yaitu adanya **saluran pencernaan** dan proses pencernaan ekstraseluler. Sistem pencernaan dapat diandaikan seperti suatu tabung yang bagian pangkalnya adalah mulut yang kemudian tabung tersebut memanjang di bagian tengah tubuh hewan lalu berakhir pada suatu lubang yang disebut anus. Melalui proses pencernaan ekstraseluler, enzim-enzim yang terlibat akan disekresikan ke dalam sistem gastrointestinal. Proses pencernaan selanjutnya dapat berlangsung dan produk hasil pencernaannya dapat diserap ke dalam jaringan tubuh yang akhirnya menuju sel-sel yang membutuhkan. Pentingnya keberadaan anus adalah untuk menjamin bahwa proses pencernaan berlangsung satu arah dan memungkinkan proses pencernaan yang sekuensial (periodik) dari bahan makanan yang masuk ke dalam sistem. Proses ini juga akan mendukung spesialisasi dari sistem pencernaan hewan dimana beberapa area dari saluran pencernaan akan terbagi menjadi bagian untuk penyimpanan sementara, tempat pencernaan, dan tempat penyerapan atau absorpsi serta proses lain-lainnya.

3.5. Struktur dan Fungsi Sistem Pencernaan

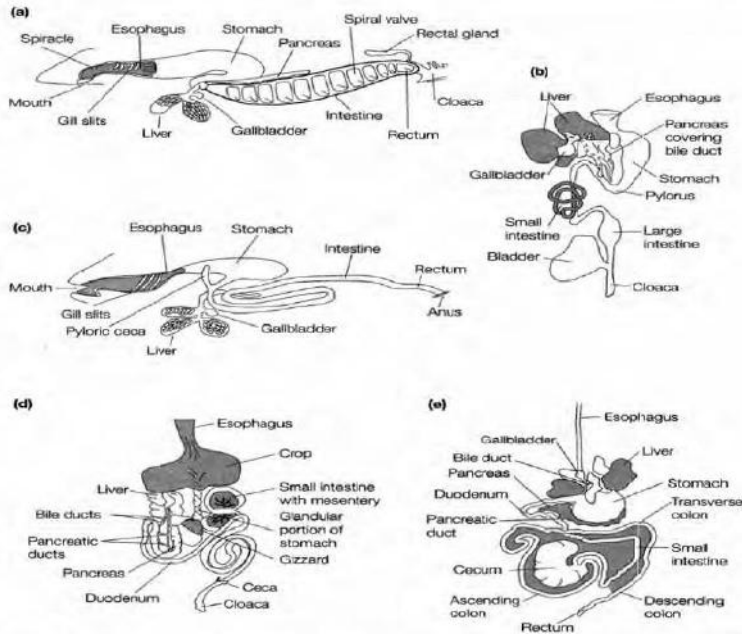
Sistem pencernaan terdiri atas empat bagian utama yaitu :

- Bagian penerimaan makanan
- Bagian penyimpanan
- Bagian pencernaan dan penyerapan
- Bagian ekskretif (eliminatif) dan absorpsi air

Bagian-bagian tersebut akan berbeda strukturnya pada berbagai kelompok hewan tergantung pada jenis makanan (herbivora, karnivora, omnivora) dan pola atau cara mendapatkan makanannya. Pada herbivora struktur sistem pencernaannya lebih panjang daripada karnivora.



Gambar 3.5. Bagian-bagian utama sistem pencernaan pada hewan



Gambar 3.6. Sistem pencernaan pada berbagai spesies hewan. (a) Elasmobranchiata; (b) katak; (c) ikan teleostei; (d) burung; (e) mamalia. (Withers, P. Comparative Animal Physiology, 1992 *cit* Key, 1998: 135).

A. Bagian Penerimaan Makanan

Mulut adalah tempat penerimaan makanan pada hewan. Pada dasarnya proses pencernaan bermula di tempat ini. Di dalam mulut terdapat organ pembantu yaitu gigi yang berfungsi dalam menghancurkan makanan dan enzim dari kelenjar saliva serta saliva itu sendiri. Saliva adalah mucin yang berada dalam bentuk cair yang berupa senyawa mukopolisakarida dan mempunyai fungsi sebagai pelumasan. Pada mamalia, saliva sangat penting dalam melonggarkan partikel-partikel makanan sebelum ditelan dan ketika menelan maka keberadaan cairan saliva akan mempermudah dalam proses penelanan tersebut. Di dalam saliva

pada dasarnya terkandung banyak substansi meliputi amilase (enzim yang berperan dalam pencernaan karbohidrat pada beberapa hewan mamalia), toksin (pada saliva ular), dan antikoagulan (pada saliva serangga penghisap darah).

Keseluruhan saluran pencernaan mulai dari mulut hingga ke bagian akhirnya secara umum dilapisi oleh mukus, kecuali pada arthropoda. Mukus sangat berperan sebagai barier dan melindungi saluran pencernaan dari kerusakan fisik dan kimiawi ketika berbagai makanan masuk dan dicerna secara enzimatik di dalam saluran tersebut. Pada arthropoda, saluran pencernaannya dilapisi oleh kitin dengan fungsi yang sama dengan mukus yaitu sebagai protektor. Pada invertebrata seperti platyhelminthes, coelentrata, dan spons tidak ditemukan kelenjar ludah.

B. Bagian penggerak dan Penyimpanan Sementara

Esopagus merupakan saluran yang menghubungkan antara mulut dan saluran pencernaan lainnya di dalam tubuh. Bagian ini tidak berperan dalam proses pencernaan tetapi hanya tempat lewatnya makanan sebelum dicerna lebih lanjut dengan mekanisme kontraksi. Pada hewan tertentu seperti cacing tanah, kontraksi esofagus bukan merupakan kontraksi yang independen tetapi justru didominasi oleh kontraksi otot tubuh yang berperan aktif dalam mentransfer makanan. Pada hewan-hewan lainnya, otot-otot esofagus akan berkontraksi dan berelaksasi secara bergantian sehingga menyebabkan gerak spesifik yang dikenal sebagai gerak peristaltik.

Pada beberapa kelompok hewan seperti aves terdapat bagian tertentu dari saluran pencernaan yang berperan sebagai tempat penyimpanan makanan sementara sebelum dicerna. Bagian tersebut dikenal dengan **tembolok (ingluvies)**. Selain itu juga terdapat pada lintah yang dapat menampung darah sebagai sumber makanannya dalam beberapa minggu. Pada beberapa kondisi, lambung atau empedal juga berperan sebagai tempat penyimpanan sementara namun proses pencernaan lebih mendominasi di tempat tersebut.

C. Tempat Pencernaan dan Absorpsi

(1).Tempat Pencernaan

Bagian yang menjadi tempat pencernaan yang umum adalah **ventrikulus** atau **lambung**, namun terdapat juga modifikasi yang disebut **empedal** atau **gizzard**. Empedal (gizzard) dan lambung adalah pelebaran dari saluran pencernaan bagian anterior dan terlibat dalam proses pencernaan. Empedal adalah organ yang berupa kantung berdinding otot kuat dan terlibat dalam proses pencernaan secara fisik dari bahan makanan yang ditelan. Empedal ini terdapat pada invertebrata maupun vertebrata. Pada invertebrata seperti pada kelompok arthropoda, empedal berperan dalam melumatkan dan menyaring makanan atas dasar ukurannya. Dengan demikian, empedal menjamin bahwa tidak ada partikel yang terlalu besar dapat masuk ke dalam saluran pencernaan selanjutnya sehingga proses pencernaan dapat berlangsung lancar. Pada vertebrata, empedal tidak ditemukan pada seluruh kelompok hewan tetapi terbatas pada aves dan reptil.

Empedal pada aves memiliki fungsi yang sama seperti pada invertebrata. Akan tetapi, untuk mengoptimalkan fungsi pencernaan bahan makanannya, maka di dalam empedal tersebut terdapat pasir-pasir kecil yang ditelan oleh aves yang membantu dalam mencerna makanan secara fisik. Pada kelompok aves pemakan biji misalnya ayam, jika tidak adanya pasir atau bebatuan kecil di dalam empedalnya akan beresiko mati kelaparan karena tidak dapat mencerna makanan secara baik sehingga tidak ada suplai nutrisi. Beberapa dinosaurus herbivora yang memiliki kekerabatan dekat dengan aves ternyata juga memiliki empedal dan adanya bebatuan di dalam empedal yang dibuktikan dengan penelitian pada fosil-fosilnya. Empedal ini juga ditemukan pada kerabat dinosaurus yang masih hidup sekarang yaitu buaya.

Lambung juga menjadi tempat pencernaan bahan makanan yang sudah dalam bentuk tercerna sebagian di mulut. Lambung berperan dalam pencernaan protein dengan mensekresikan enzim protease yang akan memecah molekul protein. Lingkungan didalam lambung semua vertebrata bersifat sangat asam, dengan pH berkisar antara 1 sampai 2. Kondisi lambung yang sangat asam tersebut akan mengaktifkan enzim protease yang sebelumnya

disimpan dan disekresikan dalam bentuk prekursor inaktif yang disebut zymogen.

Pada beberapa hewan herbivora, misalnya sapi atau kerbau, lambungnya sudah terspesialisasi untuk mencerna selulosa. Pada hewan tersebut, lambungnya terdiri atas banyak ruang. Struktur dari lambung kelompok hewan yang disebut dengan **ruminansia** tersebut terdiri atas rumen, retikulum, omasum, dan abomasum. Hewan-hewan ruminansia sebenarnya tidak dapat mencerna selulosa dari dinding sel tumbuhan yang dimakannya. Hal ini seperti pada vertebrata lainnya, karena ketiadaan enzim pencerna selulosa yang dapat memutus unit-unit polimer dari selulosa menjadi lebih sederhana seperti monomer glukosa. Dalam rangka mencerna selulosa tersebut, hewan ruminansia bersimbiosis dengan bakteri dan protozoa yang hidup di dalam rumen dan retikulum yang mampu mencerna ikatan beta-glikosida antar unit selulosa secara enzimatik sehingga menjadi monomer yang sederhana dan dapat diabsorpsi oleh hewan ruminansia.

Secara spesifik, proses pencernaan makanan oleh hewan ruminansia lebih kompleks daripada vertebrata lainnya. Makanan ditelan dan dikunyah dimulut kemudian memasuki esophagus dan menuju rumen. Di rumen terjadi pencernaan polisakarida dan protein dengan bantuan protozoa dan bakteri yang menghasilkan enzim selulase. Setelah itu makanan menuju ke retikulum dimana makanan akan menjadi gumpalan-gumpalan atau bolus. Bolus-bolus tersebut akan dikeluarkan kembali ke rongga mulut untuk dimamah secara kontinyu di rongga mulut dan kemudian ditelan lagi melewati esophagus dan masuk ke omasum. Di omasum ini terdapat kelenjar kelenjar enzimatik yang akan membantu pencernaan lebih lanjut. Setelah itu, makanan didorong ke abomasum yang memiliki pH sangat rendah (sangat asam) dan terjadi juga pencernaan enzimatik lanjut. Mikroba baik bakteri maupun protozoa akan mati di dalam abomasum lalu dicerna dan digunakan sebagai sumber protein bagi hewan. Dari abomasum makanan akan didorong ke intestinum dimana akan terjadi proses absorpsi normal seperti pada hewan lainnya.

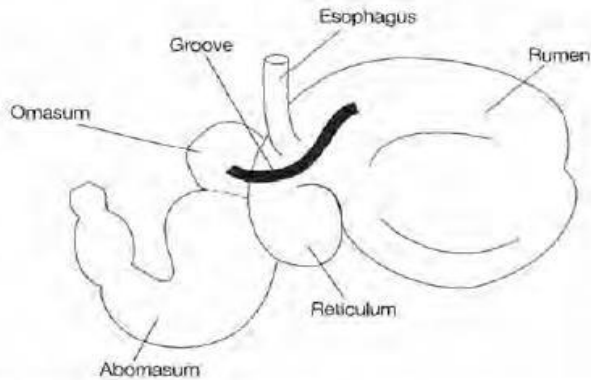
Produk pencernaan enzimatik yang dilakukan oleh mikroba adalah gula dan asam lemak yang labil, metan dan gas CO₂. Namun, metan dan CO₂ adalah produk metabolisme dari mikroba tersebut. Asam lemak akan diabsorpsi oleh hewan ruminansia dan dijadikan sumber energi. Keuntungan dari mekanisme pencernaan ruminansia ini adalah dihasilkannya protein dari amonia dan urea oleh mikroorganisme yang kemudian protein tersebut dapat dicerna oleh hewan. Salah satu kerugian terbesar dari sistem pencernaan ini adalah kebanyakan dari selulosa yang dicerna oleh mikroba digunakan untuk metabolisme sendiri sehingga hewan ruminansia beresiko untuk tidak dapat memperoleh gula secara langsung. Manifestasi selanjutnya adalah besarnya resiko katastrofik karena otak membutuhkan suplai glukosa yang konstan karena metabolisme tidak dapat menggunakan tipe sumber energi lainnya. Akan tetapi, dalam rangka mengatasi masalah tersebut, hati hewan ruminansia memiliki kapasitas yang tinggi untuk melakukan biosintesis glukosa (disebut dengan proses glukoneogenesis). Titik awal dari proses glukoneogenesis di hati ruminansia tersebut berasal dari asam lemak yang dihasilkan oleh mikroba.

Pola pencernaan yang melibatkan kerja sama antara hewan tertentu dengan mikroba juga dapat ditemukan pada invertebrata. Simbiosis tersebut juga memiliki tujuan yang sama yaitu untuk dapat mencerna selulosa. Hewan-hewan invertebrata tersebut misalnya rayap dan beberapa spesies kumbang yang umumnya di dalam saluran pencernannya terdapat protozoa

Pada kelinci dan rodentia pemakan tumbuhan, terdapat proses yang hampir mirip dengan ruminansia tetapi terjadi di caecum. Ketika produk hasil pencernaan telah berada di belakang dari bagian absorpsi (intestinum tenue), maka bahan makanan tersebut akan didorong ke anus dan akan dikeluarkan melalui proses defekasi tetapi kemudian dimakan kembali oleh kelinci. Proses memakan kembali feses yang masih kaya nutrisi tersebut dinamakan **refeksi**. Dengan demikian, nutrisi bagi kelinci tergantung kepada proses refeksi tersebut. Adapun feses sejati yang berupa material sisah miskin nutrisi (seperti kebanyakan feses hewan lainnya) akan dikeluarkan secara terpisah dan dapat

dibedakan dengan feces kaya nutrisi yang direfeksi oleh kelinci terutama dari strukturnya dan kandungannya.

Proses pencernaan makanan lebih lanjut dan absorpsinya berlangsung di bagian tengah dari saluran pencernaan (midgut) yang merupakan bagian pertama dari intestinum. Makanan yang masuk ke intestinum berupa chyme.



Gambar 3.7. Modifikasi spesifik pada lambung dari hewan ruminansia (empat ruang) sebagai bentuk spesialisasi untuk mencerna selulosa dengan bantuan mikroba.

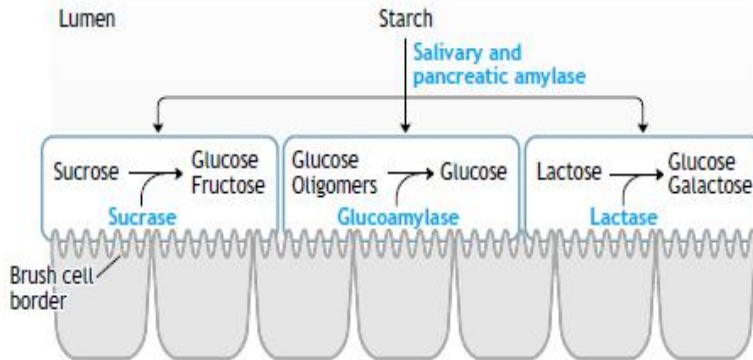
Tujuan utama pencernaan secara enzimatik adalah untuk dapat mencerna secara tuntas dari bahan makanan baik berupa karbohidrat, lipid, maupun protein sehingga dapat diabsorpsi oleh dinding intestinum tenue bagian akhir yang pada vertebrata disebut **ileum**. Kendati terdapat berbagai jenis bahan makanan yang dicerna oleh hewan, tetapi tiga komponen yang disebutkan tadi adalah substansi pokok. Berdasarkan hal tersebut pula maka terdapat 3 kelompok besar enzim-enzim yang terlibat dalam pencernaan yaitu amilase (kadang disebut juga karbohidrase), lipase, dan protease.

(a). Pencernaan karbohidrat

Enzim yang bertanggung jawab dalam pencernaan karbohidrat adalah **amilase**. Tugasnya adalah untuk memutuskan ikatan glikosida yang menghubungkan antara satu unit monosakarida dengan unit lainnya. Secara umum, karbohidrat terbagi menjadi polisakarida, dan oligosakarida. Terdapat enzim polisakaridase yang akan mencerna polisakarida seperti pati, glikogen, selulosa (kendati pencernaan selulosa memerlukan proses dan modifikasi yang spesifik pada hewan).

Enzim yang bertanggung jawab untuk mencerna pati adalah amilase yang dapat ditemukan baik pada invertebrata maupun vertebrata. Pada vertebrata, enzim tersebut disekresikan oleh kelenjar salivaris dan juga oleh pankreas. Pada invertebrata juga dihasilkan oleh kelenjar ludah dan jaringan berglandular pada saluran usus tengah (midgut). Produk hasil pencernaan ini adalah glukosa dan maltosa. Maltosa adalah kelompok oligosakarida yang akan dicerna lebih lanjut menjadi glukosa.

Oligosakaridase merupakan enzim yang mencerna disakarida atau trisakarida. Pada vertebrata (misalnya mamalia), enzim tersebut yang terdiri atas **sukrase, maltase, trehalase, dan laktase** yang terdapat di bagian yang dekat dengan sel-sel epitel saluran pencernaan yang berperan dalam absorpsi karbohidrat. Hal ini berarti bahwa karbohidrat dicerna pada waktu yang hampir bersamaan dengan proses absorpsinya. Enzim oligosakaridase juga ditemukan pada invertebrata tetapi enzimnya kurang spesifik (dalam hal reaksi yang dikatalisnya) dari pada hewan vertebrata. Contohnya, enzim sukrase pada vertebrata akan mencerna sukrosa (disakarida) menjadi dua unit monosakarida. Sedangkan pada invertebrata, enzim sukrase akan berfungsi dalam pencernaan sukrosa dan juga maltosa menjadi unit-unit monosakarida.



Gambar 3.8. Pencernaan karbohidrat

(b). Pencernaan Protein

Enzim yang bertanggung jawab dalam pemecahan protein adalah protease. Enzim tersebut memutus ikatan peptida yang menghubungkan asam amino satu sama lain menjadi peptida dan peptida menjadi polipeptida atau protein. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, bahwa enzim protease disimpan dan disekresikan dalam bentuk prekursor tidak aktif yang disebut zimogen. Setelah dilepaskan, enzim ini baru akan teraktivasi oleh lingkungan yang asam (dalam lambung). Alasan yang logis tentang ketidakaktifan enzim protease ketika berada di dalam sel-sel penghasilnya adalah untuk menghindari terjadinya pencernaan dari sel-sel itu sendiri dan sel sekitarnya oleh enzim tersebut karena sebagian besar sel-sel tubuh terdiri atas protein. Atau secara ringkas bahwa zymogen menjamin bahwa proses pencernaan sel-sel sendiri tidak akan terjadi.

Enzim protease dapat dibagi menjadi dua kelompok utama yaitu **endopeptidase** dan **eksopeptidase**. Endopeptidase adalah enzim-enzim yang berperan pada proses pemecahan ikatan peptida spesifik di dalam molekul protein. Istilah spesifik disini mencakup pengertian spesifik asam aminonya dan juga sisi dari ikatan peptida tersebut. Enzim eksopeptidase berperan dalam memutuskan asam amino-asam amino terminal. Asam amino yang akan diputus

meliputi asam amino terminal-N (oleh enzim aminopeptidase) atau asam amino terminal-C (oleh enzim karboksipeptidase). Pembagian spesifik dari enzim endopeptidase berdasarkan pH optimum bekerjanya atau berdasarkan sifat asam amino yang diperlukan di dalam ikatan peptida.

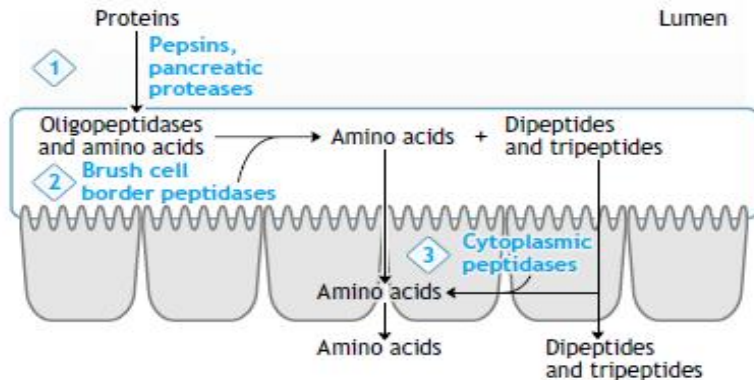
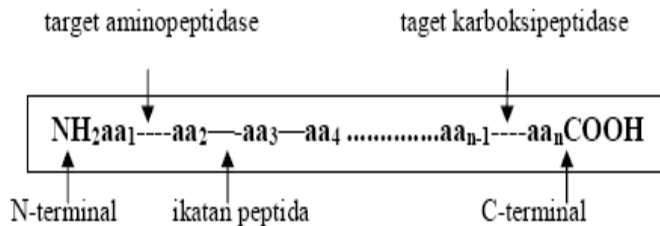
Terdapat banyak enzim protease yang bekerja pada pH rendah atau dikenal dengan protease asam yang bekerja secara optimal pada pH 1.5-2.0. Enzim-enzim tersebut salah satunya adalah **pepsin** (yang disimpan dan disekresikan dalam bentuk pepsinogen), yang dilepaskan ke lambung dari sebagian besar vertebrata (kecuali cyclostome). pH yang rendah akan mengaktifasi pepsinogen menjadi pepsin yang dapat bekerja. Akan tetapi, pepsinogen tersebut dapat teraktivasi sendiri yang disebut autokatalisis. Enzim ini secara spesifik akan memutus ikatan peptida antara asam amino aromatik (misalnya tirosin dan fenilalanin) dan dikarboksilat. Pada invertebrata, keberadaan protease yang acidofilik ini sangat jarang.

Selain kelompok enzim protease asidofilik, terdapat beberapa enzim yang alkalofilik yang bekerja pada pH basa. Kelompok ini meliputi **tripsin** dan **kimotripsin**. Semua kelompok vertebrata mensekresikannya dalam bentuk tripsinogen dan kimotripsinogen. Tripsin diaktivasi oleh hormon gastrointestinal yaitu enterokinase yang dihasilkan oleh mukosa saluran pencernaan. Selain itu tripsin juga dapat mengalami autokatalisis dimana konversi sejumlah tripsinogen menjadi tripsin akan memicu pengaktifan tripsinogen lebih lanjut. Tripsin secara spesifik akan memecah ikatan peptida pada residu-residu arginin dan lisin.

Pada invertebrata terdapat juga enzim seperti tripsin yang ditemukan pada crustacea dan insekta. Enzim kimotripsin diaktivasi oleh tripsin dan akan memutus ikatan peptida pada asam amino aromatik. Pada crustacea juga ditemukan adanya enzim protease yang unik yang tidak dimiliki oleh kelompok hewan lainnya.

Enzim-enzim yang telah dipaparkan tadi merupakan enzim endopeptidase, sedangkan enzim eksopeptidase memiliki aktivitas yang berbeda. Aminopeptidase dan karboksipeptidase bekerja pada bagian terminal N dan C dari suatu rantai peptida. Terminal N

adalah tempat dimana asam amino pertamanya di dalam ikatan tersebut memiliki gugus amin (NH_2). Sedangkan C terminal dimaksudkan karena adanya kelompok asam karboksil yang terikat pada peptida tersebut. Kedua enzim ini dapat ditemukan baik pada vertebrata maupun invertebrata. Pemodelan sederhana dari ikatan peptida, N dan C-terminal sebagai target kerja enzim eksopeptidase sebagai berikut.



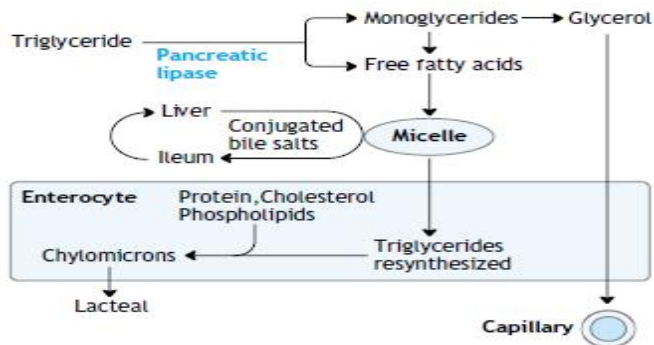
Gambar 3.9. Pencernaan protein

(c). Pencernaan Lipid

Terdapat dua kelompok enzim yang terlibat dalam proses pencernaan lipid yaitu **lipase** dan **esterase**. Lipase memutus ikatan trigliseraldehid yang merupakan kelompok utama pada lipid dalam bahan makanan. Pada verterbata, lipase dihasilkan oleh pankreas.

Sedangkan esterase bertanggung jawab dalam memutus ikatan pada lipid-lipid yang lebih sederhana. Aktivitas kedua kelompok enzim tersebut pada vertebrata dan beberapa invertebrata (misalnya crustacea) dibantu oleh keberadaan garam empedu yang disekresikan ke saluran pencernaan tempat dimana enzim pencernaan lipid bekerja. Garam empedu berperan sebagai emulgulator yang mencegah terbentuknya droplet-droplet lipid menjadi agregat sehingga akan memperluas area permukaan tempat bekerjanya enzim.

Lipid lainnya yang digunakan oleh hewan adalah lilin (wax) yang terkadang sangat bermanfaat sebagai penyanggah dalam pengapungan (buoyancy) pada hewan invertebrata laut. Kendati susah dicerna, beberapa hewan (misalnya burung dan ikan) yang memakan invertebrata laut tersebut, akan memperoleh sumber energi dalam jumlah besar dari pencernaan invertebrata laut yang mengandung lilin. Bagaimanapun proses akhir dari pencernaan lipid pada hewan tetap memerlukan enzim-enzim yang dihasilkan oleh hewan itu sendiri.



Gambar 3.10. Pencernaan lipid, umumnya berlangsung di lambung dan usus kecil

(2). Absorbsi

Produk pencernaan makanan baik berupa monosakarida, asam amino, maupun asam lemak dan gliserol harus diabsorbsi dari saluran pencernaan sebelum dapat digunakan oleh hewan. Proses ini lebih dikenal dengan absorpsi pada vertebrata dari pada

invertebrata. Proses absorpsi memerlukan pergerakan molekul-molekul nutrisi dari lumen saluran pencernaan melewati membran dan menuju ke sel-sel yang menjadi dinding **lumen**. Dari sel-sel dinding lumen tersebut, molekul-molekul nutrisi akan didistribusikan melalui proses-proses peredaran darah.

(a). Absorpsi karbohidrat

Absorpsi berbagai macam gula (misalnya **glukosa dan galaktosa**) berlangsung dengan mekanisme **transpor aktif tipe sekunder/transpor aktif tidak langsung/ kotranspor** dimana transportasinya terikat dengan Na^+ . Hal ini berbeda dengan proses transportasi gula lainnya seperti **fruktosa** yang berlangsung dengan mekanisme **difusi difasilitasi**. Setelah memasuki sel-sel di daerah absorbtif pada saluran pencernaan, monosakarida harus memasuki sistem sirkulasi untuk kemudian didistribusikan. Pada mamalia terjadi proses transportasi monosakarida ke luar sel yang menginisiasi proses absorpsi baik secara difusi sederhana maupun difusi difasilitasi.

(b). Absorpsi Asam Amino

Hasil pencernaan protein berupa asam amino juga diabsorpsi dengan mekanisme **transpor aktif tipe sekunder** yang mirip dengan proses absorpsi glukosa. Akan tetapi, pada beberapa insekta (misalnya kecoak), asam amino mungkin ditransportasikan dengan tipe kontransport bersama K^+ . Proses absorpsi asam amino lebih kompleks dari pada monosakarida karena adanya mekanisme transpor yang spesifik untuk masing-masing tipe asam amino.

Selain itu juga terdapat kemungkinan bahwa molekul di dan tripeptida diabsorpsi dengan mekanisme transportasi dengan **mediasi pembawa** (carrier-mediated transporter). Akan tetapi proses tersebut tidak akan dapat digeneralisasi secara spesifik untuk tiap jenis dipeptida atau tripeptida karena setiap jenisnya akan memiliki mekanisme spesifik yang berbeda satu sama lain.

Sebagai gambaran, dari 20 asam amino yang digunakan oleh hewan, akan sangat mungkin terbentuk sekitar ratusan molekul tripeptida yang unik. Protein dapat pula diabsorpsi secara utuh di

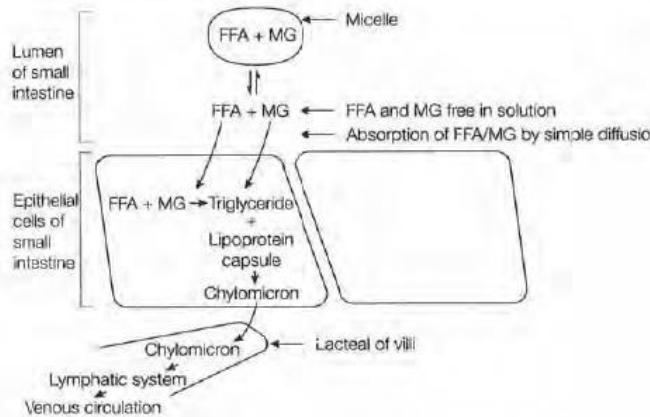
saluran pencernaan melalui mekanisme **endositosis**, misalnya pada proses transportasi progenitor imunitas dari induk mamalia kepada anaknya melalui air susu. Dalam hal ini, semua protein imunitas yang ada di dalam susu ibu akan diabsorpsi tanpa adanya pencernaan dan akan masuk langsung ke dalam sistem sirkulasi sebagai cikal bakal sistem pertahanan imunitas anak.

(c). Absorpsi Lipid

Absorpsi lipid yang sudah dicerna menjadi asam lemak dan monogliserida berlangsung melalui mekanisme **difusi sederhana**. Produk pencernaan lipid akan beragregasi dengan garam empedu untuk membentuk partikel-partikel kecil yang disebut **misel**. Kuantitas monogliserida dan asam lemak bebas di dalam larutan pada lumen saluran pencernaan sangat terbatas karena karakter spesifik dari produk pencernaan lipid tersebut yang hidrofobik dan tidak akan larut dalam cairan dalam saluran pencernaan. Oleh sebab itu, asam lemak bebas dan monogliserida akan dikemas dalam misel yang selanjutnya akan dilepaskan di dalam cairan sebelum kemudian diabsorpsi melalui difusi sederhana ke dalam sel. Misel berperan sebagai kemasan yang menyimpan monogliserida dan asam lemak bebas yang menunggu untuk diabsorpsi.

Setelah diabsorpsi, monogliserida dan asam lemak bebas akan dikonversi lagi menjadi trigliserida. Trigliserida yang terbentuk tersebut kemudian diselubungi oleh lipoprotein dan membentuk struktur chylomikron. Chylomikron akan memasuki lakteal dari vili dimana terdapat banyak saluran pembuluh yang akan membawa cairan jaringan ke sistem sirkulasi sistematis melalui sistem limfa. pencernaan, juga disertai pergerakan pasif ion Cl^- dalam rangka menjaga netralitas elektrik. Selanjutnya kondisi ini akan menciptakan gradien osmotik antara lumen usus besar dengan sel-sel di dindingnya, sehingga air akan diabsorpsi dengan cara osmosis. Usus besar biasanya dikolonisasi oleh beragam bakteri. Bakteri tersebut menghasilkan nutrisi seperti vitamin K yang merupakan konsekuensi dari aktivitas metabolismenya yang selanjutnya nutrisi tersebut akan diserap juga oleh tubuh hewan.

Sisa-sisa pencernaan yang semisolid di usus besar disebut feses dan akan dikeluarkan secara periodik melalui anus.



Gambar 3.11. Mekanisme absorpsi asam lemak dan monogliserol di sel mukosa usus. Proses absorpsi berlangsung melalui difusi sederhana

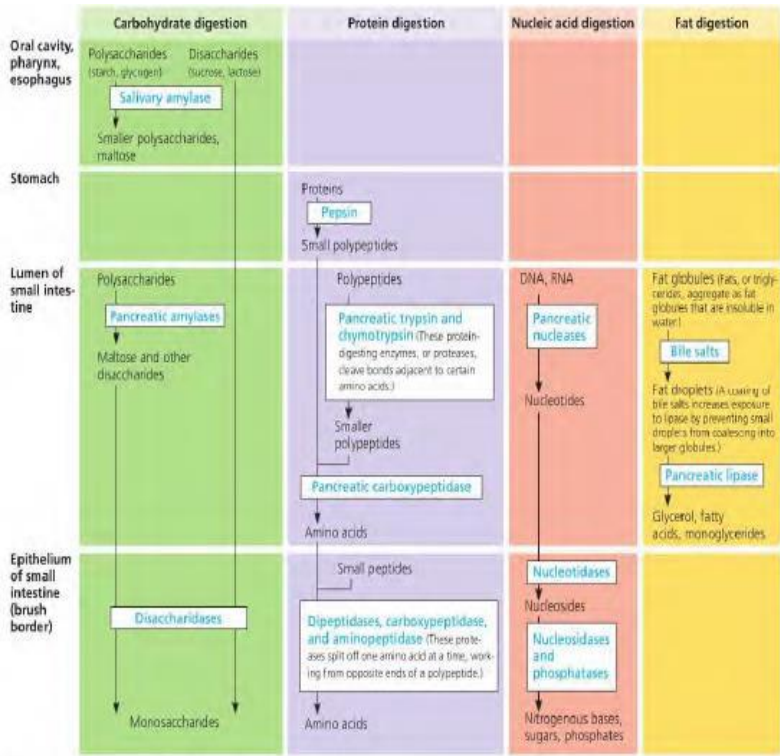
D. Tempat Ekskresi dan Absorpsi Air

Bagian akhir dari sistem pencernaan adalah usus belakang (hindgut). Pada vertebrata bagian ini berupa **intestinum crassum** atau **usus besar**. Ketika makanan telah mencapai tempat tersebut, sebagian besar nutrisi telah dicerna dan diabsorpsi. Material yang ada di dalam usus besar ini bersifat semisolid yang berbeda dengan bentuk larutan pada saluran pencernaan sebelumnya. Hal ini berhubungan dengan telah terjadinya proses penyerapan air dari bahan makanan selama proses absorpsi di usus halus. Sekitar 80% air telah diabsorpsi sebelum memasuki usus besar, sedangkan sisanya akan diabsorpsi kemudian. Proses tersebut difasilitasi oleh **transpor aktif ion natrium (Na^+)** yang keluar dari lumen saluran pencernaan, juga disertai pergerakan pasif ion Cl^- dalam rangka menjaga netralitas elektrik. Selanjutnya kondisi ini akan menciptakan gradien osmotik antara lumen usus besar dengan sel-

sel di dindingnya, sehingga air akan diabsorpsi dengan cara osmosis.

