

FISIOLOGI HEWAN



- Meyta Wulandari
- Lia Septya
- Wahyu Anggar Wanto
- Febri Nur Ngazizah

FISIOLOGI HEWAN

**Meyta Wulandari
Lia Septya
Wahyu Anggar Wanto
Febri Nur Ngazizah**



GETPRESS INDONESIA

FISIOLOGI HEWAN

Penulis : Meyta Wulandari

Lia Septya

Wahyu Anggar Wanto

Febri Nur Ngazizah

ISBN :

Editor : Dr. Oktavianis, M.Biomed.

Tri Putri Wahyuni, S.Pd.

Penyunting: Yuliatr Novita, M.Hum.

Reviewer: Dr. Yohanes Edy Gunawan, M.Si.

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

Penerbit: GETPRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi:

Jl. Palarik RT 01 RW 06, Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah, Padang, Sumatera Barat

website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Desember 2023

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

KATA PENGANTAR

Buku dengan judul “Fisiologi Hewan” ini merupakan buku ajar yang bertujuan untuk membantu mahasiswa dalam memahami ilmu fisiologi hewan. Buku ini membahas mengenai pengantar fisiologi hewan, sistem pencernaan, sistem respirasi, sistem sirkulasi, sistem imunitas, sistem rangka dan otot, sistem ekskresi dan osmoregulasi, sistem saraf, sistem endokrin, dan sistem reproduksi.

Pada kesempatan ini kami mengucapkan terimakasih kepada Universitas Palangka raya yang telah mendanai penerbitan buku ini serta terimakasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan dalam penyusunan buku ini sehingga buku ini dapat diselesaikan. Kami menyadari bahwa buku ini masih jauh dari kesempurnaan dan kami mengharapkan dapat masukan positif guna menjadikan buku ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Palangka Raya, November 2023

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR GAMBAR.....	vi
BAB 1 PENGANTAR FISILOGI HEWAN.....	1
1.1 Pendahuluan.....	1
1.2 Homeostasis.....	2
1.3 Sistem Umpan Balik (<i>Feedback</i>).....	2
1.4 Forum Diskusi.....	5
1.5 Uji Kompetensi	5
DAFTAR PUSTAKA	6
BAB 2 SISTEM PENCERNAAN.....	7
2.1 Nutrisi.....	9
2.2 Enzim pencernaan	9
2.3 Vitamin dan mineral pada proses katalisis.....	10
2.4 Penggolongan hewan berdasarkan jenis makanannya	11
2.5 Struktur dan fungsi sistem pencernaan pada hewan.....	13
2.6 Organisme simbiosis	15
2.7 Forum Diskusi.....	15
2.8 Uji Kompetensi	15
DAFTAR PUSTAKA	16
BAB 3 SISTEM RESPIRASI	17
3.1 Medium Respirasi.....	19
3.2 Respirasi pada insect	20
3.3 Respirasi pada amfibi	20
3.4 Respirasi Pada Ikan	21
3.5 Forum Diskusi.....	22
3.6 Uji Kompetensi	22
DAFTAR PUSTAKA	23
BAB 4 SISTEM PEREDARAN DARAH	25
4.1 Fungsi dan Komponen Sistem Sirkulasi.....	25
4.2 Sistem Sirkulasi Hewan	26
4.2.1 Sirkulasi Tunggal dan Ganda.....	27
4.2.2 Jantung.....	28
4.2.3 Mekanisme Kerja Jantung.....	31

4.2.4 Cairan Sirkulasi (Komposisi Darah dan Fungsinya).....	33
4.2.5 Pembuluh Darah.....	35
4.2.6 Tekanan Darah dan Regulasinya.....	37
4.2.7 Sistem Limfatik.....	38
4.3 Forum Diskusi.....	40
DAFTAR PUSTAKA.....	41
BAB 5 SISTEM IMUNITAS	43
5.1 Sistem Imunitas.....	43
5.2 Jenis Respon Kekebalan Tubuh Hewan.....	43
5.2.1 Kekebalan Bawaan (Innate Immunity).....	43
5.2.2 Kekebalan yang diperoleh/Adaptif (<i>Acquired/ adaptive Immunity</i>).....	47
5.3 Forum Diskusi.....	50
5.4 Uji Kompetensi	50
DAFTAR PUSTAKA.....	51
BAB 6 SISTEM RANGKA DAN OTOT	53
6.1 Pendahuluan.....	53
6.2 Sistem Rangka pada Manusia.....	53
6.2.1 Fungsi dan Kegunaan Sistem Rangka.....	54
6.2.2 Perkembangan dan Pertumbuhan Tulang.....	55
6.2.3 Struktur Tulang.....	56
6.2.4 Macam- Macam Tulang Berdasarkan Bahan Penyusun Tulang.....	58
6.2.5 Hubungan Antar Tulang (Persedian).....	62
6.3 Sistem Otot pada Manusia