Usus besar biasanya dikolonisasi oleh beragam bakteri. Bakteri tersebut menghasilkan nutrisi seperti vitamin K yang merupakan konsekuensi dari aktivitas metabolismenya yang selanjutnya nutrisi tersebut akan diserap juga oleh tubuh hewan. Sisa-sisa pencernaan yang semisolid di usus besar disebut feses dan akan dikeluarkan secara periodik melalui anus.

Proses pencernaan, absorpsi, eliminasi dan reabsorpsi yang berlangsung di sepanjang saluran pencernaan menimbulkan dinamika perubahan volume dari bahan makanan yang diproses mulai dari rongga mulut hingga dibuang sebagai feses. Pada dasarnya, dalam kondisi normal akan terjadi proses penambahan volume bahan makanan dengan cairan yang dihasilkan oleh kelenjar-kelenjar pencernaan atau sekresi dari saluran pencernaan itu sendiri. Jika makanan mengandung cukup nutrisi yang dapat dicerna, maka volume makanan yang pertama kali ditelan akan lebih banyak diserap sehingga volume yang dibuang sebagai zat sisa dalam feses menjadi sangat sedikit.



Gambar 3.12. Mekanisme pencernaan karbohidrat, lipid, protein dan asam nukleat beserta enzim yang terlibat (Chambel dkk, 2008: 887)

BAB IV

METABOLISME ENERGI

Pencarian makanan, pembangkitan panas tubuh, pemberian respon terhadap stimulus eksternal dan semua aktivitas hewan lainnya, bergantung kepada berbagai reaksi kimia yang berlangsung dalam setiap sel tubuh. Di dalam sel, senyawa berupa karbohidrat, lemak dan protein, mengalami katabolisme menjadi senyawa yang lebih sederhana, yang selanjutnya akan diproses sedemikian rupa sehingga menghasilkan ATP dan sejumlah zat sisa metabolisme.

Pada bab ini diharapkan anda dapat menjelaskan ruang lingkup metabolisme, konsep penting energi, metabolisme oksidatif karbohidrat, lipid dan protein, kontrol enzimatik dan metabolisme basal.

4.1. Ruang Lingkup Metabolisme

Metabolisme merupakan keseluruhan reaksi biokimia yang diperlukan untuk merubah bahan makanan yang telah diperoleh dari hasil pencernaan untuk dapat digunakan oleh tubuh. Sebagai mana telah dipaparkan di bab sebelumnya tentang pencernaan makanan, jenis nutrisi yang dicerna dan akan digunakan oleh tubuh terbagi menjadi enam kategori yaitu karbohidrat, protein, lipid, mineral, vitamin, dan air. Zat-zat makanan ini dicerna menjadi substansi-substansi yang sederhana sebelum diserap oleh jaringan tubuh. Substansi-substansi tersebut sebagian besar akan terlibat dalam berbagai reaksi biokimia dalam tubuh dalam rangka menghasilkan energi dan menjaga stabilitas fisiologis tubuh. Pada

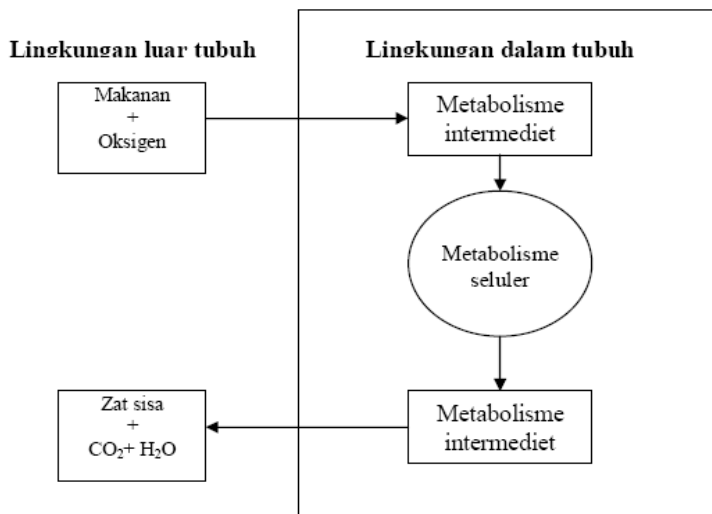
bab ini hanya akan disinggung secara garis besar tentang metabolisme agar menunjang pemahaman yang lebih baik mengenai proses-proses fisiologis seluler yang sangat terkait dengan mekanisme kerja tubuh hewan.

Metabolisme mutlak diperlukan untuk menjaga homeostasis kimiawi tubuh. Energi metabolisme diperlukan untuk mencerna nutrisi, yang kemudian akan menghasilkan energi yang lebih besar pula dari nutrisi yang dicerna sehingga dapat digunakan untuk menjalankan proses-proses kehidupan yang vital lainnya. Penggunaan energi sebagian besar adalah untuk mempertahankan temperatur tubuh agar tetap konstan (khususnya pada hewan berdarah panas). Energi juga diperlukan untuk kontraksi otot, sintesis protoplasma baru selama proses pertumbuhan dan perbaikan jaringan, dalam transmisi impuls, dan kerja fisiologis lainnya.

Secara umum, proses metabolisme energi terbagi menjadi dua kategori yaitu (a) **anabolisme** dimana substansi sederhana dikonversi menjadi substansi kompleks, dan (b) **katabolisme** yang melibatkan reaksi penguraian atau degradasi molekul kompleks menjadi molekul sederhana yang disertai pelepasan energi. Sebagian energi yang diperoleh dari metabolisme akan terbuang ke lingkungan terutama melalui proses ekskresi (misalnya pengeluaran feses dan urine). Sebagian lagi akan dimanfaatkan sedemikian rupa sehingga dianggap sebagai energi yang dapat dimetabolisme. Energi tersebut diperlukan sebagai energi netto dalam proses-proses fisiologis vital, dan yang lainnya untuk mempertahankan aksi dinamik spesifik misalnya menjaga posisi tubuh dan sebagainya.

Proses metabolisme energi berlangsung pada level seluler sehingga disebut juga dengan **metabolisme seluler**. Selain itu ada juga istilah **metabolisme intermediet** yaitu reaksi-reaksi biokimia yang berlangsung di luar sel. Keseluruhan reaksi biokimia tersebut sebagian besar saling berhubungan satu sama lain namun dengan berbagai mekanisme dan unit-unit yang terlibat berbeda-beda sesuai dengan jenis reaksinya. Di dalam sel, molekul-molekul organik akan mengalami perombakan dan sintesis secara kontinyu

dimana beberapa molekul akan dipecah sedangkan molekul-molekul lainnya dirakit menjadi unit struktural. Agar proses fisiologis tubuh berlangsung normal, semua proses biokimia tersebut harus berada dalam suatu kondisi yang stabil (*steady state*) dimana laju anabolisme harus seimbang dengan laju katabolisme. Dengan kondisi demikian, tubuh akan tetap stabil dan proses perombakan dan biosintesis akan tetap berlangsung. Pada hewan yang masih sangat muda dan dalam masa pertumbuhan, anabolisme harus lebih tinggi dari pada katabolisme.



Gambar 4.1. Alir sederhana dari metabolisme intermediet dan metabolisme seluler

4.2. Konsep Energi

Energi didefinisikan sebagai kemampuan untuk melakukan kerja atau menimbulkan perubahan dan dapat diukur menurut jumlah kerja yang dilakukan selama terjadi perubahan. Semua perubahan fisika dan kimia selalu berkaitan erat dengan distribusi energi (terpakai atau dihasilkan). Sesuai hukum termodinamika, bahwa energitidak dapat diciptakan dan dimusnahkan tetapi energi dapat

berubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Misalnya energi kimiawi yang terkandung dalam bahan makanan berupa karbohidrat akan dapat dirubah menjadi energi spesifik yang digunakan oleh hewan untuk menggerakkan otot-otot tubuhnya sehingga dapat beraktivitas.

Ada beberapa jenis energi yang sangat erat kaitannya dengan proses fisiologi yaitu energi kinetik molekuler, energi potensial, dan energi aktivasi. **Energi kinetik** berkaitan dengan pergerakan molekuler. Hasil dari pergerakan molekuler biasanya akan menimbulkan panas tubuh bagi hewan karena adanya pergerakan yang aktif dari molekul-molekul pada kondisi di atas suhu mutlak. **Energi potensial** adalah energi yang berkaitan dengan energi yang terkunci dalam struktur molekuler. Energi tersebut dapat dilepaskan selama reaksi berlangsung dimana ikatan kimiawi dipecah atau dibentuk kembali. **Energi aktivasi** adalah energi yang diperlukan untuk mengganggu kesetimbangan gaya atau kekuatan dalam molekuler misalnya asam lemak atau glukosa agar terjadi pemutusan ikatan-ikatan atom antar molekuler tersebut dapat terjadi melalui mekanisme selanjutnya. Energi aktivasi erat kaitannya dengan energi kinetik molekuler dimana jika energi kinetik rendah (misalnya molekuler berada pada suhu rendah) maka energi aktivasi akan dibutuhkan dalam jumlah lebih besar sehingga terjadi reaksi-reaksi yang penting bagi proses biokimia dalam tubuh. Masing-masing molekuler organik memiliki potensi energi yang berbeda-beda sehingga energi yang dihasilkan dalam perombakannya juga akan berbeda.

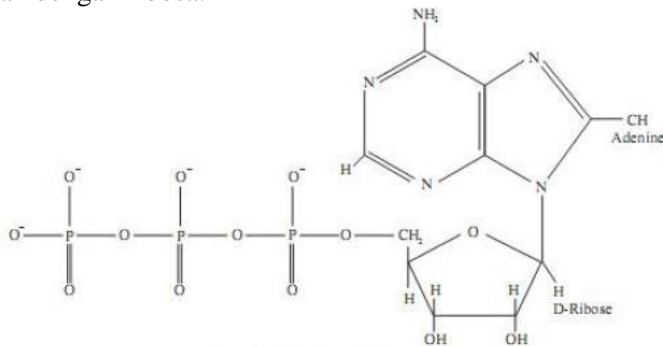
Tabel. 4.1. Kandungan energi dalam bahan makanan

Senyawa	Kandungan Energi (dihitung dari 1 g makanan)	
	Dalam Kalorimeter Bomb	Dalam tubuh
Karbohidrat	4.3 kkal	4.1 kkal
Protein	5.6 kkal	4.1 kkal
Lipid	9.3 kkal	9.3 kkal

(Rastogi, 2007: 94)

Karbohidrat dan lipid dapat mengalami metabolisme secara keseluruhan menjadi air dan karbondioksida sekaligus menghasilkan energi (ATP), sedangkan protein tidak. Jumlah energi yang dapat dihasilkan dari metabolisme lipid paling besar dibandingkan dengan senyawa protein dan glukosa. Pada dasarnya protein menyimpan energi yang relatif lebih tinggi dari pada karbohidrat tetapi karena tidak semua molekulnya dapat mengalami metabolisme maka energi akhir yang dihasilkan akan lebih rendah dari seharusnya. Energi yang dihasilkan oleh metabolisme karbohidrat, protein, dan lipid yang dapat digunakan untuk aktivitas fisiologis hewan adalah dalam bentuk **ATP** (adenosin trifosfat).

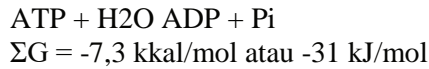
ATP adalah salah satu nukleotida yang dapat ditemukan pada asam nukleat yang memiliki basa nitrogen adenin dan berkaitan dengan ribosa, sebagaimana sebuah nukleotida adenin pada RNA. Perbedaannya adalah pada RNA hanya terdapat satu gugus fosfat yang menempel pada ribosa sedangkan pada ATP terdapat satu rantai yang tersusun atas 3 gugus fosfat yang berkaitan dengan ribosa.



Gambar 4.2. Struktur molekul ATP yang menjadi sumber energi utama dalam sel

Ikatan antara fosfat pada ekor ATP dapat diputus melalui proses hidrolisis. Pada proses ini, satu molekul fosfat anorganik terlepas dari molekul ATP dan selanjutnya ATP berubah menjadi

ADP (adenosin difosfat). Reaksi ini bersifat eksorgenik dan melepaskan energi sebesar 7,3 kkal untuk tiap satu molekul ATP yang terhidrolisis. Secara ringkas, reaksi hidrolisis tersebut adalah sebagai berikut :



4.3. Metabolisme Oksidatif Molekul Organik

Hewan pada dasarnya tidak dapat mengkonsumsi energi secara langsung dari molekul energetik seperti karbohidrat atau lipid, tetapi sel akan mentransfer molekul tersebut ke dalam suatu sistem reaksi oksidasi yang kompleks dan spesifik. Reaksi biokimia dalam tubuh hewan secara garis besar terbagi atas empat grup yang kesemuanya terlibat dalam proses fisiologis untuk memperoleh energi yang dapat digunakan oleh sel. Pembagian tersebut meliputi:

1. Reaksi digestif atau reaksi pencernaan yang sebenarnya, yaitu reaksi hidrolisis dimana molekul kompleks dipecah-pecah menjadi sub unit yang lebih sederhana dan kecil. Contoh reaksi ini adalah pemecahan karbohidrat, pati dan protein dalam sistem pencernaan.
2. Reaksi sintesis yaitu reaksi dimana molekul-molekul kecil dikombinasikan untuk membentuk molekul yang lebih besar dan disertai dengan pelepasan air.
3. Reaksi transfer yaitu reaksi dimana satu bagian dari suatu molekul ditransfer kepada molekul lainnya.
4. Reaksi oksidasi-reduksi

Oksidasi secara akurat tidak dapat didefinisikan karena memiliki berbagai alternatif. Tetapi, suatu senyawa dapat dikatakan mengalami oksidasi jika beberapa kejadian berikut berlangsung, yaitu :

- a. Jika suatu molekul atau senyawa kehilangan satu atau lebih elektronnya, misalnya Fe^{2+} menjadi Fe^{3+}

- b. Jika suatu molekul atau senyawa kehilangan satu atau lebih atom hidrogennya, misalnya $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ menjadi CH_3CHO dan melepaskan 2H^+
- c. Jika satu atau lebih atom oksigen ditambahkan ke dalam ikatan atau senyawa, misalnya CH_3CHO menjadi CH_3COOH karena penambahan 1 atom O.

Semua reaksi kimia dalam sel hewan sangat bervariasi dan kompleks, tetapi tidak terlepas dari ketiga kondisi reaksi oksidasi tersebut.

A. Metabolisme Oksidatif Karbohidrat

Karbohidrat mengalami metabolisme yang kompleks yang dimulai dari pemecahannya melalui reaksi digestif dalam sistem pencernaan menjadi molekul monosakarida terutama glukosa. Berikut ini adalah rincian dari penggunaan karbohidrat dalam tubuh hewan secara fisiologis setelah melalui reaksi digestif.

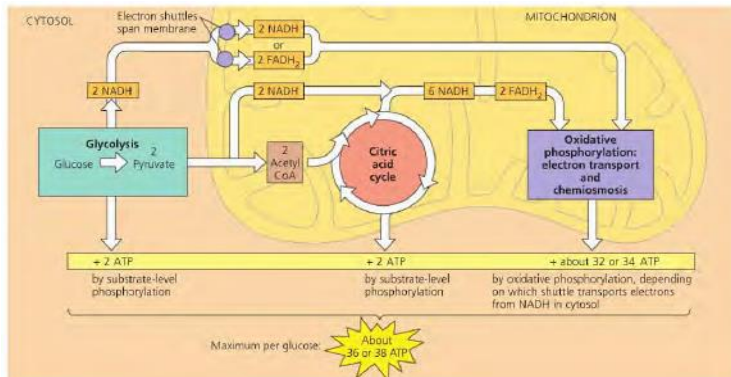
- a. Gula sederhana hasil pencernaan karbohidrat dalam bentuk glukosa, fruktosa, dan laktosa akan diabsorpsi dan menjadi gula darah.
- b. Glukosa akan diabsorpsi dari darah untuk kemudian dikonversi di hepar menjadi glikogen sebagai cadangan sumber energi.
- c. Seluruh monosakarida dapat mengalami perubahan menjadi glikogen di otot.
- d. Monosakarida juga dapat ditransformasi menjadi lemak dan disimpan dalam jaringan adiposa.
- e. Sebagian glukosa akan segera dioksidasi untuk produksi energi.
- f. Sebagian gula akan diekskresikan melalui urine.

Berkaitan dengan kebutuhan energi dari proses metabolisme, maka kajian difokuskan pada proses oksidasi glukosa menjadi sumber energi (ATP). Reaksi ini terdiri atas glikolisis di sitoplasma dan siklus krebs di mitokondria serta rantai transfer elektron yang pada akhirnya akan menghasilkan ATP yang esensial bagi kelangsungan aktivitas seluler. Dalam suatu oksidasi yang lengkap, satu molekul glukosa yang diperoleh dari pemecahan karbohidrat, akan menghasilkan sebanyak 38 ATP.

Sebagai suatu bentuk pengontrolan terhadap level ketersediaan karbohidrat dalam bentuk glukosa dalam tubuh,

khususnya dalam sistem peredaran darah hewan, maka terdapat mekanisme spesifik yang meregulasi kadar glukosa dalam darah. Dalam hal ini, glukosa dapat mengalami beberapa proses yaitu perubahan menjadi glikogen dihati, glikogen di otot, atau dioksidasi untuk menghasilkan energi melalui glikolisis lengkap. Selain itu glukosa juga dapat dikonversi menjadi lemak seperti yang telah disebutkan sebelumnya. Proses regulasi kadar glukosa dalam tubuh melibatkan berbagai hormone, reaksi katabolisme dan anabolisme dimana energi dapat dihasilkan atau dibutuhkan. Tabel 4.2. Jumlah ATP yang diperoleh selama proses oksidasi glukosa yang sempurna

Sekuens reaksi	ATP yang dihasilkan
1. Prombakan glukosa menjadi asam piruvat	2
2. Dekarboksilasi asam piruvat	6
3. Sistem transpor elektron	6
4. Proses dalam siklus krebs	24
Total	38



Gambar 4. 3. Mekanisme oksidatif glukosa (Champbell dkk, 2008:)

B. Metabolisme Oksidatif Protein

Metabolisme oksidatif protein terdiri atas transformasi esensial dari asam amino yang diabsorpsi melalui saluran pencernaan untuk kemudian dikonversi di dalam hati. Kebanyakan protein dapat disintesis di dalam tubuh dari asam amino yang diperoleh dalam bentuk makanan (asam amino esensial). Akan tetapi beberapa diantaranya juga disintesis dari asam amino yang disintesis sendiri oleh tubuh (kelompok asam amino non esensial).

Tabel 4.3. Asam amino esensial dan non esensial

<i>Essential</i>	<i>Non-essential</i>
Threonine	Glycine
Valine	Alanine
Leucine	Serine
Isoleucine	Aspartate
Methionine	Glutamic acid
Phenylalanine	Proline
Histidine	Hydroxyproline
Tryptophan	Arginine
Lysine	
Arginine	
*Cysteine	
*Cystine	
*Tyrosine	

Asam amino juga dapat dioksidasi untuk menghasilkan energi selain digunakan untuk pembentukan senyawa-senyawa non protein. Tubuh hewan tidak dapat menyimpan asam amino dan protein dalam jumlah yang besar karena dikonversi menjadi senyawa lainnya seperti karbohidrat, lemak, dan lain-lainnya. Seluruh asam amino yang diabsorpsi akan diambil dari darah oleh hati dan otot sehingga konsentrasi rata-rata dalam darah hanya sekitar 6 mg/100 mL. Level ini akan dijaga untuk tetap konstan kendati senyawa lainnya yang berkaitan seperti urea akan mengalami peningkatan.

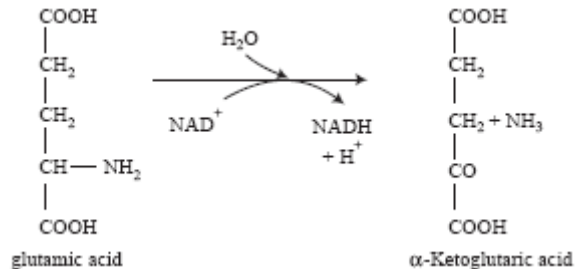
Proses deaminasi terhadap asam amino berlangsung di hati, ginjal, dan mukosa usus, sedangkan pembentukan urea hanya berlangsung di hati. Dalam proses tersebut, amonia akan digabungkan di mukosa usus dan ginjal dan akan menuju ke dalam sirkulasi darah dalam bentuk asam amino glutamin. Dengan demikian akan sangat sedikit sekali amonia ditemukan dalam darah

karena telah dirubah menjadi asam amino glutamin. Amonia yang diproduksi sebagai hasil dari deaminasi asam amino akan dikonversi menjadi urea di hati yang selanjutnya akan diekskresikan ke luar tubuh.

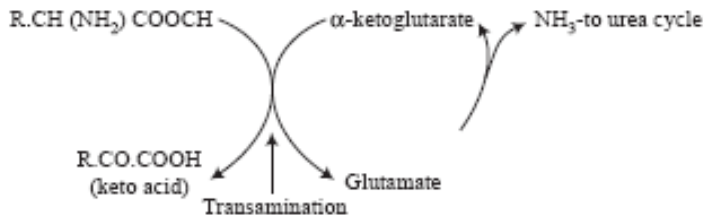
Berbagai macam asam amino akan memasuki siklus krebs dengan berbagai jalur, dengan melibatkan reaksi transaminasi. Asam amino valine, treonin, dan alanin dapat dikonversi menjadi asam piruvat dan menjadi prekursor dalam siklus krebs. Reaksi reversibel transaminasi dari alanin menjadi asam piruvat. Asam piruvat selanjutnya akan menjadi prekursor dalam siklus krebs untuk memproduksi ATP dapat dilihat pada reaksi berikut.



Sedangkan asam amino glutamin dapat dikonversi menjadi asam alfa ketoglutarat yang merupakan bagian senyawa intermediet dalam siklus krebs di mitokondira sehingga dapat juga menjadi jalur sintesis ATP. Jalur transaminasi dari asam amino glutamin untuk menjadi asam alfa ketoglutarat yang nantinya menjadi bagian dari siklus krebs dalam rangka menghasilkan ATP dapat dilihat pada reaksi berikut.



Jalur perubahan glutamat menjadi asam alfa ketoglutarat dengan reaksi yang lebih kompleks sehingga dihasilkan asam alfa ketoglutarat yang akan menjadi bagian dari siklus krebs menghasilkan ATP. Selain itu, glutamat juga dapat mengalami konversi menjadi asam alfa ketoglutarat sehingga terlibat dalam siklus sintesis energi. Glutamat dapat dikonversi menjadi asam oksaloasetat yang merupakan unit intermediet dalam siklus krebs.



C. Metabolisme Oksidatif Lipid

Lipid merupakan kandungan protoplasma yang penting. Senyawa ini ada yang terdapat di dalam makanan secara langsung dan ada yang disintesis di dalam tubuh. Secara struktural, lipid sangat kompleks dimana deposit lipid merupakan bentuk umum pelindung mekanis tubuh. Dalam metabolisme lipid, terlibat tiga proses utama yaitu :

- Mobilisasi lipid dari tempat penyimpanannya di dalam tubuh menuju tempat terjadinya katabolisme.
- Absorpsi lipid dari pencernaan.
- Sintesis lipid di hati yang berasal dari mukosa usus dan jaringan adipose, sebagai sumber karbohidrat dan protein.

Dalam jalur yang umum, lipid akan dikonversi menjadi glikogen di hati yang pada akhirnya dapat terlibat dalam siklus produksi ATP melalui berbagai cara yang kompleks. Hati memegang peran kunci dalam metabolisme lipid dalam kondisi terjadinya penurunan karbohidrat (glukosa tubuh). Semua lipid di dalam tubuh akan dimobilisasi ke hati untuk menjadi sumber

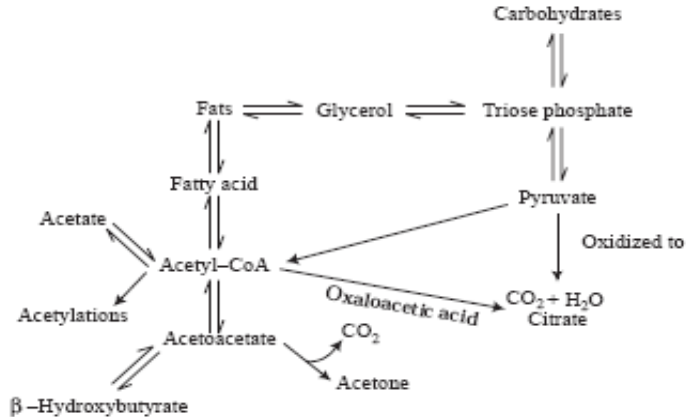
energi alternatif. Hati secara normal bukanlah akumulator lipid dimana kadar lipid di hati dijaga konstan pada kisaran antara 3-8%. Jika terjadi kelebihan lipid di hati maka akan segera dikonversi menjadi substansi lain melalui mekanisme interkonversi menjadi gula yang dapat dimetabolisme menjadi energi. Disamping sebagai tempat interkonversi berbagai substansi lipid, karbohidrat dan protein, hati juga bertanggung jawab dalam transformasi lipid menjadi fosfolipid dan kolesterol, desaturasi asam lemak, dan oksidasi asam lemak.

Lemak khususnya trigliserida akan dihidrolisis menjadi asam lemak dan gliserol sebelum diproses melalui jalur katabolisme menghasilkan sumber energi. Seluruh proses hidrolisis asam lemak berlangsung di jaringan adiposa, sedangkan asam lemak bebas (*free fatty acid* atau *FFA*) diproduksi di dalam plasma. FFA akan mencapai jaringan di hati, ginjal, jantung, otot, testis, otak dan jaringan adiposa dimana oksidasi berlangsung. Asam lemak rantai panjang secara sistematis akan dipecah menjadi asam asetat aktif dan akan dimetabolisme melalui jalur yang panjang.

Metabolisme lipid akan menghasilkan berbagai senyawa intermediet yang menjadi prekursor atau bagian dari siklus sintesis ATP (siklus krebs). Lipid yang dihidrolisis menjadi gliserol dapat mengalami konversi menjadi piruvat dengan reaksi yang panjang dan piruvat ini akan menjadi prekursor siklus krebs. Asam lemak akan membentuk asetil Co A yang juga merupakan bagian penting dalam siklus sintesis energi. Jalur selanjutnya juga memungkinkan terbentuknya asam oksaloasetat yang menjadi bagian dalam siklus krebs.

Asam lemak sebagian besar dioksidasi melalui suatu proses spesifik yang menghasilkan energi sangat tinggi yang disebut jalur beta oksidasi di mitokondria. Asam lemak melalui mekanisme oksidatif yang kompleks akan dikonversi menjadi molekul asetat. Molekul asetat dapat dioksidasi secara sempurna melalui siklus krebs atau digunakan untuk mensintesis glukosa dan karbohidrat kompleks lainnya sesuai kebutuhan tubuh hewan. Jalur katabolisme lipid menjadi berbagai senyawa intermediet yang

penting dalam sintesis energi (siklus krebs) bagi aktivitas fisiologis tubuh dapat dilihat sebagai berikut.



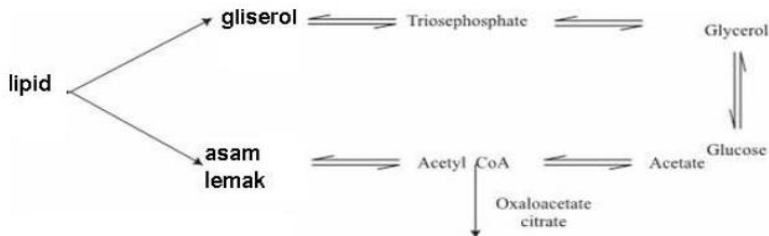
Gambar 4. 4. Jalur katabolisme lipid

Jumlah ATP yang dapat dihasilkan dari beta oksidasi asam lemak dapat mencapai 130 ATP, sementara oksidasi glukosa yang lengkap melalui glikolisis dan siklus krebs hingga transfer elektron yang hanya menghasilkan 38 ATP. Hal inilah yang menjadi salah satu dasar bahwa lipid memiliki potensi energi lebih besar dibandingkan senyawa karbohidrat dan protein. Secara sederhana, rincian dari tahapan reaksi beta oksidasi dari salah satu asam lemak yaitu asam palmitat, disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.4. Jumlah ATP yang dihasilkan dari reaksi beta oksidasi asam lemak palmitat

Sekuens reaksi	ATP yang dihasilkan
Pembentukan asetil CoA, FADH ₂ , NADH, H ⁺	35 ATP
Oksidasi asetil CoA melalui siklus krebs	96 ATP
Pemakaian ATP untuk aktivasi reaksi awal	- 1 ATP
Total ATP	130 ATP

Gliserol yang merupakan salah satu produk hidrolisis lipid akan dimetabolisme atau digunakan oleh organ atau jaringan yang mempunyai banyak enzim-enzim gliserol kinase, seperti hati, ginjal, mukosa usus dan glandula mammae. Sedangkan otot dan jaringan adiposa sangat sedikit memperlihatkan aktivitas tersebut. Gliserol sebagian besar dikonversi menjadi karbohidrat melalui pembentukan gliserolfosfat. Gliserol fosfat selanjutnya dioksidasi menjadi triosa fosfat melalui jalur yang kompleks yang pada akhirnya akan membentuk glikogen melalui proses glikogenesis. Akan tetapi, triosa fosfat juga dapat dioksidasi menjadi asam piruvat melalui jalur glikolisis. Pada tahap lebih rumit, gliserol dapat dikonversi menjadi asam lemak dan akan memasuki jalur metabolisme asam lemak yang sangat potensial memproduksi ATP. Jalur metabolisme gliserol yang salah satunya akan memasuki fase pembentukan energi yaitu glikolisis dan siklus krebs melalui pembentukan senyawa intermediet seperti asetil Co A dan asam oksaloasetat dapat dilihat pada gambar berikut.



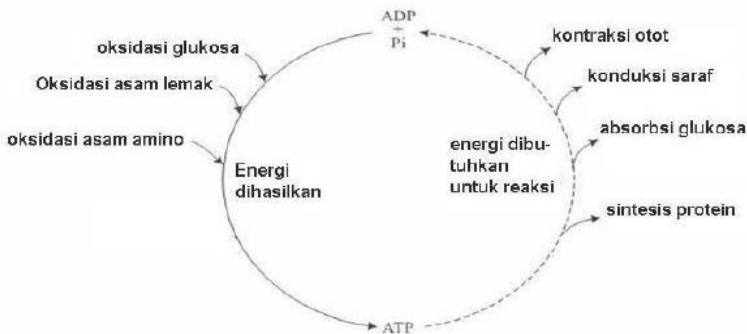
Gambar 4. 5. Jalur metabolisme gliserol

4.4. Penggunaan Energi dan Kontrol Enzimatis

Sejumlah besar energi yang dihasilkan dari reaksi katabolisme dalam tubuh (metabolisme seluler) akan dimanfaatkan oleh tubuh untuk berbagai kepentingan fisiologis sehingga proses kehidupan dapat terus berlangsung. Energi dari ATP sangat dibutuhkan sehingga laju produksi ATP juga harus seimbang atau lebih tinggi dari jumlah yang terus dipakai oleh berbagai sistem fisiologis. Jika

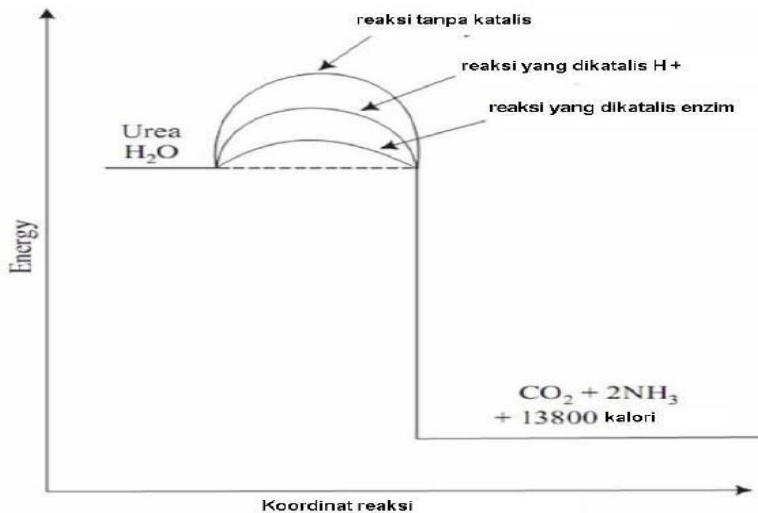
tidak terapat kontrol spesifik, maka berbagai proses penggunaan energi ATP akan berlangsung dengan efisiensi yang rendah dan berbagai reaksi biokimia dalam tubuh akan berlangsung dengan energi aktivasi yang besar. Oleh sebab itu, keberadaan enzim sebagai biokatalisator sangat diperlukan sehingga mengefisienkan pemanfaatan energi yang tersedia dengan tanpa menghambat kelangsungan proses fisiologis. Bahkan keberadaan enzim justru akan meningkatkan laju aktivitas tersebut secara sistematis.

Secara kimiawi, enzim adalah kompleks molekul protein yang disintesis di dalam sel. Keberadaan enzim sebagai biokatalisator sangat penting terutama untuk melangsungkan reaksi-reaksi biokimia metabolisme yang seharusnya berjalan pada temperatur yang lebih tinggi jika tanpa katalisasi. Umumnya enzim dalam sistem tubuh akan bekerja pada temperatur fisiologis yang cukup rendah (sekitar 37°C). Reaksi yang sama jika berlangsung secara invitro memerlukan suhu yang jauh lebih tinggi. Dengan keberadaan enzim, reaksi dapat berjalan di dalam tubuh pada temperatur yang aman, tekanan yang rendah, dan dalam larutan yang encer. Enzim memiliki spesifisitas dan kinetika yang khusus sehingga memungkinkannya untuk terlibat dalam reaksi untuk mempercepat reaksi dengan tanpa mengalami perubahan dalam formasinya ketika reaksi berakhir. Secara ringkasnya, enzim akan menjamin keberlangsungan reaksi biokimia secara seimbang.



Gambar 4.6. Siklus umum dalam produksi dan penggunaan energi ATP dalam aktivitas fisiologis

Pada berbagai reaksi, jika reaksi tanpa dikatalis maka kebutuhan energi untuk reaksi tersebut sangat tinggi dan reaksi akan berjalan lambat. Jika katalis reaksi adalah ion hidrogen (H^+) maka reaksi sedikit lebih efisien menggunakan energi. Hal terbaik adalah reaksi yang dikatalis oleh enzim dimana reaksi dapat berlangsung secara cepat dan energi yang diperlukan juga paling rendah. Sebagai contoh berikut ini pada gambar berikut adalah perbandingan kebutuhan energi dalam reaksi perubahan urea menjadi amoniakan CO_2 yang berlangsung dalam metabolisme asam amino (protein) di tubuh hewan.



Gambar 4.7. Perbandingan efisiensi energi dalam reaksi yang dikatalis oleh enzim dengankatalis lainnya (H^+) dan tanpa katalis.

Sel-sel tubuh hewan memiliki sejumlah besar enzim yang tidak berfungsi secara simultan. Keberadaannya dan aktivitasnya mengikuti pola regulasi tertentu sesuai dengan kebutuhan sel. Beberapa enzim berada dalam bentuk tidak aktif dan kendatipun diaktivasi oleh kondisi yang memungkinkan, enzim tersebut tetap tidak akan berpartisipasi dalam aktivitas katalis (contohnya pepsin

dan kimotripsin). Kerja spesifik enzim ini akan bermanifestasi kepada kontrol metabolisme tubuh selain juga bekerja sama secara sinergis dengan hormon. Kerja enzim akan sangat spesifik bergantung kepada kuantitas substrat dan produk hasil reaksi. Dengan demikian, jika produk reaksi metabolisme tubuh telah mencapai suatu batas tertentu maka kerja enzim akan menurun sehingga secara sistematis laju metabolisme juga akan menurun. Hal sebaliknya juga akan terjadi jika jumlah produk atau ketersediaan produk yang diperlukan oleh tubuh menurun maka enzim akan aktif bekerja. Secara sederhana mekanisme kontrol enzim terhadap laju metabolisme tubuh berlangsung melalui mekanisme umpan balik (feedback) sehingga reaksi enzimatik dapat berjalan sedemikian rupa dalam kesetimbangan yang kontinyu.

4. 5. Metabolisme Basal

Kebutuhan energi dalam tubuh hewan dapat dikaji melalui dua parameter fungsional yaitu kebutuhan energi untuk metabolisme basal dan energi yang diperlukan untuk kerja aktif. Metabolisme basal meliputi energi yang dipakai dalam respirasi, sirkulasi darah, kontak lambung dan usus, aktivitas berbagai organ lain, pemeliharaan kerja otot, dan termoregulasi dan lainnya. Laju metabolisme basal (BMR : *Basal Metabolic Rate*) dipengaruhi oleh jumlah massa protoplasma, tinggi dan berat badan, luas area permukaan tubuh, umur, seks, komposisi jaringan, kondisi kesehatan dan lainnya. Proses ini juga dikomandoi oleh kerja organ endokrin khususnya oleh tiroid dan pituitari (hipofisis).

Energi yang dikonsumsi dalam kondisi kerja aktif dan ditambah dengan seluruh bentuk aktivitas sadar (*voluntary works*) menjadi total kebutuhan energi diluar kebutuhan energi metabolisme basal. Energi kerja aktif ini dipengaruhi oleh intensitas dari masing-masing kerja tubuh. Sebagai gambaran, biasanya rata-rata pria akan menghabiskan sekitar 100 kkal per jam ketika duduk dalam kondisi santai, dan metabolismenya akan meningkat sekitar 6 kali lipat dengan kegiatan fisik yang lebih

aktif. Pada orang sehat, kebutuhan energi ditentukan oleh jumlah kebutuhan energi basal, aktivitas fisik dan energi yang diperlukan untuk mencerna. Energi yang diperlukan untuk mencerna dikenal sebagai efek kalorigenik makanan (*calorigenic effect of food*) yang umumnya setara dengan sekitar 10% dari kebutuhan energi basal total.

BMR adalah suatu ukuran dari produksi panas yang dihasilkan oleh tubuh dalam kondisi istirahat total baik secara mental maupun fisik dan dalam keadaan setelah proses pencernaan (tidak sedang dalam proses mencerna makanan di lambung). BMR merepresentasikan jumlah energi terendah yang dihabiskan dengan aktivitas fisik minimal dan merefleksikan jumlah energi yang diperlukan untuk menjaga fungsi dasar fisiologis. BMR dinyatakan dalam bentuk panas yang dihasilkan per jam per m² tubuh. Untuk dapat mengukurnya, harus dilakukan pada kondisi 12 jam setelah makan dan subjek yang diukur harus istirahat total pada suhu 20°C sebelum estimasi BMR dilakukan. BMR dihitung dari nilai *respiratory quotient* (RQ) dalam satu satuan waktu tertentu. RQ merupakan rasio perbandingan antara jumlah CO₂ yang dihasilkan dengan jumlah oksigen yang dihirup dalam satu satuan waktu tertentu.

Sebagai mana telah disebutkan sebelumnya bahwa terdapat banyak faktor yang mempengaruhi nilai BMR. Individu yang lebih kecil memiliki laju metabolisme yang lebih tinggi, BMR rendah pada betina dan tinggi pada juvenil. Pada manusia, nilai BMR akan meningkat secara drastis dari sejak lahir hingga usia 1.5 tahun dan selanjutnya akan terjadi penurunan secara gradual hingga tercapainya pertumbuhan dan perkembangan yang maksimal. Karakteristik BMR akan konstan pada orang dewasa dan akan menurun pada saat tua. Wanita akan memiliki BMR lebih rendah 12% dibawah pria. Perbedaan-perbedaan nilai BMR ini sangat terkait erat dengan proses metabolisme energi yang berlangsung di dalam tubuh atau lebih spesifiknya pada laju dan kuantitas energi yang diperlukan oleh tubuh untuk menjamin keberlangsungan hidup secara normal. BMR dan kebutuhan energi total akan sangat bervariasi antarindividu dalam spesies yang sama.

Tabel 4.6. Konsumsi oksigen (dalam liter) dan produksi panas dalam kalori/jam/m² tubuh manusia yang merupakan nilai BMR

Umur (Tahun)	Pria		Wanita	
	konsumsi ¹ O ₂	Kalori	Konsumsi ¹ O ₂	Kalori
14-15	9.53	45.9	8.91	42.9
16-17	8.91	42.9	8.29	39.9
18-19	8.50	40.9	7.88	37.9
20-29	8.19	39.4	7.67	36.9
30-39	8.19	39.4	7.57	36.4
40-49	7.98	38.4	7.46	35.9
50-59	7.77	37.4	7.25	34.9
60-69	7.57	36.4	7.05	33.9

Rastogi, 2007: 97

Tabel 4.7. Nilai standar dari produksi energi menurut jenis kelamin dan umur pada manusia

Age year	Kilocalories/m ² /hour	
	Males	Females
6	53.0	50.6
7	52.4	49.1
8	51.8	47.0
10	48.5	45.8
12	46.8	44.3
14	46.4	41.5
16	45.7	38.9
18	43.3	37.0
20	41.8	36.2
25	40.4	35.9
30	39.6	35.8
35	38.9	35.7
40	38.2	35.0
50	37.0	34.5
60	35.8	33.0

Rastogi, 2007: 98

BAB V SISTEM SIRKULASI

Hewan harus mampu melaksanakan aktivitas transportasi nutrien, gas dan produk sisa metabolisme serta molekul-molekul padat atau cair di dalam tubuhnya. Pada bab ini akan dibahas mengenai mekanisme bekerjanya aliran darah yang melibatkan banyak unit-unit fisiologis yang tercakup sebagai sistem peredaran darah. Pada hewan-hewan tingkat rendah, unit-unit dari sistem sirkulasi belum spesifik seperti hewan tingkat tinggi, akan tetapi konsep kerjanya tetap sama atau hampir sama. Kelompok hewan yang belum memiliki organ-organ spesifik dalam sistem sirkulasi disebut dengan kelompok yang belum terspesialisasi. Pada Cnidaria dan cacing pipih misalnya, sistem sirkulasi dilakukan dengan mekanisme gastrovaskular yang berperan sekaligus sebagai sistem pencernaan dan sistem sirkulasi internal dengan cara difusi sederhana. Pada Protozoa bersilia yang hidup sesil menyelenggarakan sirkulasi cairan tubuhnya dengan kanoanosit.

Pada bab ini diharapkan anda mampu menjelaskan tipe-tipe jantung, darah, komponen sistem sirkulasi, struktur dan mekanisme sistem sirkulasi terbuka dan tertutup, sirkulasi pada ikan, katak, reptil, aves dan mamalia, serta mekanisme pengendalian saraf pada jantung dan pembuluh darah.

5.1. Fungsi Sistem Sirkulasi

Sistem peredaran darah atau sirkulasi mempunyai fungsi sebagai berikut:

- a. Menjamin terpenuhinya kebutuhan akan nutrien, dan pembuangan zat sisa metabolisme dari tubuh dengan segera.
- b. Berperan penting dalam penyebaran panas tubuh.
- c. Mengangkut oksigen dari paru-paru atau insang ke seluruh jaringan tubuh.
- d. Mengangkut karbondioksida dari seluruh jaringan tubuh ke paru-paru atau insang.
- e. Mengangkut hormon dari kelenjar endokrin ke organ sasaran

Fungsi sistem peredaran darah di atas pada hakikatnya agar tercapai suatu lingkungan yang sesuai bagi jaringan tubuh. Kondisi medium yang konstan merupakan syarat mutlak bagi kehidupan jaringan. Kondisi yang konstan ini dapat tercapai apabila ada peindahan zat melintasi dinding pembuluh kapiler yang arahnya baik dari darah menuju jaringan atau dari cairan jaringan menuju darah. Inilah yang dikenal dengan homeostasis.

5.2. Komponen Darah

Darah dalam sistem sirkulasi merupakan komponen fisiologis yang menjadi penyokong substansial bagi keberlangsungan proses-proses fisiologis lainnya seperti respirasi, reproduksi dan sistem-sistem lain. Darah merupakan substansi berupa jaringan ikat dengan matriks berupa cairan plasma dan komponen selular berupa sel-sel darah (eritrosit, leukosit, dan trombosit).

A. Plasma Darah

Plasma merupakan cairan matriks dimana sel-sel darah tersuspensi. Secara umum, penyusun plasma adalah air yang mengandung ion-ion dan molekul organik terlarut seperti protein. Komposisi cairan plasma sangat berbeda dengan cairan intraseluler terutama dalam hal kadar natrium dan kalium (sodium dan potasium) yang lebih tinggi dari pada cairan intraseluler. Selain itu juga terdapat berbagai kandungan protein. Kondisi ini berkonsekuensi terhadap

tekanan osmotik plasma. Molekul-molekul protein yang berukuran relatif besar terperangkap dalam plasma darah, sehingga jika jumlah protein lebih tinggi maka tekanan osmotik juga akan tinggi. Tekanan osmotik yang dihasilkan oleh protein tersebut dikenal dengan **tekanan osmotik koloid**. Tekanan osmotik ini akan mempengaruhi pergerakan air melalui membran plasma sel. Kadar air dalam plasma mencapai 92%, protein 8-9% dan garam-garam anorganik 0.9%.

Protein yang terdapat dalam plasma adalah serum albumin, serum globulin dan fibrinogen. Garam-garam anorganik terdapat dalam bentuk anion yaitu Cl^- , CO_3^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{2-} , I^- dan kation yaitu Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan Fe^{2+} . Adapun substansi organik yang lain kecuali protein dan garam anorganik adalah garam amonium, urea, asam urat, kreatinin, kreatin, asam amino, xantin, hypoxantin; kelompok lipid seperti fosfolipid, kolesterol; karbohidrat seperti glukosa; dan gas-gas terlarut seperti oksigen, nitrogen, karbondioksida; substansi-substansi lain seperti hormon, enzim-enzim dan lain-lain.

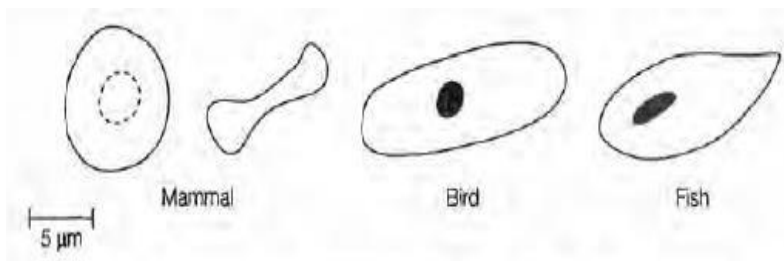
Konsentrasi protein dalam plasma darah dalam berbagai taksa pada kingdom animalia berbeda antar spesies. Sebagai contoh, konsentrasi protein dalam plasma ubur-ubur sekitar 0,5 g/l, sedangkan pada beberapa spesies vertebrata kadarnya mencapai 80 g/l. Hal tersebut mungkin berhubungan erat dengan pola osmotik masing-masing hewan. Ubur-ubur merupakan kelompok **osmokonformer** yang mana cairan tubuhnya memiliki nilai osmolaritas hampir sama dengan lingkungan eksternal, sedangkan vertebrata adalah **osmoregulator** yang tetap mempertahankan osmolaritas cairan tubuhnya dalam batas yang lebih rendah. Dengan demikian, tekanan osmotik koloid merupakan satu faktor yang mempengaruhi pergerakan air dan osmolaritas cairan tubuh hewan.

Protein plasma selain sebagai pengatur tekanan osmotik darah juga berperan dalam regulasi kesetimbangan fisiologis lainnya. Protein plasma dapat membantu mengatur kesetimbangan pH darah, protein plasma darah juga menyebabkan darah menjadi agak kental sehingga dapat mempertahankan tekanan darah yang

penting dalam efisiensi kerja jantung. Selain itu, protein plasma darah merupakan bahan dasar pembuat trefon yang akan menjadi bahan makanan bagi jaringan yang ditumbuhkan dalam kultur medium. Globulin dalam plasma berperan sebagai protein penolak yang dapat melawan antigen yang masuk ke dalam tubuh. Protein plasma juga berfungsi sebagai protein cadangan seandainya protein dalam makanan berkurang. Selain itu, protein plasma terlibat dalam menstabilkan darah, globulin dan fibrinogen mempengaruhi sel darah merah untuk saling berlekatan membentuk **reuleoux**.

B. Eritrosit (Sel Darah Merah)

Eritrosit merupakan komponen sel darah terbesar. Morfologi dan ukuran eritrosit sangat bervariasi diantara spesies hewan. Eritrosit memiliki inti pada kebanyakan vertebrata kecuali pada sebagian besar mamalia yang tidak berinti. Bentuk eritrosit mamalia adalah bulat dan bikonkaf kecuali pada kelompok Camellidae yang berbentuk lonjong. Sedangkan pada kebanyakan vertebrata lainnya bentuk eritrosit adalah lonjong dan bikonfeks. Eritrosit paling besar ditemukan pada amphibi, sedangkan sel eritrosit mamalia dianggap lebih kecil dan spesifik dengan ketiadaan nukleus.



Gambar 5.1. Morfologi eritrosit mamalia, aves dan ikan. Eritrosit mamalia tidak berinti

Secara struktural, eritrosit terdiri atas membran sel, substansi spons yang disebut stroma dan hemoglobin yang berada di dalam ruang-ruang kosong stroma. Membran selnya terdiri atas lipoprotein dengan golongan lipidnya berupa kolesterol, sefalini, dan lesitin sedangkan komponennya adalah stromatin.

Substansi yang dapat larut dalam lipid akan dapat menembus membran eritrosit secara mudah, dan demikian juga sebaliknya jika suatu substansi tidak larut dalam lipid akan sulit menembus membran. Di dalam eritrosit terdapat berbagai senyawa seperti glukosa, enzim katalase, enzim karbonat anhidrase, garam organik dan garam anorganik. Kadar ion kalium relatif lebih tinggi dari pada ion natrium. Keberadaan glukosa dalam eritrosit sangat penting sebagai sumber energi seluler yang akan mempertahankan kelangsungan fungsional eritrosit.

Dikemasnya hemoglobin dalam eritrosit sangat erat kaitannya dengan upaya pencegahan efek viskositas dan tekanan osmotik yang dapat berubah akibat adanya molekul besar seperti hemoglobin jika berada di dalam plasma darah. Dengan terisolasinya letak hemoglobin, maka stabilitas sistem dapat dijaga. Eritrosit tidak dapat membelah kembali setelah dilepas dalam sistem peredaran darah. Umurnya sekitar 120 hari dan akan ditelan oleh fagosit di hati dan limpa setelah waktu tersebut. Semua kandungan besi dalam hemoglobin yang ada di dalam eritrosit akan digunakan kembali.

Tipe-tipe sel darah pada dasarnya sangat beragam diantara filum-filum yang berbeda. Pada echinodermata (misalnya bintang laut, mentimun laut) punya eritrosit dan berbagai sel lainnya yang disebut selomosit. Terdapat bermacam-macam juga tipe selomosit yang berada di dalam coelom atau rongga tubuh misalnya amubosit. Fungsi dari sel-sel tersebut umumnya hampir sama dengan leukosit pada vertebrata yaitu sebagai pertahan atau imunitas. Selain itu juga berperan dalam pembekuan darah. Kebanyakan hewan (misalnya arthropoda, cacing anelida) hanya memiliki sel-sel yang terlibat dalam mekanisme pertahanan semata.

Jumlah eritrosit kandungan hemoglobin di dalam darah berbagai spesies cukup berbeda dan juga pada individu dengan jenis kelamin yang berbeda. Kadar hemoglobin menjadi parameter penting bagi penentuan status normalitas fisiologis yang jika kadarnya rendah merupakan indikator adanya gangguan fungsional

yang cukup signifikan. Pada manusia, rendahnya kadar Hb disebut dengan anemia yang dapat terjadi karena berbagai faktor.

Tabel 5.1. Kuantitas eritrosit dan kadar Hb berbagai spesies hewan

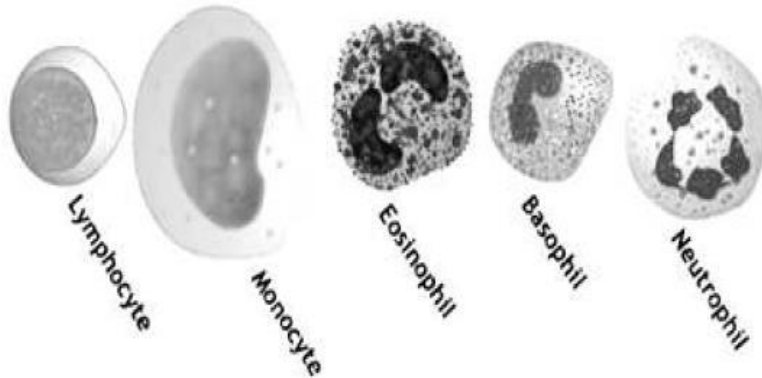
Spesies	Eritrosit (juta/mm ³)	Kadr Hb (g/ml darah)
Kuda	6-8	11-15
Serigala	6.3	12
Biri-biri	10.5	12.5
Kambing	14	10
Anjing	6.5	13
Kucing	7.8	11
Kelinci	6.2	13
Marmot	5.8	14
Tikus	6.8	13

C. Leukosit (Sel Darah Putih)

Leukosit dikenal dengan sel darah putih karena karakter fisiknya yang tidak memiliki warna yang jelas seperti eritrosit yang berwarna merah melainkan hanya putih atau agak kekuningan. Sel darah ini ditemukan dalam darah maupun dalam cairan limfa dan bahkan terkadang terdapat dalam cairan jaringan. Jenis atau tipe-tipenya juga lebih beragam dibandingkan dengan komponen selular darah lainnya. Sintesis leukosit berlangsung di tempat yang berbeda yaitu untuk kelompok granulosit disintesis di sumsum merah tulang sedangkan kelompok agranulosit (monosit dan limfosit) disintesis di nodus limfatikus.

Leukosit dibagi menjadi dua kelompok utama yaitu agranulosit dan granulosit. Tipe granulosit dicirikan dengan adanya lobus-lobus nukleus dan sitoplasmanya mengandung granula-granula, sedangkan tipe agranulosit tidak memiliki granula dalam sitoplasmanya, dapat bergerak secara amuboid, dan melakukan aktivitas diapedesis serta dapat memperbanyak diri dengan cara

mitosis dalam sistem peredaran. Tipe granulosit terdiri atas 3 jenis yaitu neutrofil, basofil, dan eosinofil; sedangkan tipe agranulosit terdiri atas monosit dan limfosit.



Gambar 5.2. Jenis-jenis leukosit dengan struktur spesifiknya yang berbeda satu sama lain

D. Trombosit

Trombosit atau platelet adalah komponen seluler ketiga setelah eritrosit dan leukosit yang terdapat di dalam darah. Trombosit dikenal juga dengan keping darah dengan bentuk agak bulat, tidak bernukleus, tidak memiliki warna, ukuran sangat kecil bahkan paling kecil diantara seluruh komponen seluler darah (1-4 mikron). Kuantitasnya dalam darah manusia sekitar 250-400 ribu per mm^3 darah. Trombosit disintesis dari sel induk di sum-sum tulang yang kemudian berkembang menjadi megakaryoblast.

Peranan penting dari trombosit adalah dalam hal pembekuan darah dengan mekanisme spesifik yaitu :

- Trombosit melepaskan substansi yang mengaktifkan kofaktor tromboplastin sekaligus merubah protrombin menjadi tromboplastin.
- Mempengaruhi retraksi atau pengerutan koagulum atau unit pembekuan. Di dalam trombosit juga terkandung senyawa 5-

hidroksi triptamin atau disebut juga serotonin yang akan dilepaskan selama koagulasi darah.

5.3. Komponen Sistem Sirkulasi

Pada hewan-hewan tingkat tinggi baik invertebrata maupun vertebrata terdapat unit-unit spesifik dari sistem sirkulasi yang menjamin keberlangsungan prosesnya. Ada tiga komponen penting dari sistem sirkulasi yaitu : (a) jantung; (b) arteri; (c) vena dan (d) kapiler. Kompleksitas struktural dan fungsional dari ketiga komponen tersebut sangat bervariasi antar kelompok hewan sesuai dengan tingkat kemajuannya dalam konteks evolusi dan adaptasi.

A. Jantung

Jantung merupakan komponen penyusun sistem sirkulasi yang berfungsi sebagai pompa/penggerak darah di sepanjang pembuluh dengan mekanisme kontraksi dan relaksasi otot jantung. Jantung juga berfungsi mengontrol kerja sistem sirkulasi secara keseluruhan dengan mengubah-ubah laju detakan dan daya kontraksi. Secara struktural, jantung memiliki perbedaan kompleksitas antar takson selaras dengan kemajuan evolusinya dan pola adaptasi. Tipe jantung dari invertebrata adalah jantung tubular, pembuluh berdenyut dan jantung ampular.

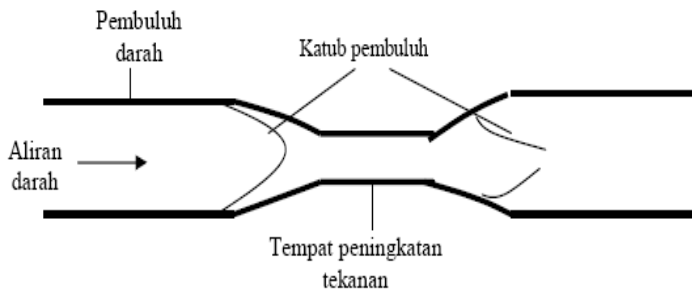
Jantung tubular (tubular hearts) merupakan struktur jantung yang dianggap paling sederhana adalah jantung tubular. Secara esensinya, strukturnya berupa tubular (saluran) yang berkontraksi dengan pola yang sama seperti gerakan peristaltik yang akan mendorong darah sepanjang saluran (tubular). Tipe ini terdapat pada kebanyakan insekta.

Pembuluh berdenyut (pulsating hearts), merupakan jantung berupa pembuluh darah yang sederhana dengan lapisan otot yang relatif tebal, yang berkontraksi dengan gelombang peristaltik, sehingga mendorong darah ke luar sistem. Tipe jantung ini merupakan karakteristik khusus annelida yang mempunyai peredaran darah tertutup. Gelombang kontraksi pada pembuluh dorsal mendorong darah, berjalan dari ujung posterior ke anterior,

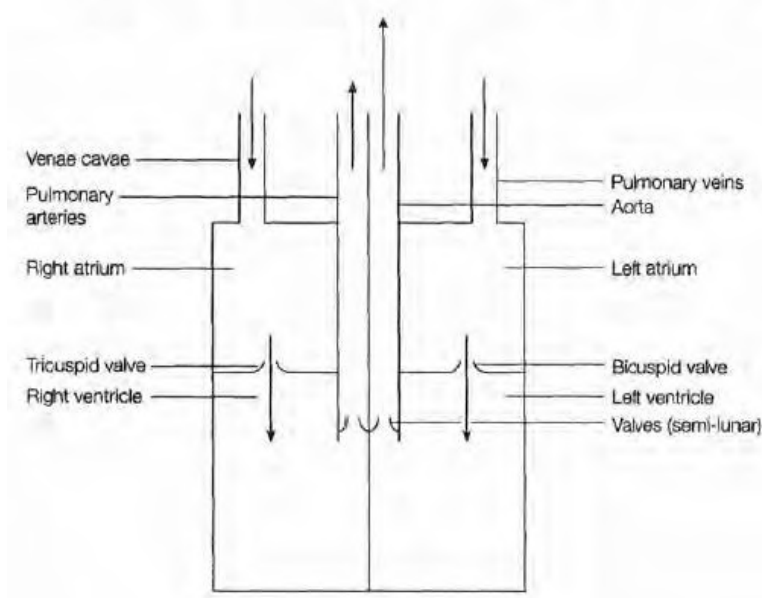
kemudian darah melewati beberapa pasang “jantung” lateral menuju pembuluh ventral yang juga kontraktile.

Jantung ampular merupakan jantung yang berfungsi sebagai pompa pendorong untuk memompa darah melalui daerah perifer dengan meningkatkan tekanan. Tipe jantung ini ditemukan pada hewan cephalopoda dan insekta. Pada serangga jantung ampular ini ditemukan pada dasar antena, sayap dan kaki. Sedangkan pada aphid, jantung ini memompa cairan ekstraseluler ke kaki.

Hewan vertebrata mempunyai tipe **jantung berbilik (chambered heart)**. Beberapa mollusca juga mempunyai tipe jantung ini, yang terdiri dari satu atau dua atrium/aurikel dan satu ventrikel. Satu atau lebih ruang/bilik menerima darah dari pembuluh vena dan satu atau lebih ruang memompa darah ke sirkulasi perifer.



Gambar 5.3. Skema jantung tubular. Kontraksi yang mirip gerakan peristaltik dari pembuluh darah akan mendorong darah melewati sistem. Tempat dimana terjadinya peningkatan tekanan merupakan sumber pendorong dari pergerakan darah. Aliran balik dari darah dicegah dengan adanya katub pada dinding pembuluh darah (Kay, 1998:112).



Gambar 5.4. Tipe jantung berbilik pada mamalia (Key, 1998:112)

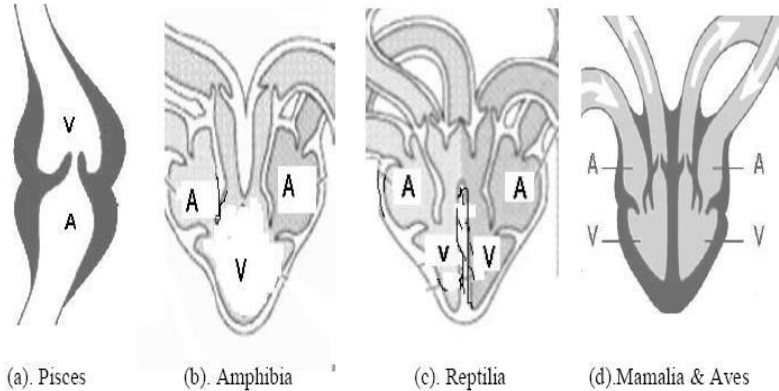
Jantung dapat dibagi juga menjadi dua tipe atas dasar bagaimana munculnya detakan yaitu **tipe neurogenik** dan **tipe miyogenik**. Jantung neurogenik tergantung kepada inervasi neural ekstrinsik untuk menginisiasi kontraksinya. Jika inervasinya dibuang, maka jantung tidak lagi dapat berdetak. Tipe ini ditemukan pada crustacea yang mana detakan jantungnya diregulasi oleh aktivitas neural (misalnya oleh potensial aksi) pada ganglion jantung (cardiac ganglion). Ganglion berperan sebagai pemacu jantung (*pacemaker*) yang mengawali rentetan potensial aksi yang kemudian melewati jantung dan akan menimbulkan kontraksi jantung. Mekanisme tersebut kemudian akan melibatkan saraf-saraf lainnya (baik mekanisme penghambatan maupun pemacu) yang memodulasi aktivitas ganglion jantung.

Jantung miyogenik adalah jantung yang memperlihatkan kontraktif spontan. Tipe ini ditemukan pada moluska dan vertebrata. Kontraksi yang timbul merupakan konsekuensi dari

muatan neuron yang spontan yang bersumber dari tempat spesifik di jantung. Tempat tersebut dikenal dengan pemacu jantung atau *pacemaker* yang merupakan bagian spesifik dimana terdapat modifikasi dari otot jantung dan sel-selnya memiliki membran potensial tidak stabil. Akan tetapi, potensial membran dasarnya (*resting membrane potential*) secara reguler mengarah ke ambang batas tertentu. Setiap kali ambang batas tersebut tercapai, potensial aksi dihasilkan dan detakan jantung dimulai. Depolarisasi yang bersumber dari daerah ini akan bergerak ke arah otot jantung yang berelaksasi sehingga menyebabkan kontraksi sekaligus pemompaan darah oleh jantung. Pada gastropoda kadangkala cukup sulit untuk membedakan daerah *pacemaker*, sedangkan pada vertebrata relatif mudah diidentifikasi yaitu di daerah yang disebut nodus sinoatrial.

Pada tipe miyogenik, semua bagian dari jantung dapat mengalami depolarisasi spontan, dan dalam kondisi dimana *pacemaker* gagal beroperasi, maka bagian lain dari jantung akan dapat mengambil alih kerja *pacemaker*. Kendati otot miyogenik memiliki kontraktilitas inheren, aksinya dimodifikasi baik oleh pengaruh saraf maupun pengaruh endokrin.

Jumlah unit ruang jantung antar takson berbeda selaras dengan kemajuan evolusi masing-masing taksa. Hal ini secara lengkap dapat diamati pada ruang-ruang jantung kelompok vertebrata yang terdiri atas 5 kelas (pisces, amphibi, reptilia, aves, dan mamalia). Pisces hanya memiliki dua ruang jantung yaitu 1 atrium dan 1 ventrikel, amphibi memiliki 3 ruang jantung yaitu 2 atrium dan 1 ventrikel, sedangkan pada reptilia jantung terdiri atas 4 ruang (2 atrium dan 2 ventrikel) namun terdapat variasi antara kelompok spesies reptil dari aspek ada atau tidaknya septum (sekat) antara ventrikel kiri dan kanan (buaya memiliki septum sempurna, sedangkan kelompok lainnya tidak). Pada burung, ruang jantung sama dengan mamalia yaitu 2 atrium dan 2 ventrikel yang memiliki sekat pemisah yang sempurna. Perbedaan-perbedaan pada struktur jantung tersebut nantinya akan bermanifestasi kepada pola aliran darah masing-masing kelompok.



Gambar 5.5. Ruang-ruang jantung pada beberapa spesies hewan dengan penekanan perbedaan pada jumlah ruang dan sekat antar ruang jantung.

B. Pembuluh Darah

(1). Arteri

Fungsi pembuluh arteri adalah membawa darah dari jantung. Darah yang mengalir di dalam arteri memiliki tekanan yang cukup tinggi sehingga dinding pembuluh harus cukup tebal dan kuat untuk menahan tekanan darah yang mengalir di dalamnya. Serabut elastik sebagai penyusun arteri sangat berarti dalam menjaga kekontinuan aliran darah ke kapiler. Saat jantung berkontraksi, darah akan didorong ke sistem vaskular menuju arteri. Dinding pembuluh akan meregang, menyimpan tegangan. Ketika jantung berelaksasi, dinding pembuluh arteri besar akan kembali ke bentuk semula secara elastis. Tekanan darah pada arteri ketika jantung berelaksasi dan berkontraksi diistilahkan dengan **diastol** dan **sistol**. Tekanannya diatas tekanan atmosfer normal (760 mmHg) dan bervariasi antar spesies. Misalnya, pada ikan tekanan darahnya 30/20 mmHg, sedangkan pada manusia 120/80 mmHg.

Tabel 5.2. Komposisi struktural dari pembuluh darah hewan. Tanda + mengindikasikan jumlah relatif dari masing-masing komponen.

Komponen	Tipe Pembuluh Darah				
	Arteri	Arteriol	kapiler	Venula	Vena
Endotelium	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada
Otot polos	+++	++++	-	+	+++
Serabut elastis	++++	++	-	+	++
Jaringan ikat	+++	++	-	+	++

Arteriol merupakan pembuluh darah arteri kecil. Dinding pembuluh tersusun atas otot polos yang banyak. Fungsi utama yang paling penting adalah menjamin kelangsungan aliran darah secara reguler ke organ-organ yang membutuhkan secara proporsional. Fungsi ini difasilitasi oleh keberadaan otot polos pada dinding pembuluh. Dengan merubah-ubah derajat kontraksi otot polos, maka aliran darah ke organ yang berbeda-beda dapat diatur sedemikian rupa sehingga organ-organ yang memerlukan suplai yang tinggi akan dialiri darah lebih banyak dari pada organ-organ yang sedang kurang aktif. Kontraksi dari otot tersebut disebut dengan vasokontraksi dan relaksasinya disebut vasodilasi. Mekanisme kerja dari kontraksi otot tersebut dikontrol oleh saraf-saraf otonom. Akan tetapi kontrol tersebut dapat dilawan oleh faktor-faktor lokal. Misalnya pada otot-otot yang digunakan dalam berolahraga, dimana terdapat sisa-sisa produk metabolisme (laktat, CO_2 , H^+) yang akan berdifusi ke arteriol sehingga menyebabkan vasodilasi. Hal tersebut memungkinkan aliran darah ke otot yang sedang bekerja dapat meningkat secara signifikan yang juga akan memaksimalkan suplai oksigen dan nutrisi-nutrisi yang esensial. Mekanisme tersebut juga merupakan bentuk homeostasis lokal.

Kapiler adalah pembuluh terkecil dalam sistem sirkulasi. Fungsinya adalah sebagai tempat terjadinya pertukaran gas, nutrisi, dan substansi-substansi lainnya antara darah dan sel. Fungsi

tersebut didukung oleh struktur kapiler yang hanya tersusun atas selapis sel tipis dan luas permukaan total yang sangat besar.

(b). Venula dan vena.

Venula adalah vena kecil yang berhubungan langsung dengan kapiler, sedangkan vena berperan dalam mengembalikan darah ke jantung. Struktur dindingnya lebih tipis daripada arteri dan dialiri darah bertekanan rendah. Vena-vena utama memiliki katub yang memastikan terjadinya aliran darah satu arah saja kembali ke jantung.

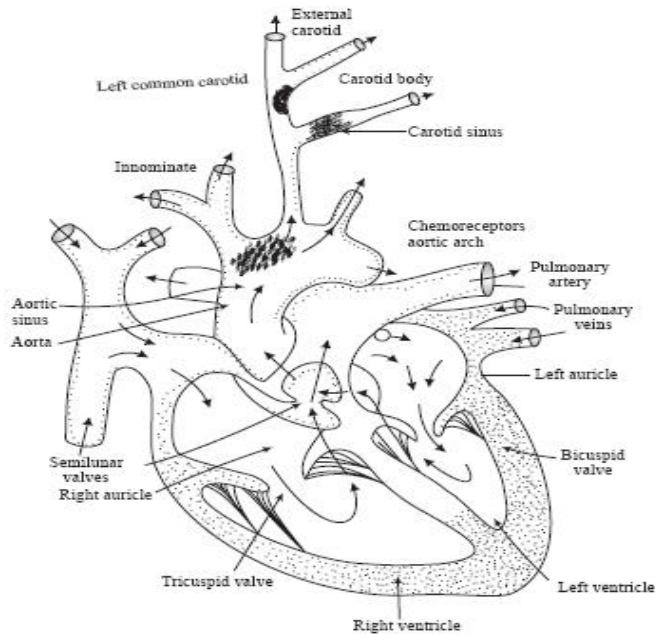
5.5. Jantung Mamalia

Tipe jantung mamalia adalah tipe jantung berbilik, terdiri dari empat ruang. Jantung mamalia dan jantung vertebrata lain dibungkus oleh suatu membran rangkap yang disebut kantung perikardial. Lapisan luar dari kantung merupakan jaringan fibrosa yang melekat pada mediastinum. Pelekatan ini membuat jantung tetap berada pada posisi yang tetap di dalam rongga dada. Lapisan dalam yang melekat pada permukaan luar jantung (epikardium) merupakan jaringan serosa, yang menghasilkan cairan perikardial untuk mengisi kantung perikardial. Cairan perikardial berfungsi sebagai pelumas untuk melindungi membran perikardium yang saling bergesekan satu sama lain pada setiap denyutan jantung.

Dinding jantung terdiri atas tiga lapis, yaitu **epikardium** (lapisan luar), **miokardium** (lapisan tengah) dan **endokardium** (lapisan paling dalam). Epikardium disebut juga perikardium visceral merupakan jaringan serosa. Miokardium merupakan lapisan paling tebal tersusun atas serabut-serabut otot jantung. Endotelium merupakan lapisan bagian dalam rongga jantung.

Miokardium terdiri atas tiga jenis serabut otot. *Pertama* serabut kontraktile otot, merupakan miokardium berukuran sedang dan merupakan bagian terbesar dari dinding jantung ($\pm 99\%$). Serabut otot jantung jenis ini dikhususkan untuk kontraksi otot jantung. *Kedua* serabut miokardium yang menyusun nodus sinoatrial (nodus SA) dan nodus atrioventrikular (AV). Ukuran

serabut otot ini kecil dan kemampuan kontraksi serta konduksi yang lemah, tetapi mempunyai *sifat autoritmik*, yaitu mampu membangkitkan potensial aksi secara ritmik tanpa stimulasi saraf. Potensial aksi yang dibangkitkan ini diperlukan untuk memulai kontraksi dari sel-sel kontraktil. Membran sel autoritmik selalu dalam keadaan depolarisasi. *Ketiga*, serabut miokardium yang ukurannya paling besar, terdapat di dalam endokardium ventrikular. Serabut ini mempunyai kemampuan kontraksi lemah namun memiliki kemampuan konduksi yang cepat. Miokardium jenis ini merupakan miokardium yang menyusun berkas HIS dan serabut Purkinje.



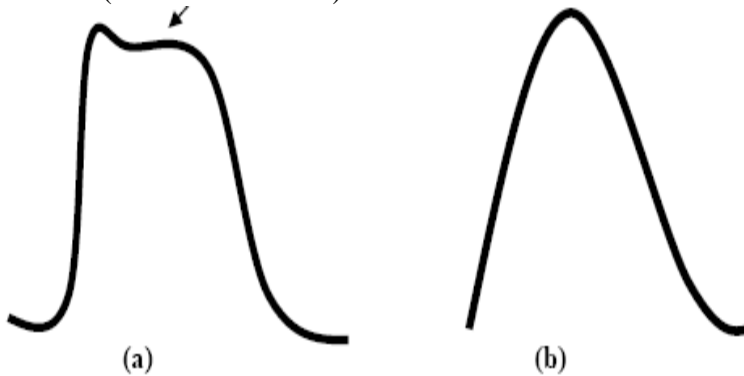
Gambar 5.6. Struktur internal jantung mamalia (Rastogi, 2007:149)

5. 5. Aktivitas Fungsional Jantung

Jantung memiliki beberapa karakter fungsional yang spesifik, yaitu sebagai berikut:

A. Iratabilitas

Iritabilitas yaitu kemampuan jantung untuk merespon impuls-impuls atau rangsangan dengan intensitas yang cukup besar. Respon jantung berupa rambatan potensial aksi dan kontraksi mekanik. Potensial aksi pada jantung agak berlainan dengan saraf atau otot dimana bentuknya berupa plateau (dataran) dengan durasi relatif lebih lama (dalam satuan detik).



Gambar 5.7. Pola grafik potensial aksi pada jantung (a) yang memperlihatkan adanya plateau (tanda panah), dan pola potensial pada saraf (b) yang tidak adanya plateau.

B. Konduktivitas

Konduktivitas merupakan kemampuan jantung dalam merambatkan impuls. Bagian yang sangat berperan aktif dalam merambatkan impuls adalah jaringan purkinje dan serabut HIS. Akan tetapi, bagian-bagian lain dari seluruh jantung dapat juga merambatkan impuls walau tidak seaktif jaringan purkinje dan serabut HIS.

Tabel 5.3. Kecepatan impuls pada beberapa bagian jantung

Macam jaringan	Kecepatan impuls (m/detik)
Nodus sinoauricularis	0.05
Nodus atrioventricularis	0.1
Otot ventrikel	0.4
Otot atrium	1
Jaringan purkinye	1
Serabut HIS	2

C. Keotomatisan (keiramaan jantung)

Keotomatisan yaitu kemampuan jantung untuk berdenyut dengan sendirinya tanpa ada impuls dari luar jantung dengan pola irama yang teratur. Munculnya denyut jantung karena adanya aktivitas otot jantung disebut karakteristik miyogenik, namun frekuensi denyutnya dipengaruhi oleh aktivitas saraf dan hormon. Pada mamalia, pusat denyutan adalah dinodus sinoaurikularis, sedangkan pada katak adalah sinus venosus.

D. Periode refrakter yang lebih lama.

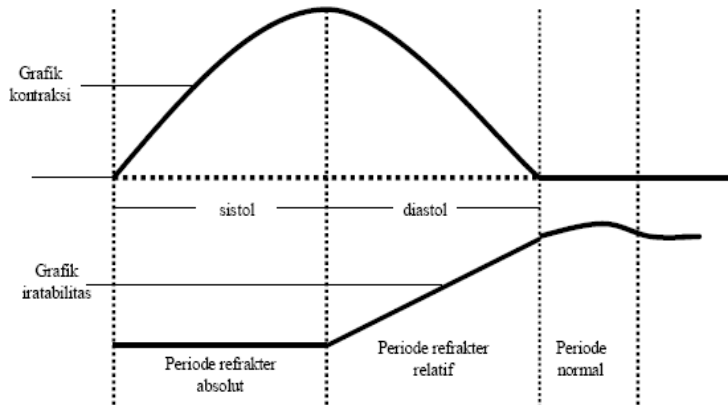
Periode refrakter adalah waktu dimana jaringan hidup kehilangan sifat iritabilitas untuk sementara sehingga pada saat tersebut jika diberikan rangsangan maka tidak akan ada respon. Periode ini terjadi selama sistol dan berlangsung agak lama (dalam detik) sehingga menyebabkan jantung tidak dapat bertetanus, sedangkan periode refrakter pada saraf dan otot terjadi sangat cepat (dalam milidetik). Ada dua macam periode refrakter yaitu periode refrakter absolut dan relatif.

Periode refraktor absolut adalah periode dimana jantung tidak ada respon terhadap impuls bagaimanapun besarnya impuls tersebut (jantung tidak akan memberikan respon meskipun diberikan rangsangan). Ini terjadi pada periode sistol. Sedangkan periode refrakter relatif merupakan periode dimana jantung masih

menunjukkan respon jika rangsangan cukup besar. Ini terjadi pada periode diastol.

E. Jantung mengikuti hukum Starling

Jantung mengikuti hukum Starling dimana jika otot jantung mengembang sehingga menjadi lebih panjang, maka kontraksinya juga akan semakin kuat. Hukum Starling mengemukakan bahwa energi mekanik yang dilepaskan dari keadaan istirahat sampai otot berkontraksi tergantung dari panjang awal otot tersebut. Untuk jantung, besarnya volume sekuncup jantung berbanding lurus dengan volume darah di ruang jantung pada akhir diastol.



Gambar 5.8. Kurva hubungan antara kontraksi jantung dan iritabilitas jantung serta periode- periode refrakter

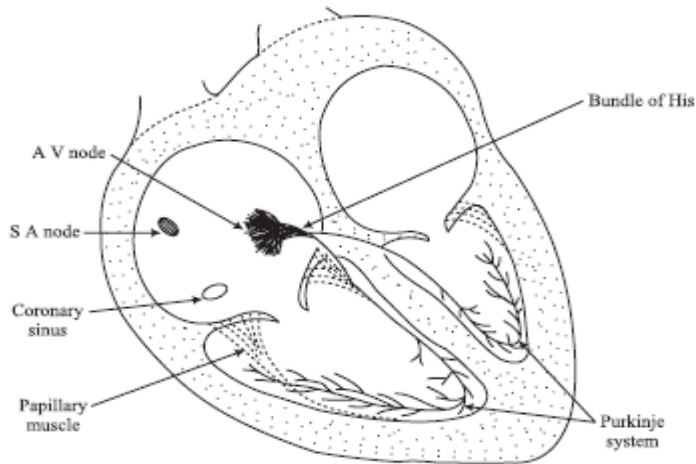
5.6. Eksitasi dan Konduksi Elektrik Jantung

Mekanisme kerja jantung yang dijelaskan disini adalah jantung tipe miyogenik seperti yang telah disinggung pada bagian mengenai struktur jantung. Pada vertebrata telah dipelajari adanya 3 macam otot jantung yang terkait erat dengan aktivitas kontraksi dan relaksasi jantung yaitu **jaringan nodal (nodus)**, **jaringan purkinje** dan jaringan biasa. Jaringan nodal dan purkinje

merupakan komponen struktural yang sangat penting dalam aktivitas fisiologis jantung.

Jaringan nodus pada mamalia terdiri atas dua daerah meliputi nodus sinoaurikularis (SA) dan nodus atrioventrikularis (AV). Nodus SA terdapat di dinding atrium kanan ke arah anterior yang berbentuk mirip seperti gelendong, dengan sedikit miofibril dan ukuran lebih ramping dari pada otot jantung biasa. Nodus ini berdekatan dengan ganglion perifer saraf vagus dan mendapat suplai saraf baik dari saraf simpatik maupun parasimpatik. Nodus ini adalah pacu jantung (*pacemaker*) pada mamalia yang menjadi tempat awal munculnya impuls (dengan irama yang disebut irama sinus). Nodus SA berhubungan langsung dengan otot atrium kanan sehingga setiap kali ada impuls di nodus tersebut akan segera dirambatkan ke seluruh otot atrium. Otot atrium sendiri terhubung dengan nodus atrioventrikularis (AV) oleh serabut transisi (dengan daerah yang disebut dengan sambungan A-V). Pada serabut transisi ini akan terjadi hantaran impuls tetapi relatif sangat lambat sehingga impuls yang merambat dari atrium ke ventrikel mengalami perlambatan 1/10 detik. Nodus atrioventrikularis (AV) terletak di daerah subendokardium pada atrium berdekatan dengan pangkal sinus koronaria.

Jaringan purkinje adalah jaringan konduktor khusus yang dapat merambatkan impuls relatif lebih cepat dalam jantung. Pada vertebrata, jaringan purkinje di temukan di jantung mamalia dan aves sedangkan pada kelas lainnya tidak ditemukan. Jaringan ini banyak mengandung glikogen, sedikit miofibril dan terdapat berkas HIS serta cabang-cabangnya. Berkas HIS memiliki dua cabang utama yaitu cabang sinistral yang mensuplai ventrikel kiri dan cabang dekstral yang mensuplai ventrikel kanan. Cabang tersebut kemudian juga membentuk cabang lagi ke arah otot ventrikel sehingga jika ada impuls yang merambat akan diteruskan ke ventrikel.

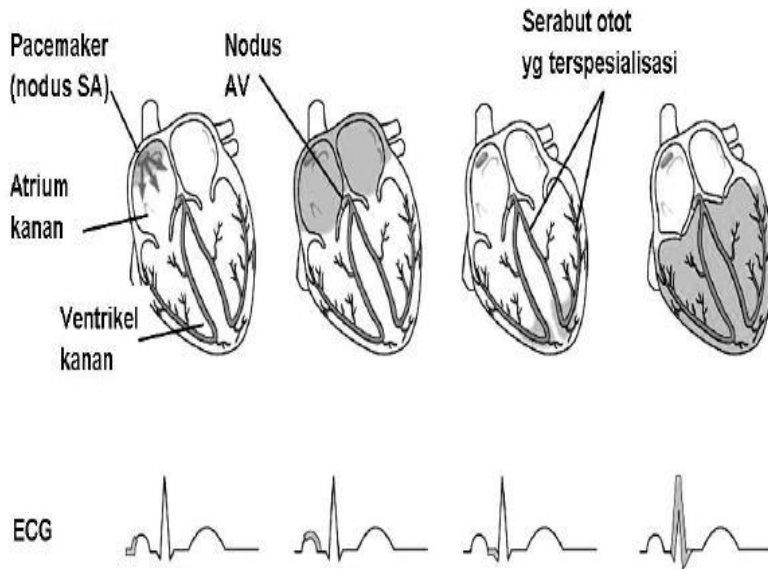


Gambar 5.9. Bagian-bagian fungsional jantung pada mamalia yang terlibat dalam konduktivitas elektrik (Rastogi, 2007: 252).

Proses eksitasi dan sebaran impuls pada jantung vertebrata banyak dikaji pada kelas amphibi dan mamalia. Pada **amphibi**, yang bertindak sebagai *pacemaker* adalah sinus venosus (jantung katak terdiri atas sinus venosus, 2 atrium dan 1 ventrikel). Impuls yang berasal dari sinus venosus akan dirambatkan ke atrium dan diteruskan keventrikel. Perambatan tersebut terjadi melalui serabut otot pada atrium dan otot ventrikel dan tidak ada sistem konduksi khusus seperti pada mamalia.

Eksitasi dan rambatan impuls pada **mamalia** berawal dari adanya impuls yang ditimbulkan oleh nodus SA kemudian menyebar keseluruh otot atrium dari serabut ke serabut lainnya. Serabut-serabut otot atrium dihubungkan oleh serabut transisi dengan nodus AV. Rambatan impuls melewati serabut transisi sangat lambat sehingga proses perambatan impuls dari atrium ke ventrikel mengalami perlambatan 1/10 detik dan hal tersebut menguntungkan karena memberi kesempatan kepada ventrikel untuk menampung lebih banyak darah. Setelah impuls sampai di

nodus AV, impuls akan merambat melalui berkas HIS dan diteruskan ke serabut otot ventrikel kiri dan kanan secara bersamaan.



Gambar 5.10. Mekanisme perambatan impuls (eksitasi dan konduksi) pada jantung mamalia yang disertai dengan gambaran elektrokardiogram (Campbell dkk, 2007).

5. 7. Tipe-Tipe Sistem Sirkulasi

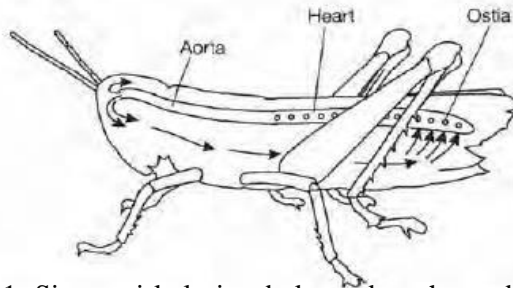
Seiring perkembangan evolusi hewan, organisasi sistem sirkulasi juga memperlihatkan perkembangan dari bentuk sederhana seperti yang telah dikemukakan di awal hingga bentuk yang sangat kompleks seperti yang ditemukan pada organ-organ sirkulasi vertebrata terutama aves dan mamalia.

A. Sistem Sirkulasi Terbuka

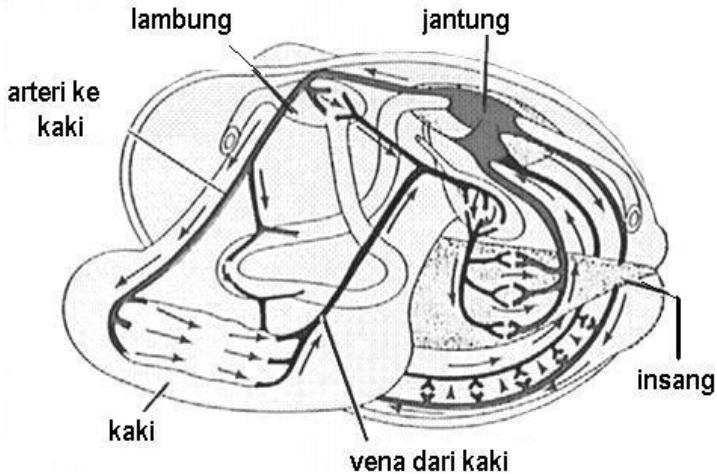
Sistem sirkulasi terbuka merupakan suatu sistem dimana pembuluh darah tidak membentuk sirkuit yang sempurna di seluruh tubuh sehingga ketika darah mengalir, darah akan meninggalkan pembuluh darah dan mengalir diantara jaringan (ruang terbuka hemocoel atau blastocoel). Ruang terbuka tersebut biasanya berada diantara endoderm dan ektoderm. Cairan yang terdapat di ruang hemocoel disebut hemolimf yang akan langsung mengenai sel-sel di sekitarnya. Selanjutnya dari jaringan akan kembali ke jantung. Tipe ini banyak ditemukan pada arthropoda dan moluska.

Pada arthropoda dan moluska, jantung menghasilkan tenaga yang akan memompa darah ke seluruh tubuh hewan. Jantung itu sendiri memiliki sejumlah bukaan yang disebut ostia yang memungkinkan darah untuk kembali ke dalam jantung setelah beredar. Dalam banyak hal, relaksasi jantung akan menyedot darah secara aktif ke dalam jantung sehubungan dengan adanya tekanan negatif yang ada di dalam ruang jantung. Kendati desainnya relatif sederhana, terdapat beberapa ketidakefisienan sistem peredaran ini. **Kerugian pertama** adalah bahwa sistem tersebut beroperasi pada tekanan yang rendah dimana volume darah yang sedikit didorong dari jantung menuju rongga yang lebih lebar. Karena sirkulasi darah tersebut dioperasionalkan berdasarkan azas tekanan, darah akan dialirkan ke jaringan secara lamban. Hal tersebut akan mengurangi laju suplai nutrisi ke jaringan dan sekaligus akan menurunkan laju metabolisme dari hewan yang bersangkutan. **Kerugian kedua** dari sistem ini adalah bahwa tidak adanya regulasi yang teratur dari aliran darah ke organ yang berbeda. Hal ini menyebabkan tidak pastinya aliran darah ke organ spesifik pada waktu tertentu sehingga sistem cenderung kurang terkendali. Dengan kata lain, sistem peredaran ini mempunyai kemampuan sangat terbatas dalam mengubah kecepatan aliran dan distribusi darah. Akibatnya proses pengambilan oksigen oleh sel-sel tubuh berjalan lamban dan jumlah maksimum laju pemakaian oksigen per satuan berat badan adalah kecil. Pada insekta, permasalahan tersebut dicegah dengan melibatkan sistem trakea dalam proses pendistribusian oksigennya langsung ke jaringan atau sel yang membutuhkan tanpa melibatkan sistem sirkulasi. Oleh karenanya,

kendati memiliki sistem peredaran darah terbuka, insekta dapat melakukan metabolisme aerob dengan laju yang relatif tinggi.



Gambar 5.11. Sistem sirkulasi terbuka pada arthropoda (belalang) yang memperlihatkan arah aliran darah dari jantung ke hemocoel dan kembali ke jantung melalui ostia (Key, 1998: 114).



Gambar 5.12. Sistem sirkulasi terbuka pada moluska (gastropoda) yang memperlihatkan arah aliran darah dari jantung ke seluruh tubuh.

B. Sistem Sirkulasi Tertutup

Pada sistem sirkulasi tertutup, darah selalu berada dalam suatu seri pembuluh darah selama proses peredarannya dan tidak pernah ke luar dari sistem. Sistem peredaran darah ini ditemukan pada anelida, cephalopoda, echinodermata dan seluruh vertebrata. Darah yang dipompa oleh jantung dijaga sedemikian rupa sehingga tekanannya tetap tinggi yang kemudian menghasilkan siklus peredaran yang dinamis mulai dari jantung ke seluruh tubuh dan kembali ke jantung dengan lancar. **Keuntungan pertama** sistem peredaran ini adalah terjaminnya distribusi nutrisi ke sel-sel yang akan melaksanakan metabolisme secara langsung melalui pembuluh darah dengan laju pengantaran yang lebih cepat dibandingkan dengan kelompok hewan dengan sistem peredaran darah terbuka. **Keuntungan kedua** dari sistem ini adalah dapat diatur suatu mekanisme aliran darah ke organ-organ atau jaringan tertentu yang membutuhkan sehingga mekanisme sirkulasi sesuai kebutuhan dari jaringan. Sebagai contoh selama berolahraga, hewan-hewan vertebrata memiliki kemampuan untuk meningkatkan suplai darah ke daerah-daerah yang aktif misalnya ke otot, dan mengurangi aliran ke daerah yang kurang aktif misalnya di saluran gastrointestinal.

Ada lima ciri spesifik dari sistem sirkulasi tertutup ini terutama pada hewan tingkat tinggi yaitu :

- 1) Terdapat pemisahan fungsi dari masing-masing organ tubuh yang termasuk ke dalam sistem sirkulasi. Sehubungan hal tersebut, terdapat jantung yang merupakan pemompa darah dan darah dipompa ke arteri pada level tekanan yang dipertahankan untuk tetap tinggi.
- 2) Terdapat sistem pembuluh arteri yang berperan sebagai reservoir tekanan sekaligus mendorong darah ke kapiler.
- 3) Terdapat dinding kapiler darah yang sangat tipis sehingga memudahkan perpindahan substansi dari darah dalam kapiler ke cairan jaringan di ruang antar sel untuk selanjutnya memasuki sel.

- 4) Tekanan darah di kapiler tertentu (di glomerulus pada ginjal vertebrata) cukup tinggi sehingga memungkinkan berlangsungnya ultrafiltrasi di ginjal.
- 5) Terdapat sistem limfa yang penting dalam proses pengembalian cairan dari ruang antar sel ke pembuluh darah.

Sistem sirkulasi tertutup pada invertebrata contohnya adalah pada cacing anelida. Hewan ini memiliki lima pasang unit jantung yang dilengkapi dengan katup-katup (valves) dan pembuluh dara dorsal, ventral serta neural. Kontraksi jantung yang berupa gerakan peristaltik berelaborasi dengan aktivitas peristaltik saluran gastrointestinal sehingga mampu mendorong darah ke pembuluh darah. Terkadang pada cacing tidak dapat dibedakan secara jelas antara jantung dengan arteri yang menebal. Semua molekul kecil yang terbawah oleh aliran darah akan berdifusi dengan mudah melalui pembuluh kapiler, sedangkan sel-sel amuboid yang bersirkulasi dalam darah terkadang keluar masuk dari dalam pembuluh.

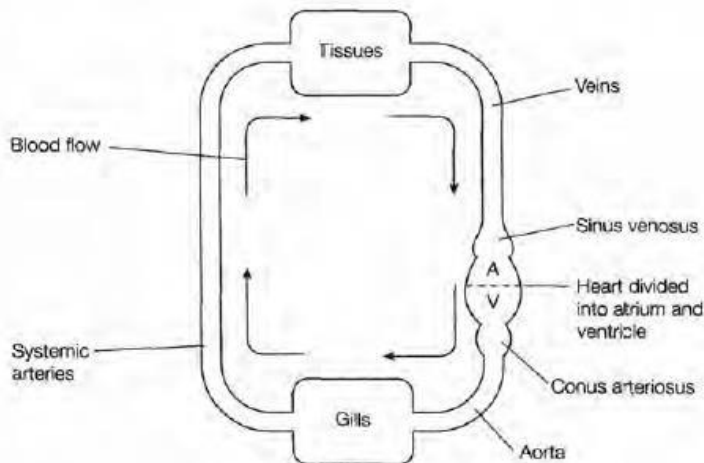
Sistem sirkulasi tertutup lainnya juga telah dipelajari pada Octopus (Cephalopoda) dimana hewan tersebut memiliki jantung yang lebih dari satu yang disebut sebagai jantung branchial. Keberadaan jantung branchial pada Octopus membantu dalam meningkatkan tekanan terhadap aliran darah yang memasuki insang sehingga darah yang kaya oksigen dari insang dapat dipompa lebih cepat.

Pada kelompok vertebrata, sistem sirkulasi tertutup sangat jelas memperlihatkan tingkatan kompleksitas organisasi struktural dan fungsionalnya sesuai dengan tingkatan kelas dari pisces hingga mamalia sebagai bentuk paling sempurna. Perbedaan-perbedaan pada mekanisme aliran darah yang spesifik meliputi struktur ruang jantung, arah aliran darah, dan karakter darah yang beredar.

Sistem sirkulasi tertutup memiliki dua pola yang berbeda dalam proses sirkulasi darahnya. Pembagian ini didasarkan kepada bagaimana susunan jantung dan bagaimana cara darah melakukan peredaran secara lengkap di seluruh tubuh. Atas dasar hal tersebut maka sirkulasi tertutup dibagi atas dua yaitu **sistem sirkulasi tunggal** dan **sistem sirkulasi ganda**.

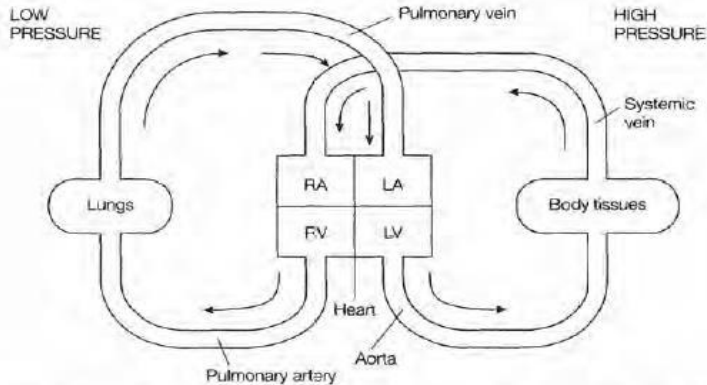
Pada **sistem sirkulasi tunggal (Closed Single Circulation)**, darah akan meninggalkan jantung melalui ventrikel, terus melewati insang dan mengalami oksigenasi dengan mekanisme difusi pertukaran O_2 - CO_2 di insang, dan selanjutnya mengalir ke seluruh tubuh dimana terdapat jaringan atau sel-sel yang akan memakai oksigen dan kemudian kembali lagi ke jantung. Dengan demikian, dalam sekali siklus peredaran, darah hanya terdiri atas satu lintasan saja yaitu dari jantung ke insang dan ke seluruh tubuh untuk selanjutnya kembali ke jantung yang juga berarti bahwa selama beredar darah hanya sekali melewati jantung. Contoh hewan dengan sistem sirkulasi tipe ini adalah kelompok Pisces.

Terdapat suatu ketidakefisienan sistem sirkulasi tipe tertutup yaitu karena hilangnya tekanan darah yang dipompakan oleh jantung setelah darah melewati insang. Konsekuensi dari keadaan tersebut adalah terciptanya aliran darah ke seluruh tubuh dengan arus yang relatif lamban (*sluggish flow*) karena gradien tekanan yang menjadi pendorong darah dalam beredar telah mengalami reduksi secara signifikan.



Gambar 5.13. Tipe sistem sirkulasi tunggal pada ikan (Key, 1998: 117).

Pada tipe **sirkulasi ganda**, darah selama beredar akan melewati jantung sebanyak dua kali. Hal ini memerlukan struktur jantung yang spesifik yaitu terdiri atas 4 ruang (dua atrium dan 2 ventrikel). Darah meninggalkan jantung melalui ventrikel kanan dan menuju ke paru-paru dimana terjadi proses oksigenasi sehingga membawa darah kaya oksigen dari paru-paru untuk kembali ke jantung melalui atrium kiri dan ke ventrikel kiri untuk selanjutnya dipompakan ke seluruh tubuh sebagai suplai oksigen dan substansi lainnya yang diperlukan oleh sel-sel tubuh. Pada lintasan kedua, darah dari seluruh tubuh yang berupa darah deoksigenasi (miskin oksigen) akan kembali ke atrium kanan dan menuju ventrikel kanan hingga ke paru-paru lagi sebagai pengulangan siklus yang kontinyu. Contoh ideal sistem ini adalah pada mamalia.



Gambar 5.14. Sistem sirkulasi ganda pada mamalia dimana darah dalam sekali beredar akan melewati jantung sebanyak dua kali (aliran ke pulmo disebut juga sirkulasi kecil, aliran ke seluruh tubuh disebut aliran darah besar) (Key, 1998: 118).

Keuntungan dari sistem ini adalah terciptanya tekanan aliran darah yang relatif konstan sehingga laju sirkulasi lebih cepat yang juga berarti meningkatkan efisiensi suplai kebutuhan sel-sel tubuh

sekaligus membuang produk hasil metabolisme secara lebih cepat. Kondisi ini tercipta karena adanya dua kali proses pemompahan darah oleh jantung yaitu pemompahan darah yang akan mengalir ke paru-paru dan pemompahan darah yang akan mengalir ke seluruh tubuh.

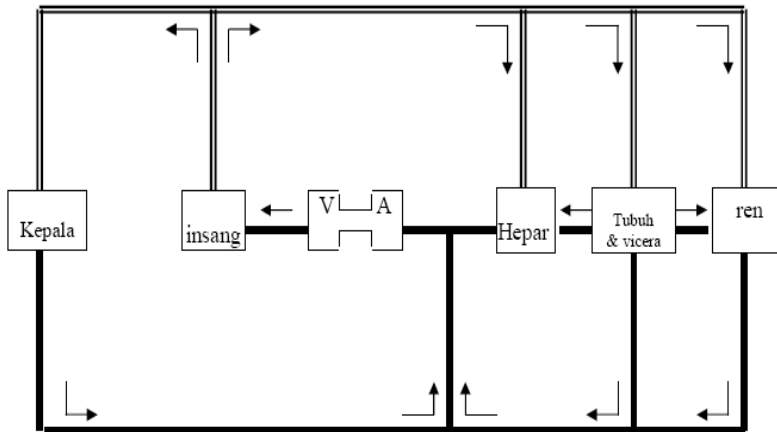
5. 7. Mekanisme Sirkulasi pada Vertebrata

A. Sirkulasi Pada Pisces

Pada ikan terdapat ruang yang berfungsi menerima darah dari vena yang disebut sinus venosus. Ketika jantung berkontraksi, darah akan didorong ke atrium, selanjutnya ke ventrikel dan akhirnya menuju ke bulbus arteriosus yang kemudian menuju ke aorta ventralis. Dengan mekanisme aliran yang demikian, sistem jantung yang terdiri atas 4 bagian (ruang) linier sangat berguna untuk meningkatkan tekanan darah dengan jalan menurunkan kaliber (ketegaran) lumen secara sekuensial dan meningkatkan kekuatan muskular dinding jantung. Aorta ventral keluar dari jantung dan berakhir sebagai 4 pasang arterioli menuju insang. Arteri-arteri tersebut tersusun secara simetris dan bilateral, menuju ke daerah insang dan disana akan bercabang menjadi arterioli yang pada akhirnya menuju kapiler insang. Kapiler insang berada di bawah permukaan jaringan insang yang memungkinkan proses pengambilan oksigen ke dalam jaringan serta terkadang juga melangsungkan pertukaran ion-ion, CO₂, amonia, dan substansi lainnya yang terbawa oleh aliran air yang masuk. Kapiler-kapiler insang bersatu membentuk arterioli efferen dan arteri (biasanya 4 pasang), yang juga bersatu membentuk aorta dorsalis yang merupakan cabang terakhir yang menuju ke anterior dan posterior tubuh untuk mensuplai darah kaya oksigen ke kepala dan badan. Aorta dorsalis dan cabang-cabang utamanya terbagi-bagi untuk mensuplai darah arteri yang akan diteruskan ke beberapa organ tubuh.

Seluruh darah yang mengalir saluran pencernaan setelah melewati sistem kapiler, akan mengambil substansi dari daerah tersebut yang merupakan hasil pencernaan yaitu gula, asam amino,

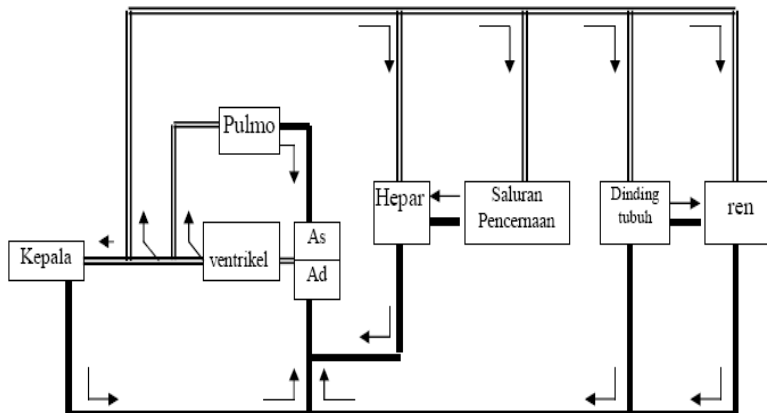
dan molekul-molekul kecil lainnya. Selanjutnya darah akan disatukan kembali di vena porta hepatica sehingga nutrisi yang ada di dalamnya akan dihantarkan ke hepar, dan darah miskin oksigen tersebut akan kembali ke jantung. Di hepar, vena terbagi-bagi menjadi pembuluh mirip kapiler yang disebut sinusoid. Sinusoid tersebut akan bergabung kembali menuju vena dan akan mengalirkan darah ke jantung. Seluruh darah yang mengalir ke bagian posterior tubuh (khususnya di daerah pelvik dan ekor), setelah melewati sistem kapiler utama di jaringan, akan bersatu kembali ke vena porta renalis yang membawa darah miskin oksigen dan produk-produk sisa metabolisme menuju ginjal. Di ginjal, vena porta renalis akan terbagi-bagi menuju ke kapiler peritubular. Kapiler-kapiler tersebut akan bersatu kembali menuju vena renalis yang selanjutnya mengalirkan darah ke jantung. Kedua organ yang dialiri darah miskin oksigen tersebut (hepar dan ren) juga menerima darah yang kaya oksigen melalui cabang arteri dari aorta.



Gambar 5.15. Skema aliran darah pada sistem sirkulasi Pisces. A (atrium), V (ventrikel), s (sinister atau kiri), d (dekster atau kanan)

B. Sirkulasi Pada Amphibi

Pada amphibi, setiap bagian atrium terbuka melalui kanal atrioventrikular yang memiliki katub menuju ventrikel yang terdiri atas satu ruang yang berbagi-bagi. Ventrikel tersebut secara struktural memiliki jaringan otot dan jaringan ikat yang berlapis yang disebut trabekula dan menyerupai spons. Fungsi struktur tersebut adalah mencampurkan darah dari dua atrium. Conus arteriosus sebagai saluran dari ruang ventrikel tersebut juga terbagi-bagi oleh katub spiral. Ketika ventrikel berkontraksi, sisi kirinya yang berisi darah kaya oksigen akan dialirkan ke aorta sistematik sedangkan sisi kanannya yang berisi darah miskin oksigen akan dialirkan ke arteri pulmonaris. Dengan kata lain terdapat sirkulasi ganda yaitu (a) dari sinus venosus menuju atrium kanan dan ke ventrikel untuk kemudian diteruskan ke arteri pulmonaris, selanjutnya ke kapiler paru-paru terus ke vena pulmonaris; (b) dari vena pulmonaris menuju ke atrium kiri dan ke ventrikel terus ke aorta sistematik menuju kepala dan badan terus ke kapiler sistematik dan kembali secara langsung melalui sinus venosus atau kembali melalui sistem porta hepatica atau porta renalis.



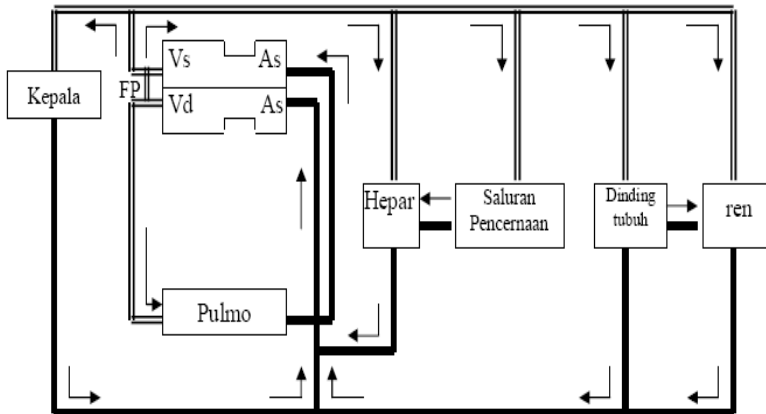
Gambar 5.16. Skema aliran darah pada sistem sirkulasi Amphibi. A (atrium), V (ventrikel), s (sinister atau kiri), d (dekster atau kanan)

Akan tetapi terdapat banyak pengecualian pada kelompok-kelompok amphibia tertentu yang tidak memiliki beberapa organ yang terkait dengan sistem sirkulasi tersebut. Beberapa spesies tidak memiliki paru-paru atau ada yang memiliki insang eksternal serta ada juga yang hanya tergantung kepada kulit sebagai organ respirasi sehingga pola susunan sistem sirkulasinya akan berbeda-beda tergantung kepada tipe respirasinya. Misalnya pada amphibi tanpa paru-paru (*lungless amphibian*) tidak memiliki arteri pulmonari dan memiliki sekat antar atrium yang berlubang-lubang atau hanya berupa sekat yang mereduksi (*vestigial septum*) sehingga tidak ada sistem peredaran darah ganda. Kelompok hewan seperti ini biasanya bersifat tidak aktif dan bergantung pada respirasi pada kulit (dermal).

C. Sirkulasi Pada Reptilia

Pada kelompok reptil, sistem sirkulasi ganda berlaku umum pada kebanyakan spesies. Pola tersebut berhubungan dengan sistem respirasinya yang memiliki paru-paru. Walaupun demikian, beberapa spesies reptil dari kelompok penyu memiliki sistem suplemen bagi paru-paru yaitu dari dermal, pharingeal, dan kloaka. Reptil dari kelompok buaya, kura-kura atau penyu, kadal, dan ular memperlihatkan perbedaan dalam hal pola sirkulasinya. Pada kura-kura atau penyu, kadal, dan ular, jantungnya terdiri atas atrium kiri dan kanan juga ventrikel kiri dan kanan (4 ruang jantung) akan tetapi sekat atau septum antara ventrikel kiri dan kanan belum jelas atau tidak ada sama sekali.

Pola peredaran darah pada penyu dan kelompoknya adalah sebagai berikut : darah dari vena di seluruh tubuh masuk ke sinus venosus yang kemudian ke atrium kanan. Atrium kanan juga menerima darah dari vena coronaria. Setelah itu darah akan menuju ventrikel kiri terus ke arteri pulmonalis dan ke kapiler di pulmo yang selanjutnya akan berkumpul di vena pulmonalis dan masuk ke atrium kiri. Dari atrium kiri kemudian masuk ke ventrikel. Sebagian darah dari ventrikel akan mengalir ke lengkung aorta kanan dan sebagian ke lengkung aorta kiri. Dari lengkung aorta kanan sebagian menuju ke kepala dan sebagian lagi bersatu dengan



Gambar 5.17. Skema sistem sirkulasi pada reptil kelompok buaya.
A (atrium), V (ventrikel), s (sinister atau kiri), d (dekster atau kanan), FP (Foramen Panizae)

D. Sirkulasi Pada Aves dan Mamalia

Aves memiliki sistem sirkulasi yang hampir mirip dengan mamalia dan dengan ruang jantung yang sudah tersekat dengan sempurna menjadi 4 ruangan (2 atrium dan 2 ventrikel). Secara sistematis, darah dari vena di seluruh tubuh menuju ke atrium kanan dan ke ventrikel kanan. Dari ventrikel kanan mengalir melalui arteri pulmonalis menuju kapiler-kapiler di paru-paru dan kemudian berkumpul kembali di vena pulmonalis yang pada akhirnya akan kembali ke jantung melalui atrium kiri. Dari atrium kiri darah akan mengalir ke ventrikel kiri dan kemudian dipompa ke aorta menuju ke kepala, hepar, usus, ren dan dinding tubuh. Proses oksigenasi terhadap darah berlangsung saat darah melewati kapiler paru-paru. Darah kaya oksigen disebut darah arteri sedangkan darah kaya karbondioksida disebut darah vena. Perbedaan spesifik antara aves dengan mamalia adalah pada aspek adanya sistem vena porta renalis (ginjal) pada aves yang tidak dimiliki oleh mamalia.

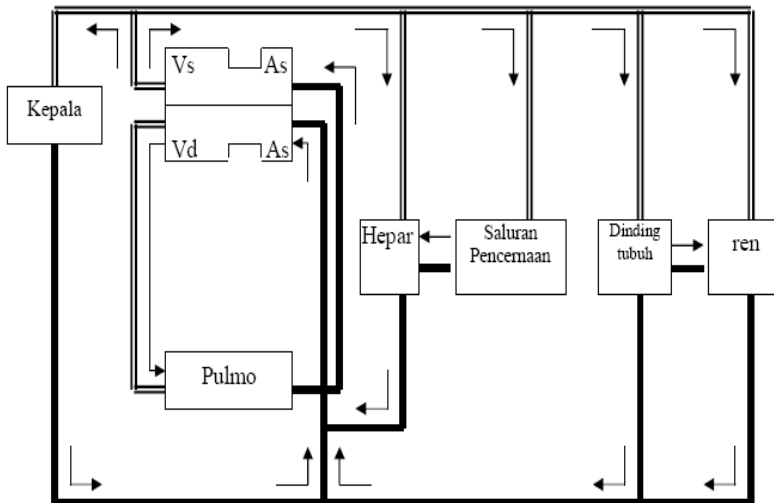
Seperti halnya pada aves, jantung mamalia juga memiliki 4 ruang yang bersekat secara sempurna sehingga tidak terjadi percampuran darah yang kaya oksigen dan darah miskin oksigen. Darah dari vena sistematik akan mengalir ke bagian atrium kanan dari jantung melalui vena cava superior dan vena cava inferior. Dari atrium kanan, darah akan didorong melalui katub triskupidalis menuju ventrikel kanan. Ketika ventrikel kanan tersebut berkontraksi, maka katub triskupidalis akan menutup untuk mencegah aliran darah kembali ke dalam atrium. Pada waktu yang bersamaan, katub semilunar akan membuka sehingga darah akan mengalir ke arteri pulmonalis kanan dan kiri.

Arteri-arteri tersebut akan mengalirkan darah ke kapiler paru-paru di kiri dan kanan dimana berlangsung pertukaran gas respirasi. Darah yang kaya akan oksigen kembali ke jantung melalui vena pulmonalis dari kedua belah paru-paru menuju atrium kiri. Darah kemudian akan mengalir dari atrium kiri lalu ke ventrikel kiri melalui katub biskupidalis (atau dikenal juga dengan katub mitral). Katub tersebut akan menutup ketika ventrikel kiri berelaksasi. Ketika ventrikel kiri berkontraksi, katub biskupidalis akan menutup untuk mencegah aliran darah kembali ke atrium. Pada saat yang sama, katub semilunar aorta membuka sehingga darah akan mengalir dari ventrikel kiri ke aorta. Seketika darah mengalir, ventrikel kiri akan berelaksasi dan katub semilunar aorta akan menutup sehingga darah tidak akan kembali ke ventrikel kiri lagi.

Pada fetus mamalia (misalnya manusia), paru-paru tidak terisi air dan memiliki resistensi yang tinggi terhadap aliran darah. Darah yang mengandung oksigen berasal dari plasenta sehingga aliran darah ke pulmo belum diperlukan sebagai bagian dari proses pertukaran gas. Terdapat dua bagian yang membantu aliran darah yang berasal dari plasenta menuju ke sirkulasi sistematik di seluruh tubuh yaitu foramen ovale dan duktus arteriosus. Foramen ovale adalah lubang pada sekat antar atrium yang ditutupi oleh sepasang katub dan memungkinkan darah mengalir dari vena cava inferior ke atrium kanan dan diteruskan ke atrium kiri. Dengan demikian, terdapat banyak darah kaya oksigen yang berasal dari plasenta akan mengalir dari atrium kanan ke atrium kiri melalui foramen

ovale yang selanjutnya dari atrium kiri akan diteruskan ke ventrikel kiri dan menuju ke seluruh tubuh melalui aorta. Pada fetus, seluruh aliran darah dipompa oleh ventrikel kanan menuju ke seluruh tubuh dan kembali ke jalur sistemik melalui duktus arteriosus.

Waktu lahir, paru-paru mengembang dan seketika akan terjadi aliran darah pada pembuluh-pembuluh pulmonalis. Kondisi ini akan meningkatkan tekanan di atrium kiri, dan menutupnya katub pada foramen ovale. Duktus arteriosus juga menutup dan akan mencegah terjadinya perubahan aliran dari arteri pulmonalis ke aorta.



Gambar 5.18. Skema sistem sirkulasi pada aves. A (atrium), V (ventrikel), s (sinister atau kiri), d (dekster atau kanan)

5.7. Kontrol Saraf terhadap Aktivitas Jantung

Terdapat dua macam saraf yang mengontrol jantung yaitu saraf vagus (parasimpatik) dan saraf simpatik. **Saraf vagus** menurunkan frekuensi denyut jantung (kronotropik negatif), menurunkan daya kontraksi jantung (inotropik negatif), dan

memperlambat penghantaran impuls sepanjang sistem konduktivitas jantung (dromotropik negatif).

Saraf simpatik jantung memberikan efek berkebalikan dengan saraf vagus sebagaimana halnya kerja antagonis antara sistem simpatik dan parasimpatik dalam mengontrol kerja tubuh lainnya. Di daerah medula oblongata pada otak terdapat kumpulan neuron yang disebut sentral kardioaselerator. Dari pusat tersebut terdapat saraf simpatik yang menuju ke sum-sum tulang belakang sebagai saraf jantung menuju ke nodus sinoauricularis (SA). Jika pusat kardioaselerator terangsang, impuls akan menjalar sepanjang saraf simpatik menuju nodus SA. Selanjutnya ujung saraf simpatik melepaskan epinefrin sehingga menyebabkan peningkatan frekuensi denyut jantung, daya kontraksinya dan kecepatan perambatan impuls di sepanjang sistem penghantaran jantung juga meningkat. Selain sentral kardioaselerator, di medula oblongata juga terdapat kumpulan neuron yang merupakan sentral kardioinhibitor yang terhubung ke jantung oleh saraf vagus (parasimpatik) menuju ke nodus SA. Jika sentral kardioinhibitor terangsang, maka impuls akan menjalar sepanjang saraf vagus menuju ke nodus SA dan ujung dari saraf vagus akan melepaskan asetilkolin yang akan bermanifestasi terhadap penurunan frekuensi denyut jantung, daya kontraksi dan kecepatan perambatan impuls sepanjang sistem perambatan jantung.

Asetilkolin dan noradrenalin merupakan neurotransmitter yang memiliki lokasi kerjanya di daerah *pacemaker* pada jantung. Aktivitas jantung akan menurun karena pengaruh asetilkolin dan akan meningkat oleh pengaruh noradrenalin (epinefrin) baik pada moluska maupun pada vertebrata. Asetilkolin menurunkan laju detak jantung dengan cara merubah mekanisme kerja ion yang bertanggung jawab dalam proses depolarisasi *pacemaker*. Dalam hal ini, efluks potasium (K^+) dari sel-sel *pacemaker* meningkat yang akan menghasilkan hiperpoliarisasi, sedangkan influks kalsium (Ca^{2+}) dihambat, sehingga mencegah terbentuknya potensial aksi di daerah *pacemakaer* pada jantung. Sementara itu noradrenalin akan meningkatkan laju detak jantung dengan cara meningkatkan influks Ca^{2+} ke dalam sel-sel *pacemaker*, sehingga mengurangi

waktu munculnya depolarisasi yang pada akhirnya akan meningkatkan laju detak jantung.

5.8. Dinamika Aliran Darah

Darah sebagai fluida dengan viskositas cukup tinggi akan mengalir dalam suatu saluran pembuluh darah yang bersifat elastik. Dinamika aliran darah dalam pembuluh-pembuluh tersebut memenuhi hukum fisika berkenaan dengan aliran fluida. Sesuai asas Poiseuille, kecepatan aliran darah dalam pembuluh darah ditentukan oleh faktor-faktor berikut :

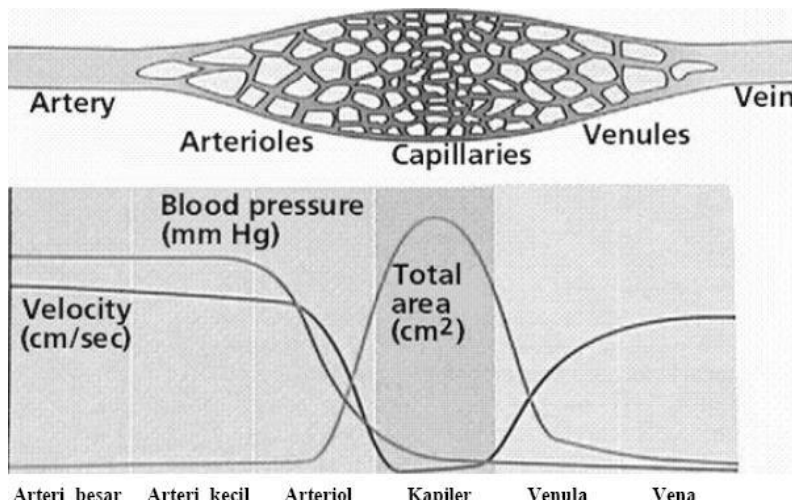
- a. Tekanan darah. Jika tekanan darah tinggi maka kecepatan aliran akan meningkat.
- b. Luas penampang pembuluh darah. Semakin besar luas penampang pembuluh darah maka aliran darah juga akan meningkat.
- c. Panjang pembuluh darah. Jika pembuluh darah semakin panjang maka akan menurunkan kecepatan aliran fluida darah di dalamnya.
- d. Viskositas darah sama dengan tahanan terhadap aliran darah. Jika viskositas darah tinggi maka aliran darah akan lambat demikian sebaliknya.

Dari faktor-faktor tersebut dapat diketahui beberapa hal penting yang mempengaruhi tahanan terhadap aliran darah. Tahanan dapat diasosiasikan dengan penghambat bagi kecepatan aliran darah dalam pembuluh darah, sehingga faktor-faktor yang meningkatkan tahanan terhadap aliran darah adalah (1) radius pembuluh darah (berhubungan dengan luas penampang atau tipe pembuluh darah), (2) panjang pembuluh, dan (3) viskositas darah. Pembuluh darah berukuran kecil akan menimbulkan tahanan yang besar (persamaan tahanan $R : 1/r^4$ dengan r adalah radius pembuluh darah). Tahanan juga berbanding lurus dengan panjang pembuluh darah, semakin panjang pembuluh maka tahanan akan makin tinggi. Viskositas darah berbanding lurus terhadap tahanan sehingga jika darah lebih kental (biasanya karena peningkatan jumlah sel darah merah yang dapat dinyatakan dalam nilai

hematokrit, penurunan suhu) maka tahanan aliran juga akan semakin meningkat.

Aspek dinamika aliran darah yang lainnya yang penting adalah tekanan darah yang merupakan tekanan yang ditimbulkan oleh darah terhadap pembuluh darah. Atau dalam definisi matematis, tekanan darah adalah gaya yang dilakukan oleh darah terhadap satuan luas dinding pembuluh darah. Ada tiga faktor penting yang menentukan tekanan darah dalam peredarannya yaitu:

- a. Jumlah darah yang berada dalam peredaran yang mampu memperbesar pembuluh darah.
- b. Adanya aktivitas pemompaan jantung yang menjadi tenaga pendorong aliran darah dalam pembuluh darah.
- c. Tahanan terhadap aliran darah.
- d. Gaya gravitasi. Dalam kondisi tertentu yaitu ketika berdiri dimana jika suatu sistem aliran darah berada di bawah dataran jantung, maka gaya gravitasi akan meningkatkan tekanan darah dalam pembuluh darah.

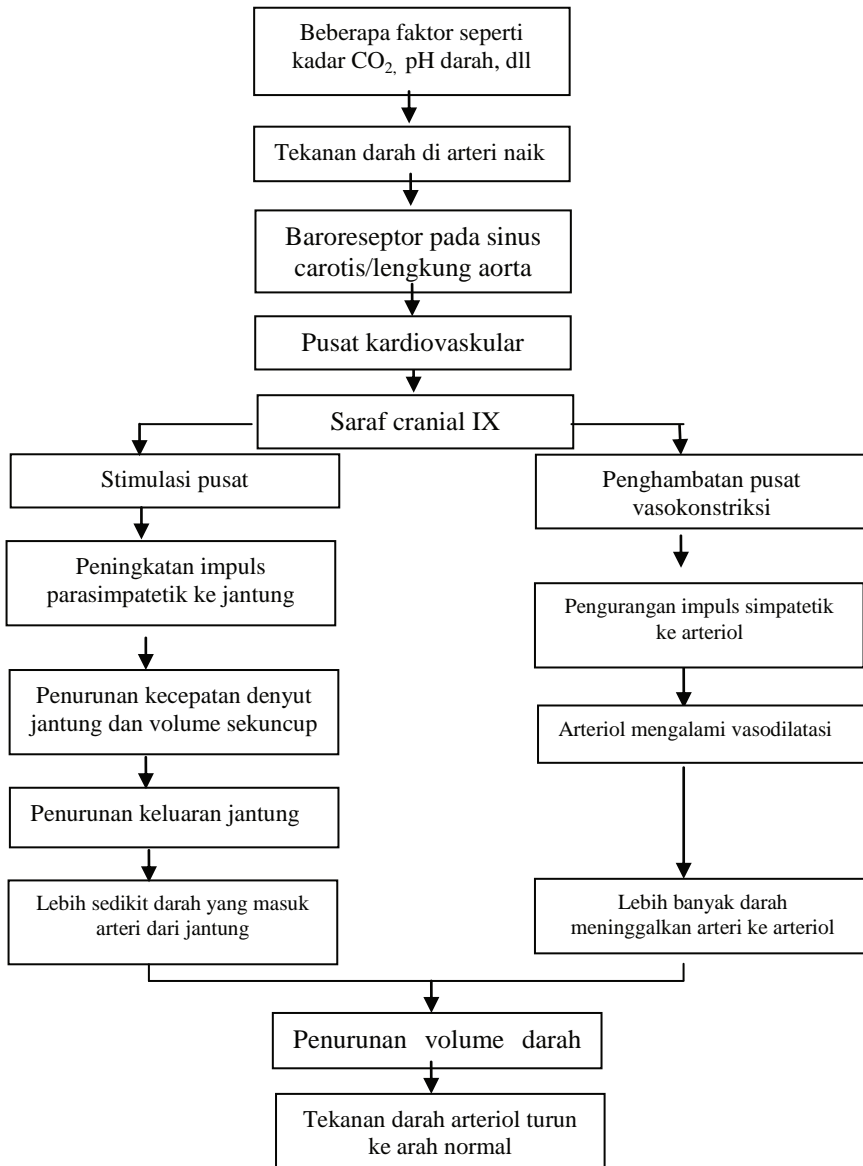


Gambar 5.19. Perubahan tekanan, kecepatan aliran, dan luas area dari pembuluh darah dalam sistem sirkulasi

5.9. Kontrol Saraf terhadap Tekanan Darah

Pusat jantung menerima informasi sensoris dari lingkungan internal dan eksternal tubuh. Biasanya informasi sensoris dari dalam tubuh berupa tekanan darah, perubahan karbondioksida dan pH darah. Pada titik-titik tertentu pada pembuluh darah (sinus carotis dan lengkung aorta) terdapat baroreseptor dan kemoreseptor yang akan menerima stimulus perubahan tekanan darah atau perubahan karbondioksida dan pH darah tersebut. Informasi sensoris yang diterima reseptor pada pembuluh darah akan diteruskan kepusat pengendali jantung, kemudian pusat pengendali akan mengirimkan impulsnya ke nodus sinoatrial supaya jantung memperlambat atau mempercepat denyutnya. Perlambatan atau percepatan laju denyut jantung akan berakibat pula pada peningkatan atau penurunan keluaran jantung, yang selanjutnya akan meningkatkan atau menurunkan tekanan darah.

Pengendalian oleh saraf juga ditujukan untuk pembuluh darah, terutama arteriol-arteriol agar berlangsung vasodilatasi dan vasokonstriksi. Vasodilatasi pada arteriol akan menyebabkan darah di dalam arteri mengalir lancar dan tekanan darah cenderung turun, sedangkan vasokonstriksi arteriol menyebabkan penggumpalan darah di dalam arteri sehingga tekanan darah cenderung naik. Mekanisme pengendalian saraf pada jantung dan pembuluh darah untuk menurunkan tekanan darah dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 5.20. Diagram pengendalian saraf pada jantung dan pembuluh darah untuk menurunkan tekana darah.

BAB VI

SISTEM RESPIRASI

Kehidupan hewan di permukaan bumi bergantung kepada kemampuannya untuk memanfaatkan oksigen dan mengeliminasi karbondioksida. Hampir 20 % oksigen yang ada di atmosfer dipergunakan oleh hewan dan efisiensi penggunaan oksigen tersebut berbeda pada setiap hewan tergantung kepada fisiologisnya. Oksigen harus ditransportasikan ke darah dan mencapai seluruh sel. Makanan hewan berupa karbohidrat, lemak dan protein merupakan sumber energi. Energi akan dilepaskan apabila zat makanan tersebut dioksidasi. Penyelenggaraan respirasi harus didukung oleh alat pernapasan yang sesuai yang dapat dipergunakan oleh hewan untuk melakukan pertukaran gas dengan lingkungannya. Alat pernapasan itu dapat berupa alat pernapasan khusus ataupun tidak.

Setelah mempelajari bab ini anda diharapkan dapat menjelaskan tentang bagaimana air versus udara sebagai media respirasi, alat respirasi pada berbagai macam spesies hewan (invertebrata dan vertebrata), mekanisme respirasi hewan invertebrata dan vertebrata, pernapasan pada manusia, pengaturan/kontrol sistem respirasi dan transportasi gas di dalam darah.

6. 1. Fungsi Respirasi

Pertukaran oksigen dan karbondioksida antara sel-sel yang aktif dengan lingkungan luarnya atau antara cairan tubuh hewan dengan lingkungan tempat hidupnya disebut dengan **respirasi**. Respirasi juga didefinisikan sebagai proses biokimia yang berlangsung di dalam sel berupa perombakan molekul-molekul makanan dan transfer energi yang dihasilkan (respirasi seluler). Proses respirasi erat kaitannya dengan laju metabolisme yang didefinisikan sebagai unit energi yang dilepaskan per unit waktu. Laju respirasi pada hewan tergantung pada aktivitas metabolisme total dari organisme tersebut.

Fungsi utama respirasi adalah dalam rangka memproduksi energi melalui metabolisme aerobik dan hal tersebut terkait dengan konsumsi oksigen. Fungsi lainnya adalah membantu menjaga fungsi normal darah, membantu mempertahankan suhu tubuh dan membantu mempertahankan keberadaan oksigen di dalam darah.

Tabel 6.1. Konsumsi oksigen beberapa spesies hewan

Spesies	Konsumsi Oksigen (mm O ₂ /gram bb/jam)
<i>Paramecium</i>	1.00
<i>Amoeba</i>	0.20
<i>Aurelia</i> (Coelenterata)	0.0034
<i>Ascaris</i> (Cacing Gilig)	0.50
<i>Octopus</i> (Moluska)	0.09
<i>Arenicola</i> (Anelida)	0.03
<i>Uca</i> (Crustacea, Udang)	0.05
<i>Homarus</i> (Crust., Lobster)	0.50
<i>Calliphora</i> (Insecta, Blowfly)	1.70
<i>Vanessa</i> (Insecta, Kupu-kupu)	0.60
<i>Asterias</i> (Echinodermata, Bintang Laut)	0.03
Ikan Mas	0.07
Salmon	0.22
Tikus	0.95
Kucing	0.44
Manusia	0.20

(Griffin and Novick, 1970)

Perkembangan organ respirasi sejalan dengan proses evolusi hewan. Hewan-hewan uniseluler dapat berespirasi melalui permukaan tubuh. Permukaan tubuhnya belum termodifikasi sedemikian rupa sehingga respirasi dapat berjalan lancar. Hal sebaliknya terjadi pada hewan multiseluler yang memerlukan energi lebih tinggi dari hasil respirasi dan permukaan tubuh telah banyak termodifikasi sehingga proses respirasi melalui permukaan tubuh tidak/belum efektif.

6. 2. Gas di udara dan air

A. Gas di udara

Hewan dapat berespirasi di dalam air, di darat atau pada keduanya. Sebagai contoh kecebong berespirasi dalam air, *Anguila* dapat berespirasi di air dan di darat, sedangkan burung berespirasi di darat. Hal ini menunjukkan bahwa secara fisika dan kimia ada hubungan antara gas di udara dan di air dengan proses difusi.

Di udara terdapat 20,95% oksigen, 0,03 % karbondioksida, 78,09% nitrogen dan sisanya berupa gas noble (argon, kripton, neon). Masing-masing komponen udara tersebut memiliki tekanan parsial yang secara kumulatif akan memberikan nilai tekanan atmosfer total. Tekanan parsial didefinisikan sebagai persentase komposisi suatu gas dikalikan dengan tekanan atmosfer total. Misalnya tekanan parsial oksigen yang di udara terkandung sebanyak 20,95% tepat di permukaan laut (0 m dpl) adalah $(20,95/100) \times 101 \text{ kPa}$ atau $(20,95/100) \times 760 \text{ mm Hg}$. Nilai tekanan total atmosfer 0 m di atas permukaan laut adalah sebesar 101 kPa atau 760 mmHg.

Tekanan gas yang ideal hanya terdapat di udara yang kering, namun di alam udara banyak mengandung uap air yang juga akan berkontribusi terhadap tekanan parsial (tekanan parsial air). Tekanan parsial air akan meningkat sejalan dengan suhu, pada suhu 0°C tekanan parsial air sebesar 0,6 kPa dan akan menanjak menjadi 101 kPa pada suhu 100°C. Dengan demikian kehadiran uap air akan mengurangi tekanan parsial suatu gas di udara. Pada kondisi STP (standart temperature and pressure), tekanan parsial

oksigen akan menjadi sebesar 21,03 kPa (diperoleh dari $0,2095 \times (101-0,6)$), dan pada suhu 37°C akan menurun menjadi 6 kPa.

B. Gas di air

Gas larut dalam air. Tekanan parsial gas di udara akan sama dengan di air jika sistem bersifat seimbang (equilibrium). Tingkat kelarutan gas berbeda-beda, misalnya CO_2 30 kali lebih mudah larut dalam air dibandingkan dengan O_2 . Dengan demikian konsentrasi gas dalam air tidak akan sama. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi konsentrasi gas dalam air terutama adalah :

- a. Suhu, jika suhu tinggi maka konsentrasi akan turun. Misalnya oksigen akan berkurang sebanyak 40% jika suhu naik dari 10°C menjadi 30°C .
- b. Partikel-partikel lain yang terlarut dalam sistem larutan, jika jumlah partikel tinggi maka akan menurunkan konsentrasi gas. Oksigen misalnya akan mengalami penurunan 20-30% dalam air laut daripada di air tawar karena banyaknya partikel terlarut dalam air laut.

Kendati oksigen dan karbondioksida berada dalam kondisi gas, peran biologisnya berlangsung dalam medium cair. Oksigen tetap dalam wujud O_2 baik di dalam fase gas ataupun dalam larutan. Hanya sebagian kecil yang akan terlarut dalam air pada suhu dan tekanan normal. Jika udara bebas dengan kandungan oksigen di bawah 21%, bersentuhan dengan air pada suhu mendekati titik beku, kira-kira 1 ml gas oksigen akan terlarut dalam 100 ml air atau hanya sekitar setengah dari yang dapat terlarut dalam larutan pada suhu tubuh burung dan mamalia. CO_2 sebaliknya, bereaksi dengan air membentuk asam bikarbonat (H_2CO_3) yang segera terdissosiasi menjadi ion H^+ dan ion HCO_3^- (ion bikarbonat). Dalam cairan jaringan dan di dalam air dimana sifat sistem adalah netral, seluruh CO_2 yang ada terdapat dalam bentuk ion bikarbonat. Karena air sangat mudah bereaksi dengan CO_2 tersebut, maka air mampu mempertahankan kandungan CO_2 nya dalam bentuk ion bikarbonat lebih tinggi daripada O_2 .

5. 3. Air dan Udara Sebagai Media Respirasi

Udara merupakan media respirasi yang lebih efisien dibandingkan dengan air. Hal tersebut disebabkan oleh:

- a. Air lebih rapat dan kental dari pada udara. Air 1000 kali lebih rapat molekulnya dan 60 kali lebih kental jika dibandingkan dengan udara. Konsekuensinya, hewan-hewan yang berespirasi dalam air seperti ikan akan lebih banyak memerlukan energi untuk melewati gas melalui organ respirasinya. Sebagai contoh adalah pada ikan dimana proses melewati air dalam mekanisme respirasi melalui insang memerlukan 10% dari energi metabolik pernafasan (*metabolic cost of breathing*) pada kondisi istirahat (*basal metabolic rate*). Nilai tersebut akan terus meningkat saat ikan bergerak aktif (*cost of ventilation*). Untuk meminimalisir pemakaian energi tersebut, hewan-hewan yang bernafas di dalam air biasanya memiliki aliran air secara tidak langsung (*unidirectional flow*) melalui insang.
- b. Kandungan oksigen di air lebih rendah dari pada di udara. Oksigen di udara mencapai 200 ml per liter udara, sedangkan di air kadar oksigen hanya 100 ml per liter air. Akan tetapi, air dapat melarutkan CO₂ mencapai 20-30 kali lebih tinggi dari pada udara sehingga hewan-hewan akuatik hanya sedikit memiliki masalah dengan pengeluaran CO₂ sebagai produk metabolisme. Signifikansi dari hal tersebut adalah bahwa bagi hewan-hewan akuatik, O₂ merupakan stimulus primer untuk pernafasan. Sedangkan pada hewan-hewan terestrial, CO₂ lah yang menjadi stimulus primer pernafasan. Fakta bahwa pada hewan-hewan yang bernafas di udara, level CO₂ di tubuh lebih tinggi dan berimplikasi pada kesetimbangan asam-basa karena CO₂ merupakan gas yang bersifat asam.
- c. Air memiliki kapasitas termal yang lebih tinggi dari pada udara. Air merupakan peredam panas yang efektif, konsekuensinya bahwa hewan-hewan akuatik memiliki masalah yang serius dengan termoregulasi dimana panas tubuh yang dihasilkan akan dinetralisir oleh air. Hal tersebut juga menyulitkan hewan-hewan akuatik untuk melawan efek temperatur air di sekitarnya. Sedangkan udara memiliki kapasitas termal yang rendah

sehingga memungkinkan bagi hewan-hewan yang bernafas di udara untuk memanfaatkan panas dari respirasi sebagai penyokong utama mekanisme termoregulasi. Dengan demikian udara lebih baik sebagai media respirasi daripada air. Hewan-hewan yang bernafas di udara cenderung memiliki laju metabolisme yang tinggi dari pada hewan akuatik. Masalah yang mungkin timbul adalah adanya kebutuhan kontinyu akan oksigen dalam jumlah besar dan terjadinya *overheating*.

6.4. Difusi Gas dalam Respirasi

Difusi merupakan proses pergerakan suatu substansi (gas) dari suatu tempat dengan konsentrasi tinggi menuju ke tempat dengan konsentrasi rendah (diistilahkan dengan gradien konsentrasi). Dalam fisiologi, proses difusi dapat berlangsung seperti pada kulit, dan dari alveoli ke kapiler darah di pulmo. Gas berdifusi berdasarkan gradien tekanan parsial yang selaras dengan gradien konsentrasi. Perhatikan formulasi Hukum Fick tentang laju difusi berikut :

$$J/A \text{ atau } Q = - \frac{D (C_1 - C_2)}{X}$$

J : massa gas yang ditransfer per satuan waktu; A : luas permukaan respirasi; J/A : jumlah gas yang berpindah per unit area per waktu; C₁-C₂ : gradien konsentrasi; X : jarak terjadinya difusi; D : koefisien difusi. Tanda negatif mengindikasikan bahwa pergerakan terjadi menuruni gradien konsentrasi. Nilai D bervariasi tergantung jenis gas. Persamaan tersebut memberikan informasi berkenaan dengan karakter fisiologis difusi yaitu : a). jumlah gas yang berdifusi proporsional terhadap waktu, b). Jika jarak difusi meningkat maka jumlah gas yang berdifusi akan menurun.

6. 5. Desain Organ-Organ Respirasi

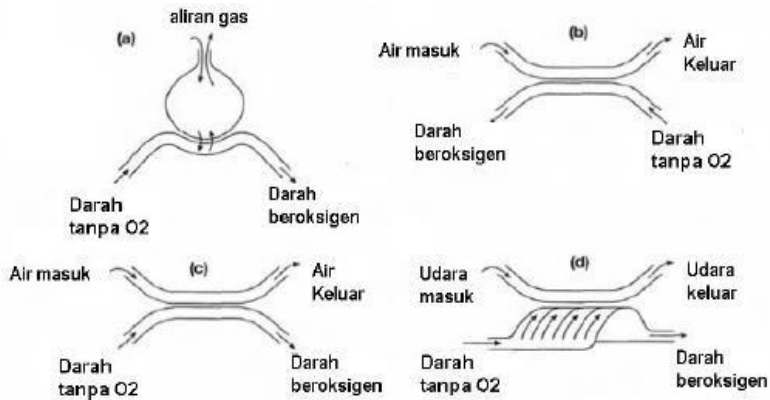
Mekanisme respirasi melalui difusi sederhana tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan suplai O_2 dan netralisasi CO_2 dari dalam tubuh dari hewan-hewan yang memiliki laju metabolisme tinggi. Perkembangan-perkembangan spesifikasi organ respirasi akan sangat berkorelasi terhadap tuntutan tersebut dan sejalan dengan proses evolusi dalam hubungannya dengan tekanan lingkungan. Organ-organ respirasi yang dibutuhkan haruslah memenuhi kriteria berikut :

- a. Membutuhkan luas permukaan yang lebih lebar yang akan meningkatkan kapasitas pertukaran gas antara tubuh dengan lingkungan hewan.
- b. Pemisah antara darah dan udara atau air yang dihirup oleh hewan harus seminimal mungkin. Pemisah tersebut dapat berupa selapis membran plasma yang tipis yang memungkinkan berlangsungnya proses lalu lintas gas secara mudah.
- c. Pergerakan medium respirasi harus sesuai dengan cairan tubuh (ke dalam atau keluar masuknya gas) untuk mencapai suatu kesetimbangan rasio ventilasi. Misalnya pada manusia, paru-paru akan bekerja efektif jika terdapat suplai darah sehingga terjadi proses pertukaran gas yang kontinyu.
- d. Desain antara organ-organ respirasi harus sejalan dengan mekanisme yang terjadi pada cairan tubuh.

Adapun tipe-tipe susunan organ respirasi tersebut meliputi :

1. Susunan *uniform pool* yang umumnya terdapat pada sistem respirasi mamalia. Dalam hal ini, medium respirasi (misalnya udara) tidak mengalir dengan arah yang spesifik dalam hubungannya dengan aliran darah pada paru-paru.
2. Susunan berlawanan arah (*countercurrent*), yang terdapat pada insang ikan. Dalam hal ini, aliran medium respirasi (misalnya air) dan darah saling berlawanan arah. Pada banyak titik di sepanjang insang, konsentrasi gas oksigen dalam air lebih tinggi dari pada di dalam darah sehingga terjadi pergerakan gas tersebut secara kontinyu dari air ke darah. Hal sebaliknya terjadi pada karbondioksida.

3. Susunan searah (*concurrent*), dimana pergerakan medium respirasi dan aliran darah memiliki arah yang sama. Hal ini kurang efisien karena tidak terdapat gradien konsentrasi yang memadai untuk berlangsungnya difusi gas menuruni gradien konsentrasi.
4. Aliran bersilang (*crooscurrent flow*) yang ditemukan pada sistem respirasi burung. Dalam hal ini, darah dan medium respirasi mengalir saling bersilang satu sama lain. Desain ini memungkinkan terjadinya transfer gas antara darah dan medium respirasi secara maksimal.



Gambar 6.1. Pola-pola susunan antara pembuluh darah dan medium respirasi (a) tipe *uniform pool*, (b) tipe berlawanan arah atau *countercurrent*, (c) tipe searah atau *concurrent*, dan (d) tipe aliran bersilang atau *crosscurrent* (Diadaptasi dari Kay, 1998: 78).

6. 6. Respirasi Melalui Difusi Sederhana

Proses difusi melalui permukaan tubuh ditemukan pada hewan uniseluler maupun multiseluler. Syarat utama dari proses ini adalah bahwa sel-sel hewan tersebut harus berukuran 1 mm atau diliputi

oleh medium air setebal minimal 1 mm. Hewan-hewan multiseluler sederhana misalnya ubur-ubur, sel-selnya memiliki diameter 1 mm dan sel-sel yang aktif bermetabolisme (yang memerlukan oksigen dalam metabolismenya) berada di bagian tepi (perifer) dari tubuhnya yang langsung bersentuhan dengan air. Pada cacing pipih, terjadi mekanisme memipih dan memanjang dalam rangka mencapai kondisi yang mudah dan efisien bagi proses difusi. Contoh lain pada hewan multiseluler adalah pada porifera, coelenterata, rotifera, platyhelminthes (sebagian besar), nematoda, dan beberapa spesies anelida.

Pada vertebrata, difusi sederhana dapat ditemukan pada beberapa spesies amfibi misalnya *Astylosternus robustus*. Hewan ini memiliki rambut-rambut yang bervaskular pada kulitnya untuk meningkatkan luas permukaan respirasi. Sepertiga dari suplai oksigen pada katak diperoleh dari proses difusi melalui kulitnya. Pada belut juga terjadi respirasi melalui difusi di kulit namun untuk kelas mamalia dan aves, proses semacam ini tidak efektif. Hal tersebut dikarenakan laju metabolismenya lebih tinggi sehingga kebutuhan oksigen juga lebih tinggi yang tidak mungkin tercukupi dengan proses difusi sederhana melalui kulit. Akan tetapi pada kelelawar (chiroptera), proses difusi tersebut dapat berlangsung pada kulit sayapnya dimana sekitar 10-15% CO_2 dikeluarkan melalui difusi di kulit sayap. Pada umumnya, respirasi melalui permukaan tubuh hanya efisien untuk hewan-hewan yang memiliki laju metabolisme rendah.

Proses difusi berjalan lambat jika membran pemisah antar dua sistem cukup tebal sehingga proses difusi dapat terhambat secara keseluruhan. Sebagai contoh, laju difusi pada jaringan ikat vertebrata hanya $0,0001 \text{ ml/cm}^2/\text{cm}/\text{atm}$ sedangkan laju difusi di udara meningkat mencapai 10.000 kali lebih cepat. Terjadinya difusi sebagai mekanisme respirasi pada hewan tidak berhubungan dengan kompleksitas hewan tersebut dan ke dalam filum apa dia tergolong, tetapi sangat ditentukan oleh ukurannya dan sifat permeabilitas permukaan tubuhnya terhadap CO_2 dan O_2 . Misalnya pada tahap awal perkembangan embrio termasuk juga embrio manusia sebelum implantasi, proses difusi menjadi satu-satunya

mekanisme untuk berlangsungnya respirasi. Pada hewan-hewan arthropoda akuatis yang berukuran sangat kecil baik tingkat juvenil maupun dewasanya melakukan mekanisme respirasi melalui difusi di permukaan tubuh, sedangkan pada arthropoda lainnya menggunakan insang sebagai organ respirasi.

6. 7. Respirasi Dengan Insang

Insang merupakan organ respirasi pada hewan akuatis. Organ ini merupakan modifikasi terhadap proses respirasi yang tidak mungkin terjadi jika tanpa melibatkan proses masuk-keluarnya air.

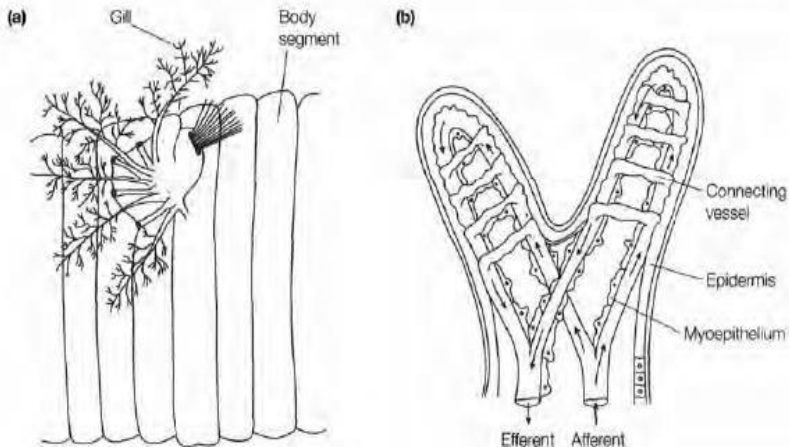
A. Respirasi Dengan Insang Pada Invertebrata

Pada cacing polycheta (misalnya *Arenicola*) terdapat insang eksternal yang termodifikasi membentuk parapodia berupa tonjolan-tonjolan lateral. Air akan bergerak melalui insang sebagai konsekuensi dari pergerakan tubuh. Pada polycheta lainnya, terdapat cilia pada insang yang meningkatkan pergerakan air. **Pada cacing (annelida)** terdapat alat respirasi berupa filamen-filamen yang berupa benang menjulur sebagai organ respirasi.

Pada moluska terdapat insang yang memiliki cilia untuk menggerakkan air melewati insang tersebut. Pada beberapa moluska (misalnya lamelibranchiata, *Mytilus*), insangnya juga berfungsi sebagai organ penyaring makanan. Pada cumi-cumi terdapat tongga mantel yang berdinding tebal dan berotot yang secara aktif memompa air keluar-masuk rongga sehingga memventilasi insang.

Pada Crustacea kelompok malacostraca (kepiting, lobster) terdapat insang di daerah thoraks atau kadang-kadang berupa tonjolan di abdomen yang ditutupi oleh carapaks. Bentuk dan jumlah insangnya tergantung pada kondisi tempat hidupnya, misalnya kepiting air cenderung memiliki insang yang lebih lebar dari pada kepiting darat. Aliran air pada insang crustacea biasanya satu arah (unidirectional) dan juga beberapa spesies lainnya mampu untuk membalikkan arah aliran tersebut. Aktivitas membalikkan arah aliran tersebut penting untuk membersihkan insang dari kotoran-kotoran (debris) yang terakumulasi.

Pada insekta akuatis (stadium dewasa atau juvenil) terdapat beragam bentuk insang. Pada larva Ephemeroptera terapat insang yang berupa tonjolan panjang di posterior abdomen. Selain itu juga terdapat perkembangan insang di dalam lumen rektum yang disebut insang anal seperti pada larva Odonata. Proses respirasi pada insang anal ini terjadi melalui mekanisme pergerakan air masuk dan keluar rektum.



Gambar 6.2. Struktur organ respirasi *Arenicola* sp. a) Cabang-cabang insang tempat pertukaran gas, b). Perbesaran penampang insang. Tanda panah menunjukkan aliran darah (Key, 1998: 80).

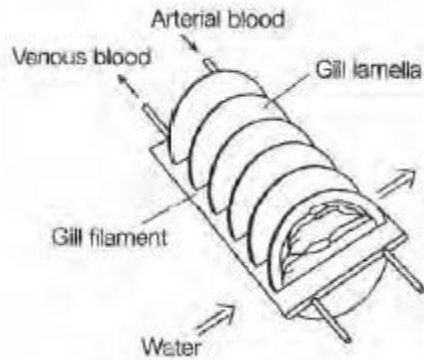
B. Respirasi Dengan Insang Pada Vertebrata

Insang pada vertebrata terdapat pada hewan akuatis. Terdapat dua tipe insang pada vertebrata, yaitu **insang eksternal** yang berfilamen dan **insang internal** yang berlamela. Insang internal merupakan tipe yang umum ditemukan. Kebanyakan vertebrata hanya memiliki insang eksternal selama tahap awal perkembangan (misalnya pada juvenil ikan dan katak).

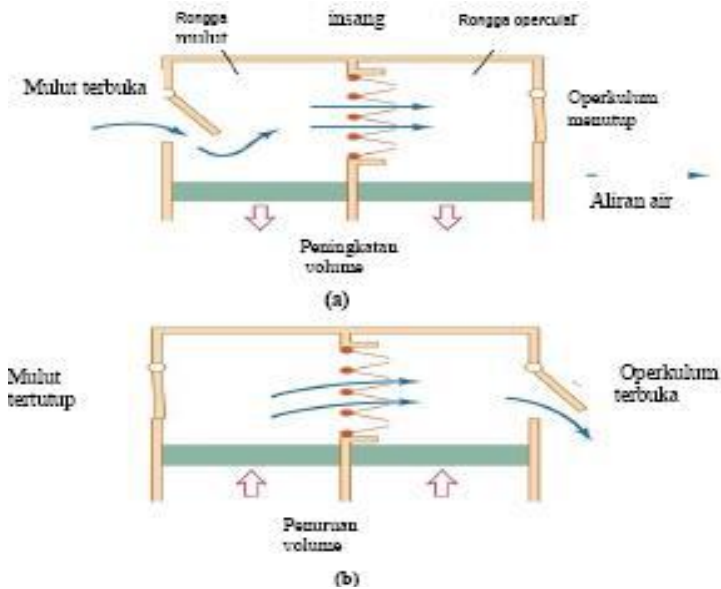
Struktur dan mekanisme kerja insang paling banyak dikaji pada kelompok Teleostei. Insang terdiri atas beberapa lengkung insang (*gill arch*) dari pelebran dua filamen insang. Pertukaran gas terjadi di lamela insang. Arah aliran air berlawanan dengan arah aliran darah pada kapiler di insang (*countercurrent*) yang memaksimalkan proses pengambilan oksigen ke dalam darah. Pergerakan air melalui insang terjadi melalui mekanisme pemompaan mulut dan rongga opercular. Mekanisme seperti ini disebut dengan *pompa buccal-operkular*. Adapun mekanismenya sebagai berikut:

- Air yang kaya oksigen dimasukkan ke dalam mulut akibat terjadi pelebaran rongga *bucco-pharyngeal* ketika rongga opercular di insang tertutup.
- Air didorong memasuki celah insang oleh kontraksi dinding *bucco-pharyngeal* ketika rongga operkular melebar. Saat melewati insang, terjadi difusi oksigen ke dalam kapiler darah di insang.
- Katup mulut yang menutup mencegah keluarnya air kembali melalui mulut saat rongga operkular berkontraksi sehingga air akan keluar melalui bukaan operkular di insang.
- Rongga *bucco-pharyngeal* kembali melebar sehingga air juga memasuki rongga mulut dan terjadi proses yang berulang.

Pada kebanyakan ikan yang berenang cepat seperti pada ikan tuna dan ikan hiu, saat berenang mulutnya selalu membuka sehingga terjadi pergerakan air memasuki mulut dan menuju insang yang disebut dengan **ventilasi penubruk (*ram ventilation*)**. Ukuran insang juga berhubungan dengan aktivitas hewan, dimana pada ikan-ikan perenang cepat seperti mackerel memiliki luas insang 10 kali dari pada insang ikan dasar perairan dan berenang lambat.



Gambar 6.3. Struktur insang ikan.



Gambar 6.4. Skema mekanisme respirasi melalui insang pada ikan Teleostei. (a) Ketika mulut terbuka, (b) ketika mulut tertutup (Hughes, 1965 *cit.* Griffin and Novick, 1970)

6. 8. Respirasi Dengan Trakhea

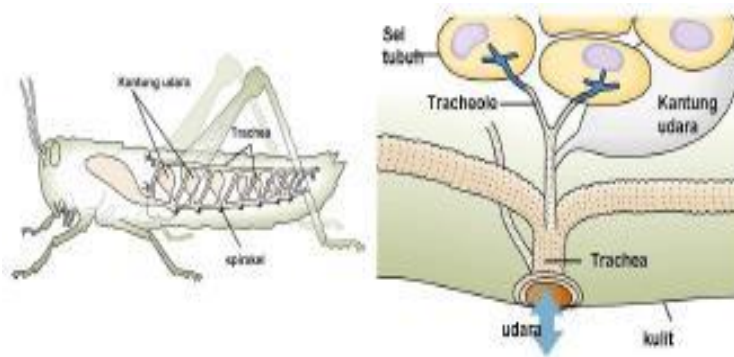
Sistem respirasi dengan menggunakan trachea umumnya ditemukan pada insekta dan beberapa arthropoda terestrial lainnya seperti milipoda, centiped, dan beberapa spesies laba-laba. Pada hewan dengan sistem respirasi ini terdapat seri tabung-tabung yang disebut dengan trakhea yang bercabang secara dikotomi menjadi bagian-bagian yang disebut trakheol. Trakhea terhubung dengan lingkungan luar melalui spirakel. Secara prinsip, sistem respirasi dengan trakhea, udara langsung disalurkan ke dalam sel-sel tubuh melalui pembuluh-pembuluh trakheola. Bahkan, kadang-kadang trakheola berpenetrasi ke dalam sel secara langsung dan mendekati bagian organel mitokondria sehingga pertukaran gas benar-benar terjamin. Dengan kata lain, sistem respirasinya tidak saling berhubungan dengan sistem sirkulasi dalam proses transportasi gas menuju sel atau jaringan.

Struktur dasar dari sistem ini terdiri atas 12 pasang spirakel yang terdiri atas 3 pasang di bagian thoraks dan yang lainnya berada di abdomen. Trakhea-trakhea tersebut saling berhubungan satu sama lain sehingga memungkinkan terjadinya aliran udara yang searah di dalam tubuh hewan. Akan tetapi, pada hewan-hewan yang sangat aktif bergerak seperti serangga yang aktif terbang seperti *Locusta* sp., terdapat modifikasi sistem trakhea yaitu dengan adanya kantung-kantung udara yang merupakan pelebaran dari dinding trakea yang tipis yang berfungsi sebagai pompa udara untuk keluar dan masuk sistem respirasi.

O₂ dan CO₂ masuk ke dalam tabung-tabung trakea melalui mekanisme difusi sederhana namun untuk rongga-rongga yang lebih besar biasanya juga diisi dengan udara dengan bantuan pergerakan otot-otot sekitarnya atau eksoskeleton. Spirakel dapat menutup atau membuka karena adanya katup yang dioperasikan oleh otot-otot yang sangat halus. Setiap spirakel juga punya rambut-rambut halus di tepinya untuk mencegah masuknya partikel debu dan parasit.

Pada hewan yang bernafas dengan trakhea seperti serangga memiliki modifikasi terhadap resiko kehilangan air dari dalam tubuh, dengan memiliki sistem pernafasan yang diskontinyu atau

respirasi siklik. Dalam hal ini, laju pengambilan O_2 berlangsung berlangsung kontinyu tetapi CO_2 dilepaskan secara periodik (*periodic burst*). Diantara sela-sela periode *burst* (periode letupan), CO_2 berada dalam kondisi terlarut dalam cairan tubuh dan spirakel berdenyut hingga menutup rapat. Selama spirakel berdenyut, tekanan dalam sistem trakhea menjadi di bawah tekanan atmosfer sehingga menjamin masuknya udara ke dalam trakhea dan mencegah keluarnya udara dari dalam tubuh. Setelah spirakel selesai berdenyut, spirakel menutup secara sempurna dan O_2 di dalam sistem trakea yang tertutup mulai dikonsumsi.



Gambar 6.5. Struktur organ respirasi sistem trakea pada insekta dan komponen-komponen sistemnya secara detail (Diadaptasi dari Campbell dkk, 2008)

6. 9. Respirasi Dengan Paru-Paru

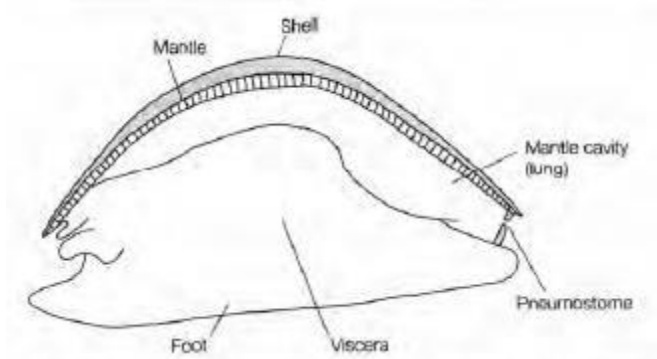
Paru-paru merupakan organ respirasi yang dimiliki oleh hewan-hewan yang medium respirasinya udara.

A. Respirasi Dengan Paru-Paru Pada Invertebrata

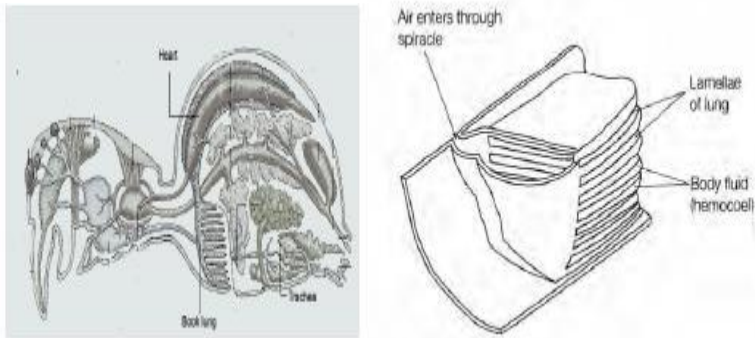
Pada invertebrata, respirasi dengan paru-paru terdapat **moluska** kelompok pulmonata. Paru-parunya terdapat di bagian punggung dimana rongga mantel berfusi dengan bagian belakang tubuh

hewan tersebut. Sistem tersebut dapat tertutup dari atmosfer bebas dengan adanya tutup pneumostom (*pneumostome closure*). Proses pertukaran gas antara paru-paru dengan lingkungan luar berlangsung melalui difusi sederhana.

Pada **kutu kayu** (*woodlice*) terdapat struktur menyerupai paru-paru tetapi kehidupannya masih terbatas di tempat yang basah. Pada **laba-laba** dan **kalajengking** (*chelicerata*) terdapat paru-paru buku yang terdapat di permukaan abdomen yang terdiri atas lapisan-lapisan lamela dan mirip dengan insang ikan.



Gambar 6.6. Diagram umum lokasi paru-paru Mollusca (Key, 1998: 83).



Gambar 6.7. Struktur paru-paru buku pada laba-laba. Udara (gas) memasuki rongga diantara lamela dan akan menuju cairan tubuh (Key, 1988: 83).

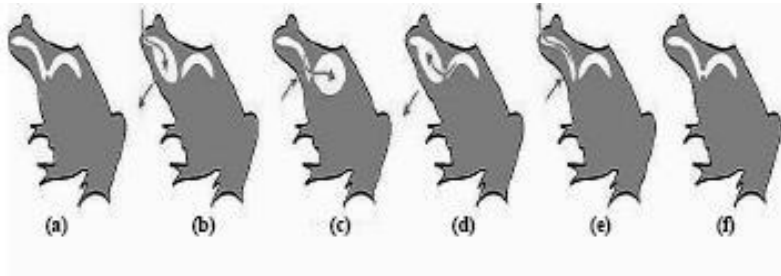
B. Respirasi Dengan Paru-Paru Pada Vertebrata

Paru-paru dapat ditemukan pada semua kelompok vertebrata seperti amphibi, reptil, aves, dan mamalia. Paru-paru pada **amphibi** berfungsi berdasarkan azas pompa tekanan positif (*positif pressure pump*). Udara masuk dan keluar rongga mulut secara kontinyu, udara terhalang memasuki rongga paru-paru karena adanya katup glottis yang menutup. Untuk dapat mengalirkan udara ke paru-paru, nostril atau lubang hidung menutup dan glottis terbuka dan udara terdorong dari dalam mulut ke dalam paru-paru dibawah tekanan positif. Proses tersebut berlangsung berulang-ulang agar paru-paru penuh terisi udara. Udara keluar paru-paru melalui mekanisme membukanya glottis.

Paru-paru pada **reptil** lebih berkompartemenisasi dari pada amphibi. Perbedaan spesifiknya dengan amphibi adalah mekanisme pernapasannya berlangsung melalui azas pompa hisap (*suction pump*). Pergerakan tulang-tulang dada ke arah luar menimbulkan tekanan sub atmosfer di dalam rongga dada dimana terdapat paru-paru. Tekanan udara di luar tubuh lebih tinggi dari pada di dalam paru-paru sehingga udara masuk ke dalam paru-paru menuruni gradien tekanan. Pada kelompok penyun dan kura-kura,

terdapat struktur diafragma sejati. Penyusuk juga memiliki respirasi kloaka saat menyelam.

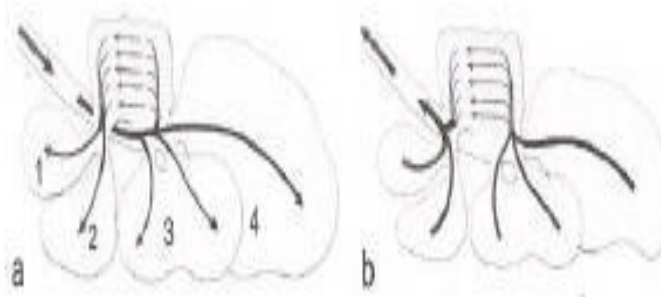
Paru-paru pada **mamalia** sangat terspesialisasi dengan struktur yang lebih kompleks. Udara masuk ke dalam paru-paru juga berdasarkan azas pompa hisap (*suction pump*) dimana udara masuk melalui trakea yang kemudian melewati cabang-cabang dari lanjutan saluran tersebut menuju alveoli sebagai tempat terjadinya pertukaran gas. Pada manusia juga dikaji tentang tipe pernafasan dada dan pernafasan diafragma yang akan dibicarakan selanjutnya.



Gambar 6.7. Mekanisme pernafasan pada katak dengan azas pompa tekanan positif (*positive pressure pump*). Keterangan (a) kondisi istirahat, (b) nostril terbuka dan rongga mulut atau buccal cavity melebar sehingga udara masuk, (c) nostril tertutup dan glottis terbuka diikuti oleh kontraksi rongga mulut sehingga udara terdorong ke dalam paru-paru dan paru-paru melebar, (d) rongga mulut melebar kembali dan paru-paru berkontraksi sehingga mendorong udara keluar ke rongga mulut, (e) nostril terbuka dan glottis tertutup sedangkan rongga mulut berkontraksi, (f) nostril menutup dan kembali pada kondisi istirahat.

Paru-paru pada **burung** sangat spesifik dengan adanya kantung udara (*air sac*) yang berhubungan dengan paru-paru. Pertukaran gas berlangsung di parabronchus yang merupakan

tabung-tabung paralel dengan ujung terbuka di kedua sisinya dan terjadi aliran udara satu arah. Untuk dapat mencapai satu volum optimal dari pernafasan, burung memerlukan dua siklus pernafasan yang lengkap. Kantung udara berperan dalam hal pemompaan udara agar bergerak mengelilingi sistem. Secara struktural, setiap parabronchus berasosiasi dengan kapiler-kapiler udara silindris yang terhubung dengan kapiler darah.

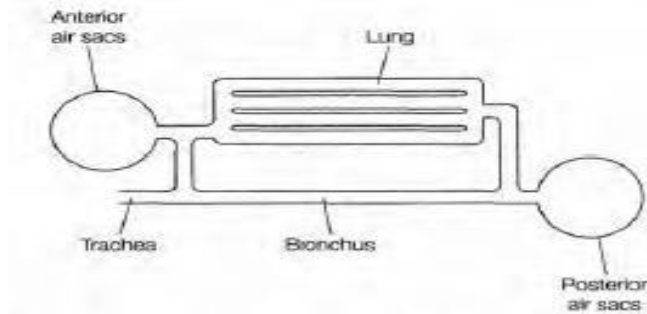


Gambar 6.8. skema arah aliran udara pada sistem respirasi burung saat proses (a) inspirasi, dan (b) ekspirasi. Keterangan : 1= *saccus interclavicular*; 2= *saccus craniothracalis*; 3= *saccus caudal thoracalis*; 4= *saccus abdominalis*.

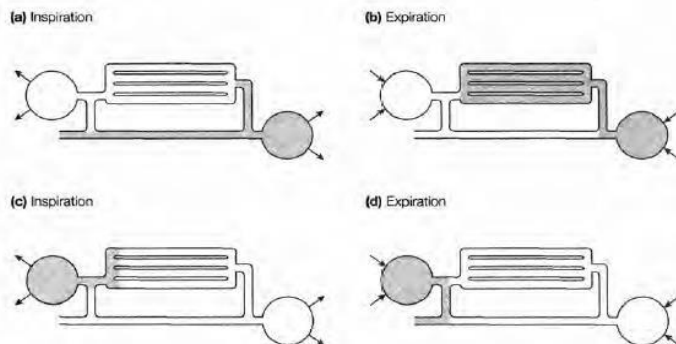
Adapun Siklus pernafasan pada burung meliputi tahap-tahap berikut :

1. Selama proses inspirasi pertama, udara masuk melalui nares menuju larynx dan trakea. Selanjutnya udara menuju syringe dan kemudian udara terbagi menjadi dua arah (karena trakea juga bercabang dua). Udara tidak masuk langsung ke paru-paru tetapi menuju kantung udara kaudal, sejumlah kecil udara akan masuk ke paru-paru.
2. Selama ekspirasi pertama, udara lebih banyak dipindahkan dari kantung udara ke paru-paru melalui ventrobronchi dan dorsobronchi. Bronchi-bronchi tersebut terbagi-bagi menjadi kapiler udara yang sangat kecil dan bertemu dengan kapiler darah sehingga terjadi pertukaran O_2 dan CO_2 di tempat tersebut.

- 3) Saat proses inspirasi kedua, udara masuk ke kantung udara cranial.
- 4) Saat ekspirasi kedua, udara keluar dari kantung udara cranial menuju sirink dan ke trakea melalui larynx hingga akhirnya keluar melalui nares.



Gambar 6.9. Struktur umum paru-paru burung (Key, 2008: 85)

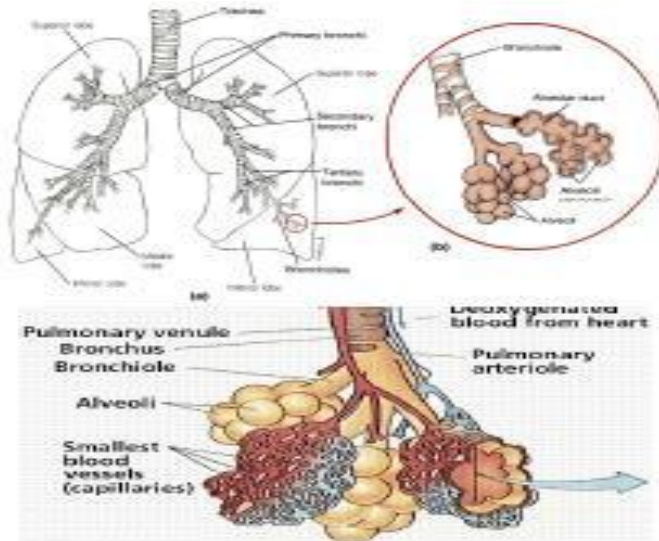


Gambar 6.10. Siklus pernafasan pada burung yang memperlihatkan bahwa dalam proses pernafasannya burung membutuhkan dua kali siklus respirasi. Tanda panah pada kantung udara menunjukkan arah gerakan dindingnya (Bredt and Schmidt Nielsen; *Journal Experimental Biology*, 56: 57-65, 1972 dalam Key, 2008: 85)

6.10. Proses Pernafasan Pada Mamalia

Pada mamalia, misalnya manusia, proses respirasi eksternal berlangsung dengan mekanisme yang melibatkan kontraksi dan relaksasi otot diafragma, dinding dari rongga dada dan paru-paru sendiri. Paru-paru berada dalam rongga pleura dimana di sekitarnya terdapat ruang kosong yang memungkinkan paru-paru untuk berkontraksi atau relaksasi seiring proses kontraksi dan relaksasi yang dialami oleh diafragma dan rongga dada.

Pada manusia dikenal tiga tipe pernafasan yaitu pernafasan dada, pernafasan diafragma, dan pernafasan clavikular. Keluar masuknya gas dari dan ke paru-paru sangat ditentukan oleh gradien tekanan di dalam rongga sekitar paru-paru.



Gambar 6.11. Paru-paru pada mamalia

A. Pernafasan dada (*costal breathing*)

Mekanismenya diawali oleh terangkatnya dinding rongga dada sehingga terjadi pengembangan rongga dada. Selanjutnya tulang rusuk terangkat dan memberikan ruang di bagian tengah dan di tepi

sekitar paru-paru. Adanya ruang tersebut menyebabkan tekanan dalam paru-paru menurun sehingga udara dari luar dapat masuk. Mekanisme pernafasan ini tidak efisien karena kapasitas volume udara yang dapat direspirasikan sangat terbatas.

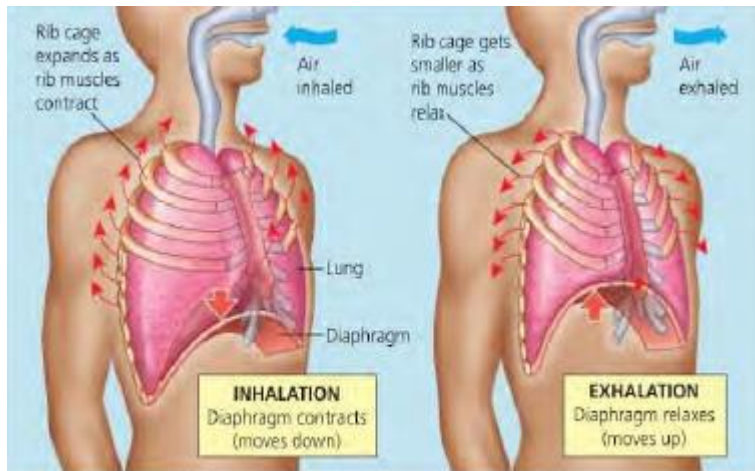
B. Pernafasan diafragma (pernafasan perut)

Mekanisme pernafasan diafragma melibatkan otot diafragma. Inisiasi pernafasan karena kontraksi diafragma yang berada di bawah paru-paru sehingga diafragma berubah dari membesar menjadi datar. Mendatarnya otot diafragma memberikan ruang yang lebih luas terhadap pulmo sehingga rongga sekitar pulmo melebar dan tekanan udara dalam paru-paru menjadi lebih rendah. Karena tekanan di luar tubuh lebih tinggi, maka udara akan masuk ke dalam paru-paru menuruni gradien tekanan (terjadi inspirasi). Proses ekspirasinya berlangsung ketika diafragma berelaksasi sehingga memperkecil rongga sekitar paru-paru dan meningkatkan tekanan udara dalam paru-paru.

Proses pernafasan ini merupakan tipe yang umum pada bayi dan infant serta ketika dalam kondisi istirahat atau tidur. Pernafasan tipe ini sangat berguna bagi kontrol emosi (ketenangan) dan mengurangi depresi karena suplai oksigen mencapai kapasitas optimal

C. Pernafasan clavicular (*clavicular breathing*)

Proses pernafasan ini terjadi saat kebutuhan oksigen dalam kondisi sangat kritis (misalnya saat serangan asthma atau bronkitis). Mekanismenya terjadi melalui pergerakan clavicula sehingga ruang bagian atas dari pulmo bertambah dan menurunkan tekanan udara dalam pulmo sehingga udara luar dapat masuk. Kapasitas inspirasi dan ekspirasi dalam proses pernafasan ini sangat terbatas dan tidak mencukupi untuk kebutuhan respirasi tetapi berlangsung pada saat darurat.



Gambar 6.12. Mekanisme inspirasi (inhalation) dan ekspirasi (exhalation) pada manusia yang melibatkan kontraksi dan relaksasi diafragma dan tulang dada (Champbell dkk, 2008)

6.11. Kapasitas Paru-Paru

Istilah volume paru-paru mengacu kepada perbedaan-perbedaan fisik dari volume paru-paru. Sedangkan kapasitas paru-paru menyatakan kombinasi-kombinasi dari volume paru-paru yang biasanya mengalami dinamika selama proses inspirasi dan ekspirasi. Pada manusia, keseluruhan volume paru-paru dapat menampung sekitar 6 liter udara tetapi hanya sejumlah kecil dari kapasitas tersebut yang digunakan selama pernafasan. Rata-rata manusia bernafas sebanyak 9-20 kali per menit.

Ada beberapa faktor yang menentukan volume paru-paru diantaranya adalah jenis kelamin, ukuran tubuh, kebiasaan berolahraga, dan ketinggian tempat tinggal dari permukaan laut. Pria memiliki volume paru-paru lebih besar dari pada wanita, orang bertubuh tinggi akan memiliki volume paru-paru juga lebih lebar dari pada yang bertubuh pendek. Para atlet yang terbiasa berolahraga juga akan memiliki volume paru-paru lebih besar. Adapun orang yang tinggal di tempat yang tinggi (dari permukaan

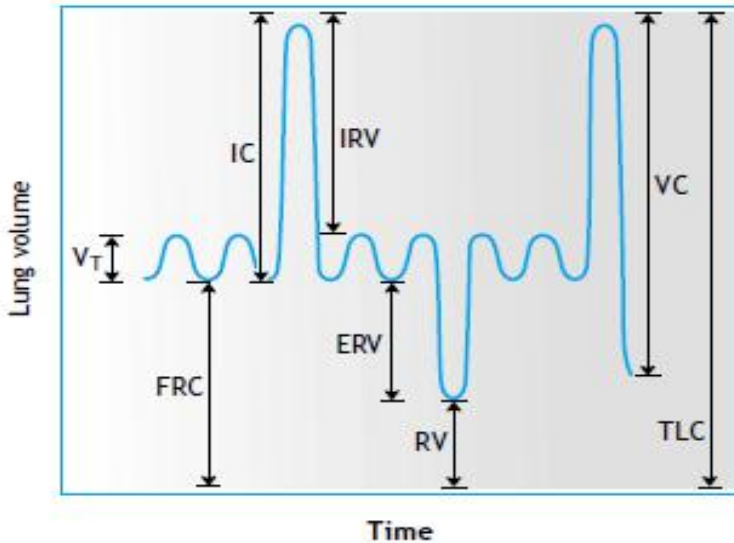
laut) akan memiliki volume lebih besar dari pada di tempat yang rendah seperti di dekat pantai. Seseorang yang lahir dan tinggal di dekat pantai atau di dataran rendah akan memiliki kapasitas paru-paru yang lebih kecil karena tekanan atmosfer lebih besar daripada di tempat ketinggian. Sebagai respon terhadap tempat yang tinggi, kapasitas difusi tubuh meningkat agar dapat memperoleh pasokan oksigen yang memadai. Jika seseorang yang tinggal di daerah pantai pergi ke daerah yang lebih tinggi (misalnya ke daerah pegunungan atau puncak-puncak tinggi seperti Himalaya), maka orang tersebut dapat mengalami gejala susah bernafas karena paru-parunya tidak dapat berespirasi secara optimal pada kondisi tekanan atmosfer yang rendah dimana kadar O_2 juga sedikit.

Secara spesifik, komponen-komponen udara pernafasan terdiri atas beberapa aspek yaitu :

- a. Kapasitas total paru-paru (*total lung capacity: TLC*) yang menyatakan volume udara yang terdapat di dalam paru-paru setelah proses inspirasi maksimal. Pada pria dewasa sekitar 6 liter sedangkan pada wanita 4,7 liter. $TLC = IRV + V_t + ERV + RV$.
- b. Kapasitas vital paru-paru (*Vital capacity: VC*) yaitu jumlah udara yang dapat dikeluarkan oleh paru-paru setelah proses inspirasi maksimal. Volume ini menyatakan volume maksimum udara yang dapat keluar dan masuk sistem respirasi secara bebas. Pada pria nilai VC sekitar 4,6 liter dan pada wanita 3,6 liter. $VC = IRV + V_t + ERV$.
- c. Kapasitas Vital Hembusan (*Forced Vital Capacity; FVC*) yaitu jumlah udara yang dapat dihembuskan secara maksimal dari dalam paru-paru setelah proses inspirasi maksimal. Pada pria sekitar 4,8 liter dan wanita 3,7 liter.
- d. Volume Tidal (V_t) yang menyatakan jumlah udara yang dihirup atau dihembuskan selama proses respirasi normal yang pada pria sekitar 500 ml dan wanita 390 ml.
- e. Volume Residu (*Residual Volume: RV*) yaitu jumlah udara yang masih tersisa dalam paru-paru setelah ekspirasi maksimal. Hal ini menyatakan jumlah udara yang selalu ada di dalam paru-paru dan tidak pernah dapat diekspirasikan. Pada pria nilainya 1,2 liter sedangkan pada wanita 0,93 liter.

- f. Volume Cadangan Ekspirasi (*Expiratory Reserve Volume: ERV*) yang menyatakan jumlah udara tambahan yang dapat dihembuskan setelah akhir dari level ekspirasi saat pernafasan normal. Nilainya sama dengan volume residu.
- g. Volume Cadangan Inspirasi (*Inspiratory Reserve Volume: IRV*) yaitu udara tambahan yang dapat dihirup setelah proses inspirasi tidal normal atau volume maksimum udara yang dapat dihirup sebagai tambahan terhadap volume tidal. Pada pria nilainya sekitar 3 liter dan pada wanita 2,3 liter. $IRV = VC - (TV + ERV)$
- h. Kapasitas Residu Fungsional (*Functional Residual Capacity: FRC*) yaitu jumlah udara yang tersisah di dalam paru-paru setelah proses ekspirasi tidal normal atau jumlah udara yang berada di dalam paru-paru selama proses pernafasan normal. Pada pria nilainya sekitar 2,4 liter dan pada wanita 1,9 liter. $FRC = ERV + RV$.
- i. Kapasitas Inspirasi (*Inspiratory Capacity : IC*) yaitu volume maksimum yang dapat dihirup setelah terjadinya proses ekspirasi normal. Nilainya pada pria 3,5 liter dan pada wanita 2,7 liter. $IC = V_t + IRV$.
- j. *Anatomical Dead Space* yaitu volume saluran udara yang diukur dengan metode Fowler. Pada pria sekitar 150 ml dan pada wanita 120 ml.
- k. *Physiologic Dead Volume* yaitu penjumlahan anatomical dead space dan alveolar dead space. Nilainya pada pria 155 ml dan wanita 120 ml. $VT = (PACO_2 - PECO_2) : PACO_2$.

Volume tidal, kapasitas vital, kapasitas volume cadangan inspirasi dan ekspirasi dapat diukur dengan spirometer. Sedangkan volume residu diukur dengan planimetri radiography atau *body plethysmography*.



Gambar 6.13. Skema volume udara paru-paru pada manusia dengan berbagai aspeknya.

6.12. Transpor Gas O₂ dan CO₂

A. Transportasi Oksigen

Transportasi oksigen dalam darah dapat berlangsung dengan dua cara yaitu dapat dibawa langsung dalam plasma darah (cara sederhana) dan berkonjugasi dengan pigmen respirasi yang merupakan unit yang dapat berikatan dengan oksigen secara reversibel. Kebanyakan invertebrata mentransportasikan oksigen melalui plasma. Hewan-hewan tersebut umumnya memiliki laju metabolisme yang rendah sehingga kebutuhan oksigennya juga rendah. Sedangkan pada hewan-hewan invertebrata yang lebih tinggi dan seluruh vertebrata, kebutuhan oksigennya sangat tinggi karena laju metabolismenya yang tinggi. Dengan demikian, sesungguhnya keberadaan pigmen respirasi dalam darah penting artinya untuk meningkatkan kapasitas angkut oksigen dalam darah

menuju sel-sel tempat terjadinya respirasi seluler. Misalnya pada mamalia, keberadaan hemoglobin ternyata mampu meningkatkan daya angkut oksigen dalam darah menjadi 20 kali lipat dibandingkan dengan hanya mengandalkan transportasinya di dalam plasma dimana hemoglobin memungkinkan darah mampu mentransportasikan 20 ml oksigen dalam 100 ml darah.

Keberadaan pigmen respirasi seperti hemoglobin adalah untuk mengikat dan melepaskan oksigen ke bagian yang membutuhkan. Dalam seluruh prosesnya, pergerakan oksigen dari organ respirasi eksternal hingga sampai di sel tempat respirasi seluler berlangsung melalui mekanisme difusi. Oksigen akan terikat pada konjugat dari pigmen respirasi. Secara sederhana, reaksi reversibel antara hemoglobin dalam eritrosit dengan oksigen adalah sebagai berikut :



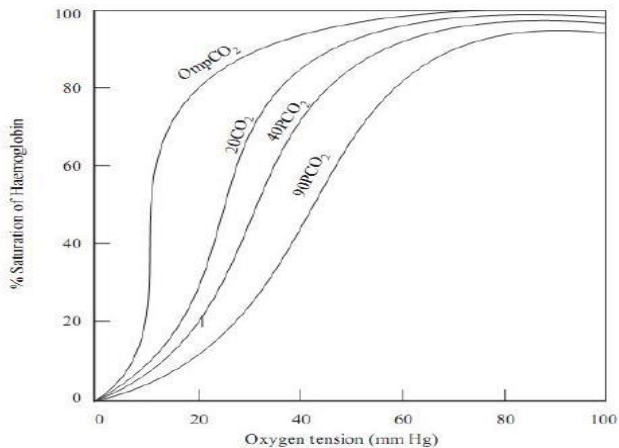
Meskipun persamaan tersebut terlihat sederhana, tetapi proses sebenarnya sangat kompleks dan bukan hanya terdiri dari satu reaksi kimia semata.

Tabel 6.2. Kapasitas angkut darah hewan dalam hubungannya dengan efektivitas hemoglobin dibandingkan dengan hemosianin dan mekanisme adaptasi fisiologis

Kelompok Hewan	Kapasitas angkut darah
Moluska dan Arthropoda	1-4 ml O ₂ /100 ml darah
Anelida laut (<i>Arenicola</i> sp.)	9 ml O ₂ /100 ml darah
Ikan (Pisces)	10-16 ml O ₂ /100 ml darah
Mamalia terestrial dan Aves	15-20 ml O ₂ /100 ml darah
Mamalia laut (anjing laut dan lumba-lumba)	Mencapai 30 ml O ₂ /100 ml darah

(Griffin and Novick, 1970).

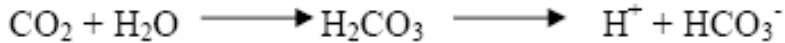
Ikatan oksigen dengan hemoglobin dapat diperlihatkan dalam bentuk kurva disosiasi oksihemoglobin. Secara eksperimen, suatu sampel darah dimana sebelumnya tidak ada oksigen yang terikat lalu didedahkan dengan sederetan perlakuan kadar oksigen yang meningkat (yang juga berarti tekanan parsial atau pO_2 juga meningkat). Selanjutnya dilakukan pengukuran kadar oksigen yang terikat dengan Hb diukur (nilai kejenuhannya). Dari hasil eksperimen ternyata diketahui bahwa hubungan antara oksigen yang terikat dalam darah dengan tekanan parsial oksigen (pO_2) tidak bersifat linier melainkan berupa kurva sigmoid atau kurva berbentuk S. Kurva tersebut dinamakan kurva disosiasi oksigen-hemoglobin.



Gambar 6.14. Kurva disosiasi oksigen yang memperlihatkan efek pH (dalam hal ini kadar CO_2 terlarut). Ketika pH menurun, Hb memiliki afinitas yang kecil terhadap oksigen dan banyak oksigen yang dilepaskan ke jaringan. Hal ini dikenal dengan efek Bohr (Rastogi, 2007: 275).

Ada beragam faktor yang mempengaruhi ikatan oksigen dengan hemoglobin. Faktor yang terpenting adalah pCO_2 (menyatakan kandungan CO_2) dan kandungan H^+ (menyatakan pH)

dalam darah. CO₂ adalah gas yang bersifat asam dimana ketika terlarut dalam air maka akan terjadi reaksi sebagai berikut :



Efek yang ditimbulkan oleh peningkatan kadar CO₂ ataupun H⁺ (atau menurunnya pH) menyebabkan pergeseran kurva disosiasi oksigen ke arah kanan. Ini diistilahkan dengan **efek Bohr** yaitu efek pH terhadap afinitas Hb-oksigen (pH rendah maka afinitas menurun dan sebaliknya, sehingga kurva disosiasi oksigen bergeser ke kanan atau ke kiri). Hal ini memiliki konsekuensi fisiologis yang penting karena hal tersebut menyebabkan hemoglobin menolak oksigen untuk berikatan dengannya. Hal ini khususnya penting bagi jaringan yang sedang sangat aktif digunakan misalnya pada saat berolahraga dimana terdapat peningkatan kadar karbondioksida ketika laju metabolisme meningkat. Dinamika perubahan efek Bohr mungkin akan lebih progresif jika ada derajat metabolisme anaerobik dengan resultan produksi asam laktat.

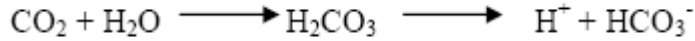
Perubahan Bohr juga dipengaruhi oleh beragam molekul fosfat organik seperti 2,3- bifosfoglisarat (2,3-BPG) yang merupakan intermediet dari jalur glikolisis. Level 2,3- BPG pada manusia yang tinggal di pegunungan tinggi, dimana kadar oksigen rendah, akan lebih tinggi dibandingkan dengan manusia yang tinggal di dataran rendah atau daerah pantai. Hal ini menjamin berlangsungnya transfer oksigen yang terikat dalam hemoglobin di darah segera diransfer ke sel-sel yang membutuhkan. Pada hewan-hewan lainnya juga beragam senyawa fosfat organik juga memiliki efek yang sama misalnya ATP pada ikan, amphibi dan beberapa reptil. Beberapa spesies ikan, Crustacea, dan Cephalopoda memperlihatkan perubahan yang sangat besar dari kurva disosiasinya baik ke arah kanan maupun ke arah bawah (menurun) sebagai responnya terhadap level CO₂. Hal ini diistilahkan dengan **efek Root** dimana penurunan pH tidak hanya menyebabkan penurunan afinitas hemoglobin terhadap oksigen tetapi juga menurunkan kapasitas oksigen.

Jika pola efek Bohr diukur pada berbagai spesies mamalia, akan ditemukan pola yang tidak sama, yang mengindikasikan bahwa hemoglobin pada spesies mamalia yang berbeda menunjukkan reaksi yang berbeda juga. Telah diketahui bahwa hemoglobin pada mamalia kecil (misalnya mencit) lebih sensitif terhadap CO_2 dan H^+ daripada hemoglobin mamalia besar seperti gajah. Hal ini sangat terkait erat dengan fisiologis hewan yang bersangkutan. Mencit memiliki rasio luas permukaan dengan volume yang lebih besar sehingga akan kehilangan panas tubuh lebih cepat. Misalnya jika mencit memiliki kebutuhan absolut untuk mempertahankan suhu tubuh pada 37°C , maka laju metabolisme dan konsumsi oksigennya harus ditingkatkan sebagai kompensasi dari kehilangan energi panas karena produksi panas yang dihasilkan selama metabolisme diperlukan untuk menjaga stabilitas suhu tubuh. Oleh sebab itu, kebutuhan oksigen per unit berat jaringan pada mencit secara proporsional akan lebih tinggi daripada gajah. Gajah memiliki rasio luas permukaan tubuh dan volume yang lebih rendah sehingga menurunkan laju kehilangan panas. Dengan demikian, hemoglobin pada mencit yang secara khusus sensitif terhadap CO_2 dan H^+ menjamin kebutuhan oksigen yang lebih besar dalam jaringan. Atas dasar hal tersebut maka dapat dipahami mengapa mencit memiliki laju metabolisme yang sangat tinggi. Sedangkan gajah memiliki laju metabolisme dan kebutuhan oksigen per unit berat jaringan lebih rendah. Sebagai konsekuensinya, hemoglobinnya tidak terlalu sensitif terhadap perubahan CO_2 dan H^+ .

B. Transportasi Karbondioksida

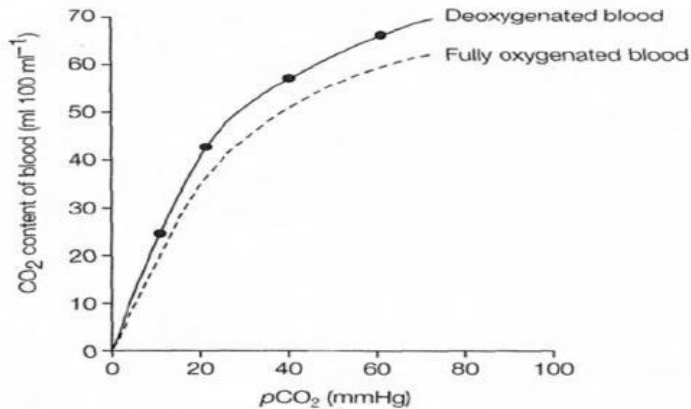
Mekanisme transportasi CO_2 dalam darah lebih sederhana dari pada transportasi oksigen, karena tidak dibutuhkan pigmen respirasi khusus untuk membawanya. CO_2 lebih mudah larut dalam larutan dari pada O_2 (sekitar 20-30 kali lebih tinggi). Proses transportasi CO_2 , juga berlangsung dengan mekanisme difusi sederhana. CO_2 yang dihasilkan di jaringan atau sel akan masuk ke plasma darah dan selanjutnya masuk ke dalam eritrosit (jalur pengangkutan pertama).

Sebagai senyawa yang mudah larut dalam air, CO_2 akan terikat dalam bentuk ion bikarbonat (HCO_3^-). Alasan yang dapat menjelaskan hal tersebut adalah ketika CO_2 larut dalam plasma, maka akan segera terjadi reaksi berikut :



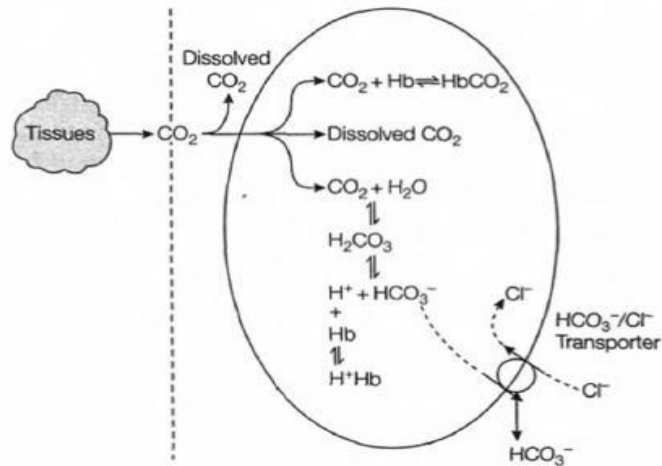
Biasanya, pembentukan asam karbonat (H_2CO_3) berlangsung sangat lambat. Oleh karenanya, reaksi tersebut yang berlangsung di dalam eritrosit, akan dipercepat oleh enzim karbonat anhidrase.

Jalur kedua proses transportasi CO_2 adalah melalui ikatan dengan hemoglobin. CO_2 akan berikatan dengan kelompok NH_2 bebas dari komponen protein di hemoglobin. Hasilnya adalah terbentuknya persenyawaan karbamino. Pada hewan-hewan yang tidak memiliki hemoglobin, pigmen respirasinya yang lain (misalnya hemosianin) akan berfungsi dengan pola yang sama dengan hemoglobin.



Gambar 6.15. Kurva Disosiasi CO_2 dalam darah miskin oksigen (*deoxygenated blood*) dan darah kaya oksigen (*fully oxygenated blood*) pada vertebrata. Darah yang kaya oksigen menurunkan afinitasnya terhadap CO_2 sehingga kurva bergeser ke kanan. Ini dinamakan dengan efek Haldane.

Seperti halnya dengan O_2 , maka dapat juga dibentuk suatu kurva disosiasi untuk CO_2 . Hal yang harus diperhatikan adalah bahwa kurva disosiasi yang diperoleh dari darah yang bebas oksigen (darah deoksigenasi) akan bergeser ke arah kiri, jadi darah bebas oksigen memiliki kemampuan untuk mengikat lebih banyak CO_2 daripada darah yang beroksigen (darah oksigenasi). Pergeseran ini disebut dengan **efek Haldane**. Alasan untuk menjelaskan fenomena tersebut adalah bahwa hemoglobin darah yang tidak mengandung oksigen memiliki muatan yang lebih negatif yang berasosiasi dengannya sehingga dapat menyanggah H^+ lebih banyak. Kondisi tersebut akan memacu perubahan CO_2 menjadi HCO_3^- .



Gambar 6.16. Jalur transportasi CO_2 dalam darah. Di paru-paru atau insang, reaksi tersebut berkebalikan dan CO_2 dilepaskan ke lingkungan luar.

6. 13. Kontrol Respirasi

Aktivitas bernafas harus dikontrol agar konsentrasi gas yang diperlukan mencukupi dan konsentrasinya berada dalam kondisi proporsional dalam cairan tubuh. Hewan akuatis dan terestrial memiliki karakter responsif yang berbeda terhadap oksigen dan karbondioksida (hewan akuatis lebih responsif terhadap perubahan kadar oksigen, sedangkan hewan terestrial lebih responsif terhadap perubahan karbondioksida). Oleh sebab itu, kontrol respirasi juga melibatkan karakter responsif tersebut.

Ikan memiliki pusat pengontrol respirasi di medulla pada batang otak. Aktivitas neuron-neuron di bagian tersebut menghasilkan pola dasar pernafasan. Ikan dapat memonitor level oksigen (dengan adanya kemoreseptor). Lokasi *kemoreseptor* tersebut ditemukan di mulut, insang, rongga operkular atau di dalam arteri dan vena sirkulasi. Ada banyak faktor yang dapat menstimulus proses pernafasan seperti suhu dan perubahan osmotik. Regulasi pernafasan pada hewan-hewan yang bernafas di udara mengikuti prinsip yang sama dengan hewan akuatis, kecuali dalam hal gas yang menjadi stimulus primer pernafasan yaitu karbondioksida.

Pada **serangga**, mekanisme pengontrolan respirasi dengan cara membuka dan menutupnya spirakel dengan melibatkan CO₂. Diduga juga bahwa ritme respirasi pada serangga diatur oleh *korda nervus ventral*.

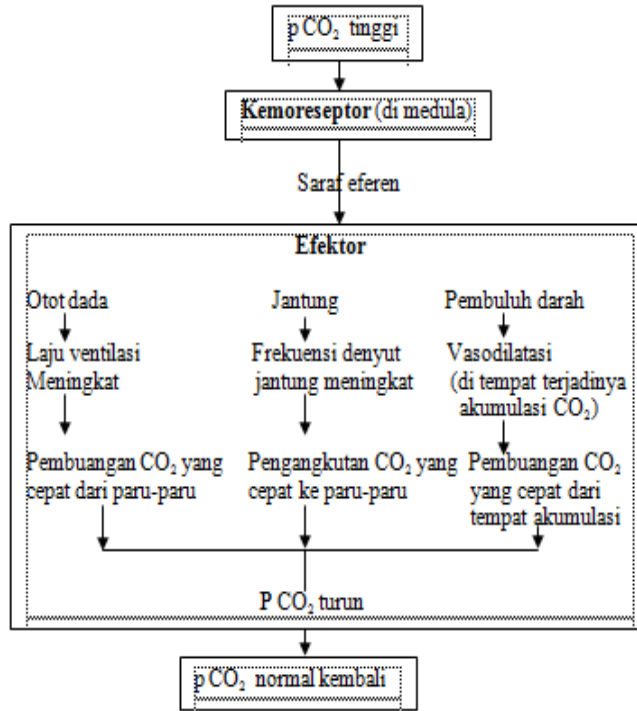
Pada vertebrata yang bernafas di udara, terdapat lokasi spesifik dari medula di batang otak yang mengatur ritme pernafasan. Hewan **amphibi** memiliki *kemoreseptor* yang berespon baik terhadap CO₂ maupun O₂, namun stimulus pernafasan utama tetap berupa CO₂. Mekanisme pengontrolan respirasi yang detail dapat bervariasi tergantung kepada tahap dari siklus kehidupannya. Dengan pola yang sama, **reptil** juga memiliki sensor CO₂ pada sistem respirasinya, kendati pada beberapa spesies reptil, O₂ justru menjadi stimulus primer dalam respirasi. Seperti juga pada amphibia, **burung** memiliki sistem respirasi yang dikendalikan oleh perubahan kadar CO₂ kendati ada detektor yang berespon terhadap perubahan O₂.

Kontrol pernafasan secara lengkap telah dipelajari pada mamalia. Pada mamalia, CO₂ yang terkonsentrasi di dalam darah merupakan stimulus primer proses respirasi. Di bagian permukaan *medula dari batang* otak mamalia terdapat kemoreseptor yang sensitif terhadap CO₂. Reseptor tersebut tertanam di dalam cairan serebrospinal, yang dihasilkan di dalam ventrikel otak dan mengalir ke seluruh permukaan otak terdekat dan korda spinalis. Peranan cairan serebrospinal tersebut adalah sebagai peredam guncangan, yang memberikan perlindungan bagi sistem saraf dengan mekanisme perlindungan fisik. Pada dasarnya, kemoreseptor di medulla sangat responsif terhadap ion H⁺ dari pada dengan CO₂. Hal tersebut dikarenakan CO₂ dalam darah melewati cairan serebrospinal dan terlarut seperti persamaan berikut :



Dengan demikian kemoreseptor berperan sebagai pH meter. Peningkatan kadar CO₂ dalam darah akan menurunkan pH di dalam cairan serebrospinal (karena peningkatan ion H⁺ sehingga bersifat lebih asam). Sebagai respon terhadap perubahan tersebut adalah terjadinya peningkatan laju pernafasan yang akan menurunkan kelebihan kadar CO₂ dan mengembalikan kadarnya dalam darah ke level normal.

Selain reseptor di otak, juga terdapat reseptor di arteri besar (di aorta dan carotid) yang memonitor level O₂ dalam darah. Akan tetapi, yang memberikan stimulus primer terhadap pernafasan tetap CO₂. Sensitifitas reseptor tersebut terhadap O₂ lebih rendah dari pada sensitifitas kemoreseptor di medula yang memonitor CO₂. Oleh sebab itu, kandungan O₂ di darah akan menurun secara signifikan sebelum terjadinya peningkatan laju pernafasan yang diinisiasi oleh mekanisme pengaturan kadar CO₂ ke level normal.



Gambar 6.17. Kontrol kadar/tekanan CO₂ dalam darah

BAB VII

SISTEM EKSKRESI

Dalam rangka memenuhi kebutuhannya akan energi (ATP), semua hewan menyelenggarakan berbagai reaksi metabolisme. Reaksi metabolisme selain menghasilkan ATP dan produk bermanfaat lainnya, juga menghasilkan zat sisa. Berbagai produk sisa yang dihasilkan dari aktivitas metabolisme dalam tubuh merupakan zat sisa yang harus dibuang keluar tubuh agar fungsi-fungsi fisiologis berjalan normal. Zat-zat utama yang dianggap sebagai sisa hasil metabolisme adalah karbondioksida, air, dan senyawa-senyawa nitrogen.

Pada bab ini mengkaji tentang organ ekskresi pada invertebrata dan vertebrata. Kajian lebih dititikberatkan kepada fungsi organ ekskresi. Setelah mempelajari bab ini anda diharapkan dapat memahami bagaimana sistem ekskresi hewan invertebrata dan vertebrata, organ ekskresi dan mekanisme pembentukan urin.

7.1. Organ Ekskresi

Ekskresi adalah proses pembuangan zat-zat sisa dari jaringan tubuh ke luar tubuh. Organ-organ atau jaringan yang bertanggung jawab untuk mengeliminasi dan mengeluarkan produk sisa dari dalam tubuh disebut **organ ekskresi**. Organ-organ tersebut mengeliminasi produk sisa dengan beberapa cara yaitu :

- (a) Dengan mengeliminasi sampah bernitrogen
- (b) Dengan mengatur keseimbangan air dalam tubuh

(c) Dengan menjaga komposisi ionik dari cairan ekstraseluler

Organ-organ utama yang membantu dalam proses ekskresi adalah **integumen, insang, hepar, intestinum, paru-paru** dan **ginjal**. Pada hewan-hewan tingkat rendah seperti protozoa dan porifera, proses ekskresi terjadi secara langsung melalui **membran seluler** melalui proses osmosis dan difusi.

Pada Amoeba dan Paramecium, proses ekskresi dilakukan oleh vakuola kontraktil. Pada invertebrata dan vertebrata tingkat tinggi, organ ekskresi memiliki fungsi ekskretoris yang terspesialisasi. Integumen dan kulit membantu dalam eliminasi urea melalui kelenjar keringat. Bersama dengan urea, garam-garam anorganik juga ikut terbawa. Insang dan paru-paru membantu dalam membuang zat-zat berupa gas seperti karbondioksida. Hepar juga merupakan salah satu organ yang sangat penting dalam mengeliminasi kelebihan kolesterol dari dalam tubuh, garam empedu, dan kelebihan garam-garam Fe. Produk-produk ekskresi hepar akan dibuang melalui intestinum dalam bentuk feses. Epitel intestinum juga mengekskresikan beberapa garam anorganik yang berlebihan. Rubidium, potasium, kalsium, magnesium dan lainnya diekskresikan pada dinding intestinum. Ginjal adalah organ ekskresi utama pada semua kelompok vertebrata dan juga pada beberapa invertebrata yang berfungsi dalam membuang urea, kelebihan air, garam-garam dan sisa nitrogen. Mekanisme renal bertanggung jawab dalam pembentukan regulasi ionik atau kesetimbangan cairan pada sebagian besar hewan. Sistem ekskresi membantu memelihara homeostasis dengan tiga cara, yaitu melakukan osmoregulasi, mengeluarkan sisa metabolisme, dan mengatur konsentrasi sebagian besar penyusun cairan tubuh.

Zat sisa metabolisme berupa molekul kompleks dan tidak berguna lagi bagi tubuh. Sisa metabolisme antara lain, karbon dioksida (CO_2), air (H_2O), ammonia (NH_3), zat warna empedu, dan asam urat.

Karbon dioksida dan *air* merupakan sisa oksidasi atau sisa pembakaran zat makanan yang berasal dari karbohidrat, lemak dan protein. Kedua senyawa tersebut tidak berbahaya bila kadarnya tidak berlebihan. Walaupun CO_2 berupa zat sisa namun sebagian

masih dapat dipakai sebagai *dapar* (penjaga kestabilan pH) dalam darah. H₂O dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan, misalnya sebagai pelarut. Amonia (NH₃), hasil pembongkaran/pemecahan protein, merupakan zat yang beracun bagi sel. Oleh karena itu harus dikeluarkan dari tubuh. Amoniak disimpan sementara dalam tubuh setelah dirombak menjadi zat yang kurang beracun, yaitu dalam bentuk *urea*. *Zat warna empedu* adalah sisa hasil perombakan sel darah merah oleh hati dan disimpan pada kantong empedu. Zat inilah yang akan dioksidasi jadi *urobilinogen* yang berguna memberi warna pada tinja dan urin. *Asam urat* merupakan sisa metabolisme yang mengandung nitrogen dan mempunyai daya racun lebih rendah dibandingkan amonia, karena daya larutnya di dalam air rendah.

7.2. Sistem Ekskresi Pada Invertebrata

Invertebrata pada umumnya memiliki sistem ekskresi yang sederhana, dan sistem ini berbeda antara invertebrata satu dengan invertebrata lainnya. Alat ekskresinya ada yang berupa saluran malphigi, nefridium, dan sel api. Nefridium adalah tipe yang umum dari struktur ekskresi khusus pada invertebrata.

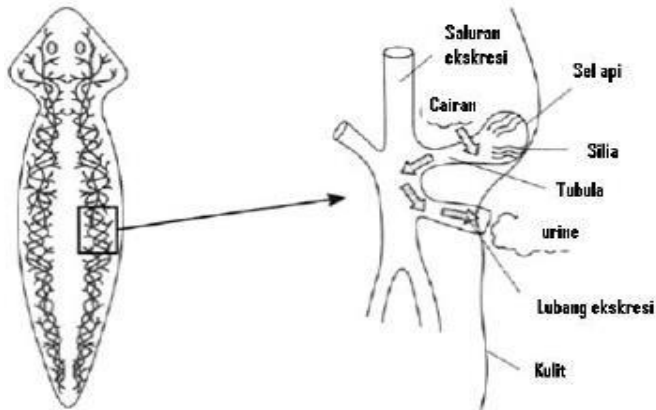
A. Cacing Pipih

Cacing pipih mempunyai organ ekskresi berupa nefridium yang disebut sebagai *protonefridium*. Protonefridium tersusun dari tabung dengan ujung membesar dan terdapat sel api yang dilengkapi dengan silia. Tiap sel api mempunyai beberapa flagela yang gerakannya seperti gerakan api lilin. Air dan beberapa zat sisa ditarik ke dalam sel api. Gerakan flagela juga berfungsi mengatur arus dan menggerakkan air ke sel api di sepanjang saluran ekskresi. Pada tempat tertentu, saluran bercabang menjadi pembuluh ekskresi yang terbuka sebagai lubang di permukaan tubuh (nefridiofora). Sebagian besar sisa **nitrogen** tidak masuk dalam saluran ekskresi. Sisa nitrogen lewat dari sel ke sistem pencernaan dan diekskresikan lewat mulut. Beberapa zat sisa berdifusi secara langsung dari sel ke air.

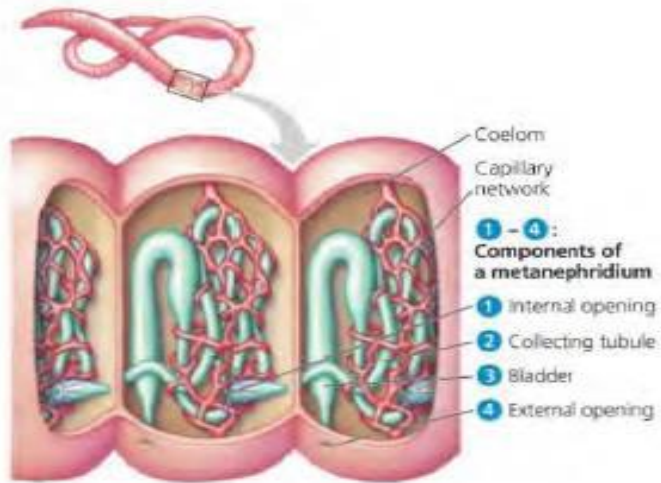
B. Anelida dan Molluska

Anelida dan molluska mempunyai organ nefridium yang disebut ***metanefridium***. Pada cacing tanah, setiap segmen dalam tubuhnya mengandung sepasang metanefridium, kecuali pada tiga segmen pertama dan terakhir. Metanefridium memiliki dua lubang. Lubang yang pertama berupa corong, disebut *nefrostrom* (di bagian anterior) dan terletak pada segmen yang lain. Nefrostrom bersilia dan bermuara di rongga tubuh (pseudoselom). Rongga tubuh ini berfungsi sebagai sistem pencernaan. Corong (nefrostrom) akan berlanjut pada saluran yang berliku-liku pada segmen berikutnya. Bagian akhir dari saluran yang berliku-liku ini akan membesar seperti gelembung. Kemudian gelembung ini akan bermuara ke bagian luar tubuh melalui pori yang merupakan lubang (corong) yang kedua, disebut *nefridiofor*. Cairan tubuh ditarik ke corong nefrostrom masuk ke nefridium oleh gerakan silia dan otot. Saat cairan tubuh mengalir lewat celah panjang nefridium, bahan-bahan yang berguna seperti air, molekul makanan, dan ion akan diambil oleh sel-sel tertentu dari tabung. Bahan-bahan ini lalu menembus sekitar kapiler dan disirkulasikan lagi.

Sampah nitrogen dan sedikit air tersisa di nefridium dan kadang diekskresikan keluar. Metanefridium berlaku seperti penyaring yang menggerakkan sampah dan mengembalikan substansi yang berguna ke sistem sirkulasi. Cairan dalam rongga tubuh cacing tanah mengandung substansi dan zat sisa. Zat sisa ada dua bentuk, yaitu **amonia** dan **urea**. Anelida mendifusikan sisa amonianya langsung di dalam tanah, sedangkan urea diekskresikan lewat sistem ekskresi.



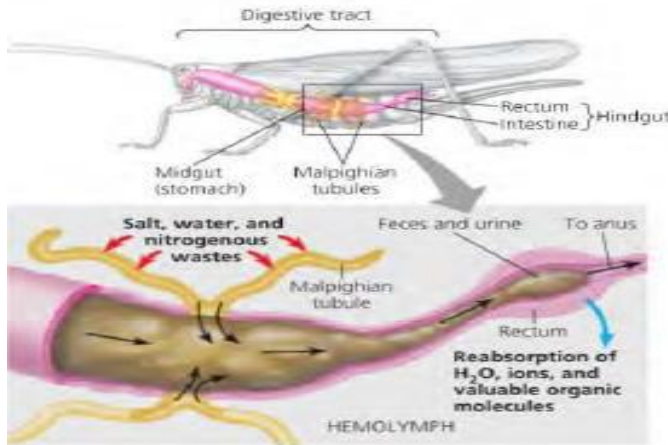
Gambar 7.1. Sistem ekskresi pada Planaria dengan adanya sel api.



Gambar 7.2. Sistem ekskresi pada cacing yang memperlihatkan adanya metanefridium (Champbell dkk, 2008).

C. Serangga

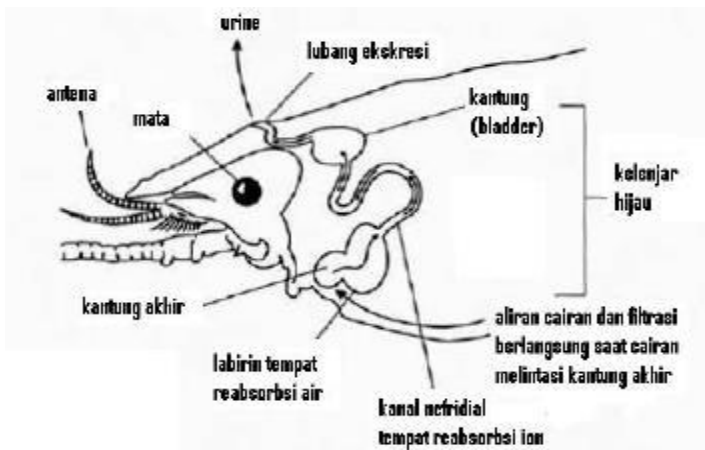
Organ ekskresi pada serangga adalah *pembuluh malpighi*, yaitu alat pengeluaran yang berfungsi seperti ginjal pada vertebrata. *Pembuluh malpighi* berupa kumpulan benang halus yang berwarna putih kekuningan dan pangkalnya melekat pada pangkal dinding usus. Pembuluh malpighi terletak di antara usus tengah dan usus belakang. Di samping pembuluh malpighi, serangga juga memiliki sistem trakea untuk mengeluarkan zat sisa hasil oksidasi (CO_2). Sistem trakea ini berfungsi seperti paru-paru pada vertebrata. Saat cairan bergerak lewat bagian proksimal pembuluh malpighi, bahan yang mengandung nitrogen diendapkan sebagai **asam urat**, sedangkan air dan berbagai garam diserap kembali. Asam urat dan sisa air masuk ke usus halus, dan sisa air akan diserap lagi. Kristal asam urat dapat diekskresikan lewat anus bersama dengan feces. Serangga tidak dapat mengekskresikan amonia dan harus memelihara konsentrasi air di dalam tubuhnya. Amonia yang diproduksinya diubah menjadi asam urat yang merupakan bahan yang kurang toksik. Asam urat berbentuk kristal yang tidak larut.



Gambar 7.3. Sistem ekskresi pada insekta yang memperlihatkan adanya tubula malpighi (Champbell dkk, 2008).

D. Crustacea

Crustacea contohnya kepiting dan lobster memiliki organ ekskresi berupa **kelenjar hijau** atau kelenjar antennal yang terletak di bagian kepala. Kelenjar hijau terdiri atas kantung yang buntu yang disebut kanal nefridial dan berakhir di bagian yang disebut kantung (bladder). Bladder terbuka ke luar tubuh melalui lubang ekskresi yang terletak di pangkal antenna. Bagian ujung kantung dari organ ekskresi tersebut dikelilingi oleh cairan selom yang kemudian di saring di dalam organ ekskresi untuk menghasilkan urine tahap awal yang akan mengalir ke dalam kelenjar. Komposisi urine pada tahap ini sama dengan cairan tubuh (hemolimfa) yang telah difiltrasi, dengan pengecualian bahwa urine primer tersebut tidak mengandung molekul dengan berat molekul yang tinggi seperti protein. Ketika urine primer mengalir di sepanjang kanal nefridial, air dan zat-zat terlarut lainnya direabsorpsi.



Gambar 7.4. Struktur kelenjar hijau pada Crustacea yang menjadi organ ekskresi spesifiknya (Key, 1998: 167).

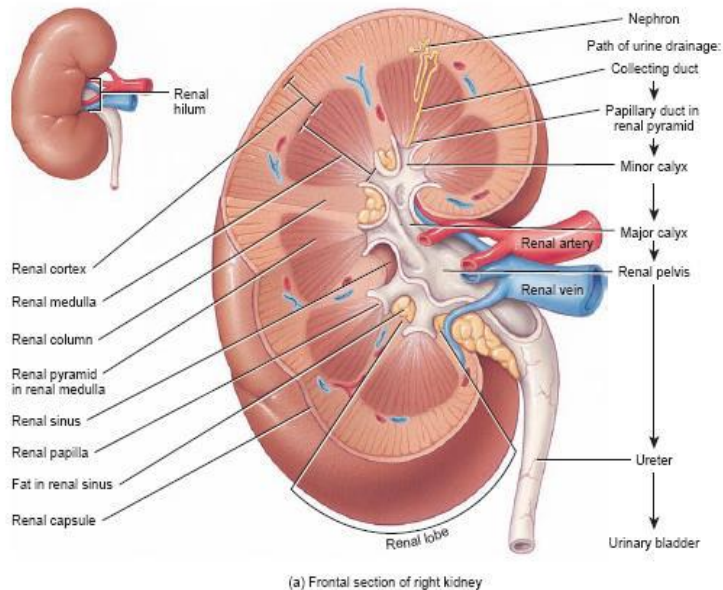
7. 3. Sistem Ekskresi pada Vertebrata

A. Ginjal

Fungsi utama ginjal adalah mengekskresikan zat-zat sisa metabolisme yang mengandung nitrogen seperti **amonia**. Amonia adalah hasil pemecahan protein dan bermacam-macam garam, melalui proses deaminasi atau proses pembusukan mikroba dalam usus. Selain itu, ginjal juga berfungsi mengekskresikan zat yang jumlahnya berlebihan, misalnya vitamin yang larut dalam air, mempertahankan cairan ekstraselular dengan jalan mengeluarkan air bila berlebihan serta mempertahankan keseimbangan asam dan basa. Sekresi dari ginjal berupa urin.

Bentuk ginjal seperti kacang merah, jumlahnya sepasang dan terletak di dorsal kiri dan kanan tulang belakang di daerah pinggang. Berat ginjal diperkirakan 0,5% dari berat badan, dan panjangnya \pm 10 cm. Setiap menit 20-25% darah dipompa oleh jantung yang mengalir menuju ginjal. Ginjal terdiri dari tiga bagian utama yaitu:

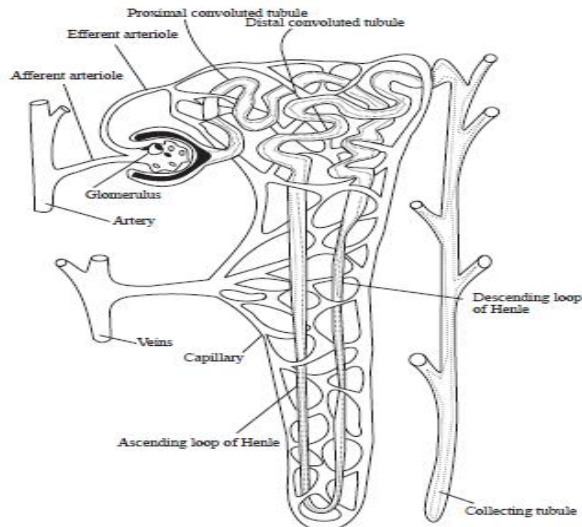
- a. korteks (bagian luar)
- b. medulla (sumsum ginjal)
- c. pelvis renalis (rongga ginjal).



Gambar 7.5. Struktur anatomi ginjal pada mamalia (Champbell dkk, 2008).

Bagian korteks ginjal mengandung banyak sekali nefron (± 100 juta) sehingga permukaan kapiler ginjal menjadi luas, akibatnya perembesan zat buangan menjadi banyak. Setiap nefron terdiri atas badan malphigi dan tubulus (saluran) yang panjang. Pada badan malphigi terdapat *kapsul bowman* yang bentuknya seperti mangkuk atau piala, berupa selaput sel pipih. Kapsul bowman membungkus glomerulus. Glomerulus berbentuk jalinan kapiler arterial. Tubulus pada badan malphigi adalah tubulus proksimal yang bergulung dekat kapsul bowman yang pada dinding sel terdapat banyak sekali mitokondria. Tubulus yang kedua adalah tubulus distal. Pada **rongga ginjal** bermuara pembuluh pengumpul. Rongga ginjal dihubungkan oleh *ureter* (berupa saluran) ke kandung kencing (vesika urinaria) yang berfungsi sebagai tempat penampungan sementara urin sebelum

keluar tubuh. Dari kantung kencing menuju luar tubuh urin melewati saluran yang disebut *uretra*.



Gambar 7.6. Struktur nefron dengan komponen-komponen dasarnya berupa glomerulus, kapsula bowman dan tubulus-tubulus serta pembuluh darah (Rastogi, 2007: 298).

Aapun proses pembentukan urin adalah:

(1). Penyaringan (filtrasi)

Filtrasi terjadi pada kapiler glomerulus pada kapsul Bowman. Pada glomerulus terdapat sel-sel endotelium, kapiler yang berpori (podosit) sehingga mempermudah proses penyaringan. Faktor yang mempermudah proses penyaringan adalah tekanan hidrolik dan permeabilitas yang tinggi pada glomerulus. Selain penyaringan, di glomerulus terjadi pula pengikatan kembali sel-sel darah, keping darah, dan sebagian besar protein plasma. Bahan-bahan kecil terlarut dalam

plasma, seperti glukosa, asam amino, natrium, kalium, klorida, bikarbonat, garam lain, dan urea melewati saringan dan menjadi bagian dari endapan. Hasil penyaringan di glomerulus berupa filtrat glomerulus (urin primer) yang komposisinya serupa dengan darah tetapi tidak mengandung protein. Pada filtrat glomerulus masih dapat ditemukan asam amino, glukosa, natrium, kalium, dan garam-garam lainnya.

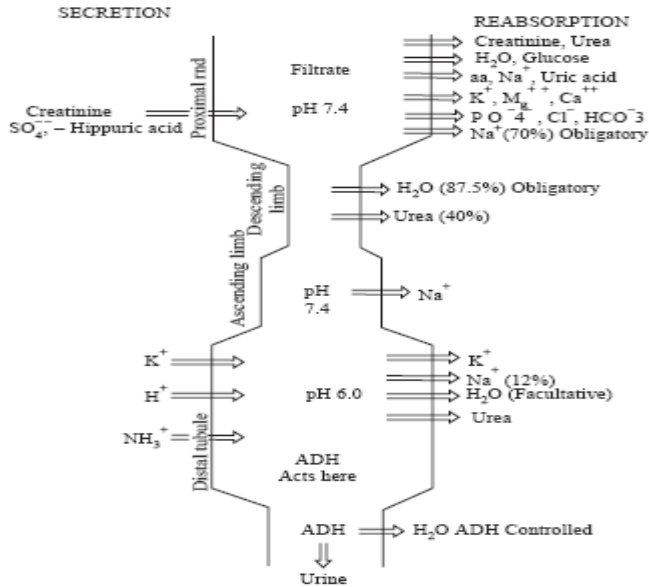
(2). Penyerapan kembali (Reabsorpsi)

Volume urin manusia hanya 1% dari filtrat glomerulus. Oleh karena itu, 99% filtrat glomerulus akan direabsorpsi secara aktif pada tubulus kontortus proksimal dan terjadi penambahan zat-zat sisa serta urea pada tubulus kontortus distal. Substansi yang masih berguna seperti glukosa dan asam amino dikembalikan ke darah. Sisa atau kelebihan garam, dan bahan lain pada filtrat dikeluarkan dalam urin. Tiap hari tabung ginjal mereabsorpsi lebih dari 178 liter air, 1200 g garam, dan 150 g glukosa. Sebagian besar dari zat-zat ini direabsorpsi beberapa kali. Setelah terjadi reabsorpsi maka tubulus akan menghasilkan urin sekunder yang komposisinya sangat berbeda dengan urin primer.

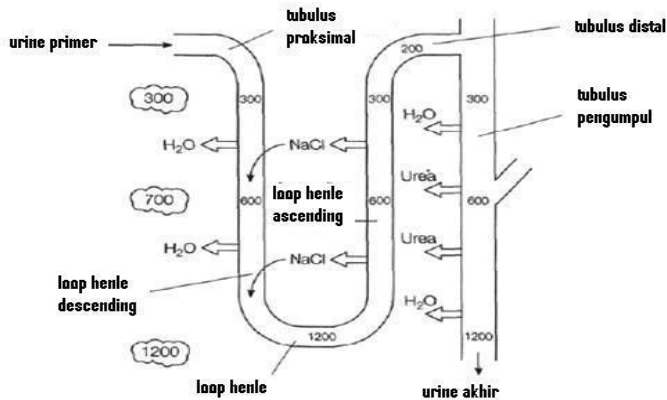
Pada urin sekunder, zat-zat yang masih diperlukan tidak akan ditemukan lagi. Sebaliknya, konsentrasi zat-zat sisa metabolisme yang bersifat racun bertambah, misalnya ureum dari 0,03%, dalam urin primer dapat mencapai 2% dalam urin sekunder. Meresapnya zat pada tubulus ini melalui dua cara. Gula dan asam amino meresap melalui peristiwa difusi, sedangkan air melalui peristiwa osmosis. Reabsorpsi air terjadi pada tubulus proksimal dan tubulus distal.

(3). Augmentasi dan ekskresi

Augmentasi adalah proses penambahan zat sisa dan urea yang mulai terjadi di tubulus kontortus distal. Komposisi urin yang dikeluarkan lewat ureter adalah 96% air, 1,5% garam, 2,5% urea, dan sisa substansi lain, misalnya pigmen empedu yang berfungsi memberi warna dan bau pada urin.



Gambar 7. 6. Skema daerah fungsional ginjal yang memperlihatkan sekresi dan reabsorpsi berbagai substansi.

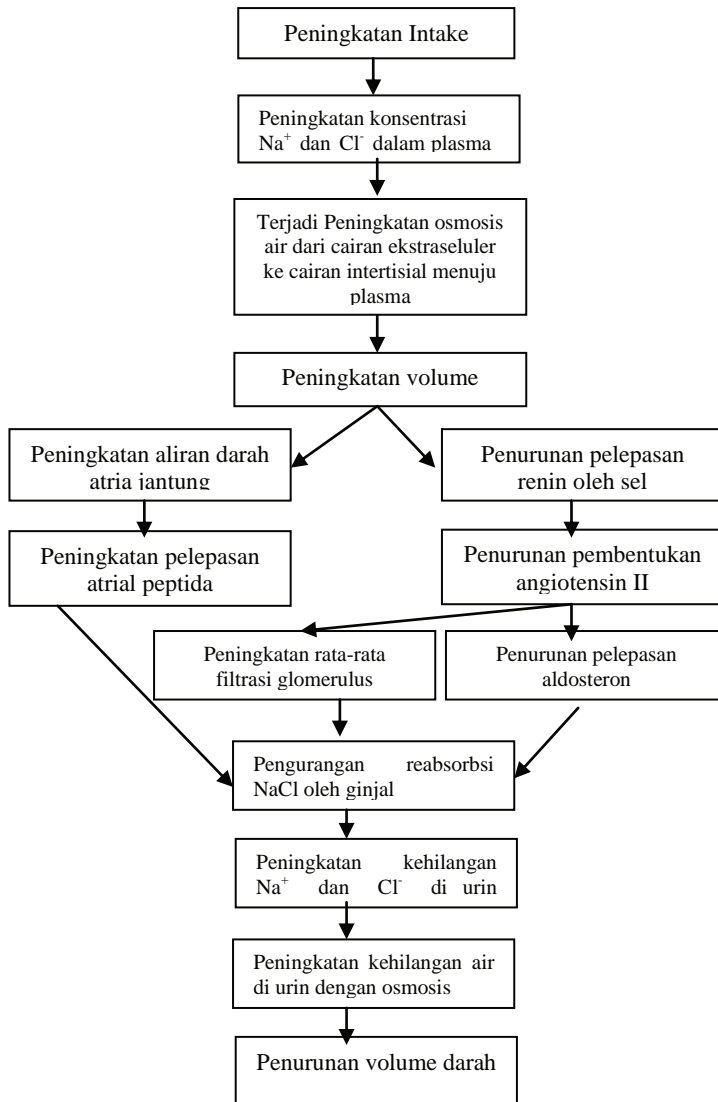


Gambar 7.7. Mekanisme spesifik produksi urine yang meliputi filtrasi, dan reabsorpsi dan augmentasi hingga menghasilkan urine akhir yang dibuang keluar tubuh

Faktor-faktor yang mempengaruhi produksi urin adalah sebagai berikut:

- a. *Hormon anti diuretik (ADH)* yang dihasilkan oleh kelenjar hipofisis posterior akan mempengaruhi penyerapan air pada bagian tubulus distal karena meningkatkan permeabilitas sel terhadap air. Jika hormon ADH rendah maka penyerapan air berkurang sehingga urin menjadi banyak dan encer. Sebaliknya, jika hormon ADH banyak, penyerapan air banyak sehingga urin sedikit dan pekat. Kehilangan kemampuan mensekresi ADH menyebabkan penyakit diabetes insipidus. Penderitanya akan menghasilkan urin yang sangat encer.
- b. *Jumlah air yang diminum*
Akibat banyaknya air yang diminum, akan menurunkan konsentrasi protein yang dapat menyebabkan tekanan koloid protein menurun sehingga tekanan filtrasi kurang efektif. Hasilnya, urin yang diproduksi banyak.
- c. *Saraf*
Rangsangan pada saraf ginjal akan menyebabkan penyempitan duktus aferen sehingga aliran darah ke glomerulus berkurang. Akibatnya, filtrasi kurang efektif karena tekanan darah menurun.
- d. *Banyak sedikitnya hormon insulin*
Apabila hormon insulin kurang (penderita diabetes melitus), gula dalam darah akan dikeluarkan lewat tubulus distal. Kelebihan kadar gula dalam tubulus distal mengganggu proses penyerapan air, sehingga orang akan sering mengeluarkan urin.

Adapun pengaturan hormon di ginjal pada proses reabsorpsi NaCl dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 7.8. Pengaturan kerja hormon pada proses reabsorpsi Na^+ dan Cl^- di ginjal (angiotensin II, aldosteron dan peptida atrial natriuretik)

B. Paru-paru (Pulmo)

Fungsi utama paru-paru adalah sebagai alat pernapasan. Akan tetapi, karena mengekskresikan zat sisa metabolisme maka termasuk dalam sistem ekskresi. Karbon dioksida dan air hasil metabolisme di jaringan diangkut oleh darah lewat vena untuk dibawa ke jantung, dan dari jantung akan dipompakan ke paru-paru untuk berdifusi di alveolus. Selanjutnya, CO₂ dapat berdifusi atau dapat diekskresikan di alveolus paru-paru karena pada alveolus bermuara banyak kapiler yang mempunyai selaput tipis.

C. Hati (Hepar)

Hati disebut juga sebagai alat ekskresi di samping berfungsi sebagai kelenjar dalam sistem pencernaan. Hati menjadi bagian dari sistem ekskresi karena menghasilkan empedu. Hati juga berfungsi merombak hemoglobin menjadi bilirubin dan biliverdin, dan setelah mengalami oksidasi akan berubah jadi urobilin yang memberi warna pada feses menjadi kekuningan. Demikian juga kreatinin hasil pemecahan protein, pembuangannya diatur oleh hati kemudian diangkut oleh darah ke ginjal.

D. Kulit

Kulit berfungsi sebagai organ ekskresi karena terdapat kelenjar keringat (*glandula sudorifera*) yang mengeluarkan 5% sampai 10% dari seluruh sisa metabolisme. Pusat pengatur suhu pada susunan saraf pusat akan mengatur aktifitas kelenjar keringat dalam mengeluarkan keringat. Keringat mengandung air, larutan garam, dan urea. Pengeluaran keringat yang berlebihan bagi pekerja berat menimbulkan hilang garam-garam mineral sehingga dapat menyebabkan kejang otot dan pingsan.

- a. Epidermis (lapisan terluar) dibedakan atas stratum korneum berupa zat tanduk (sel mati) dan selalu mengelupas, stratum lusidum, stratum granulosum yang mengandung pigmen, stratum germinativum ialah lapisan yang selalu membentuk sel-sel kulit ke arah luar.

- b. Dermis. Pada bagian ini terdapat akar rambut, kelenjar minyak, pembuluh darah, serabut saraf, serta otot penegak rambut. Kelenjar keringat akan menyerap air dan garam mineral dari kapiler darah karena letaknya yang berdekatan. Selanjutnya, air dan garam mineral ini akan dikeluarkan di permukaan kulit (pada pori) sebagai keringat. Keringat yang keluar akan menyerap panas tubuh sehingga suhu tubuh akan tetap. Dalam kondisi normal, keringat yang keluar sekitar 50 cc per jam. Jumlah ini akan berkurang atau bertambah jika ada faktor-faktor seperti lingkungan yang tinggi, gangguan dalam penyerapan air pada ginjal (gagal ginjal), kelembapan udara, aktivitas tubuh yang meningkat, gangguan emosional, dan menyempitnya pembuluh darah akibat rangsangan pada saraf simpatik.

DAFTAR PUSTAKA

- Albert, B, D. Bray, A. Jhonson, J. Lewis, M. Raff, K. Ross, and P. Walters. 1998. *Essential Cell Biology*. New York. Garland.
- Champbell, N. A, J. B. Reece, L. G. Mitchell, S. A. Wasserman, P. V. Minorsky and R. B. Jackson. 2008. *Biology. 8Th. Edition*. Pearson Education. Inc. San Fransisco
- Clowden, M.J. 2007. *Physiological Systems in Insects*. Second Edition. Elsevier Inc. USA.
- Carola, R, J.P Harley and C. R. Noback. 1990. *Human Anatomy and Physiology*. McGraw-Hill Publishing Company. New York.
- Griffin, D.R., A. Novick. 1970. *Animal Structure and Function*. Second Edition. Holt,Rinehart and Winston.Inc. New York.
- Gunstream, S. E. 2010. *Anatomy and Physiology with Integrated Study Guide*. Fourth Edition. Michelle Watnich. McGraw-Hill. New York.
- Hadley, M.E. 1996. *Endocrinology*. Fourth Edition. Prentice-hall InternationalInc.London.
- Jurd, D.R. 2004. *Instant Notes of Animal Physiology*. Second Edition. Bios Scientific Publisher. Oxford.
- Jardins, T. D. 2008. *Cardiopulmonary: Anatomy and Physiology.Essentials of Respiratory Care*. Fifth Edition. Nelson Educations Ltd. Canada.
- Kay, I. 1998. *Introduction to Animal Physiology*. Bios Scientific Publisher. Oxford.
- Matthews, G.G. 1998. *Cellular Physiology of Nerve and Muscle*. Fouth Edition. Blackwell Publishing Company. USA.
- Prosser, C. L. 1991. *Comparative Animal Physiology*, 4th Edition.Wiley-Liss, New York.

- Rastogi, S.C. 2007. *Essentials of Animal Physiology*. 4Th edition. New Age International (P) Ltd. New Delhi.
- Sanlon, V. C., T. Sanders. 2007. *Essentials of Anatomy and Physiology Fith Edition*. Davis Company. Philadelpia.
- Schmidt-Nielsen, K. 1997. *Animal Physiology: Adaptation and Environment.5th ed.* Cambridge University Press.
- Wulangi, K.S. 1993. Prinsip-Prinsip Fisiologi Hewan. Departemen Pendidikan dan Kebudayaan. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi. Proyek Pembinaan Tenaga Kependidikan Pendidikan Tinggi.

Buku ini disajikan dalam bentuk buku referensi tentang materi-materi Fisiologi Hewan. Buku ini penting untuk pembinaan pengetahuan dan pembelajaran biologi dan juga berguna bagi calon guru khususnya mahasiswa program studi Pendidikan Biologi/ Biologi yang ingin memahami seluk beluk fisiologi hewan, maupun pengajar biologi. Buku ini berbeda dengan buku Fisiologi Hewan yang beredar karena disampaikan dengan bahasa yang mudah dimengerti, cukup detil dan lengkap.

Secara umum naskah buku ini terdiri atas 7 bab. Bab I mengkaji konsep dasar fisiologi hewan, bab II mengkaji sel, struktur dan fungsinya serta transportasi zat melintasi membran, bab III mengkaji tentang nutrisi dan sistem pencernaan, bab IV mengkaji metabolisme energi, bab V mengkaji sistem sirkulasi, bab VI mengkaji sistem respirasi, dan bab VII mengkaji sistem ekskresi.

ISBN 978-602-329-009-3
(jil.1)



9 786023 290093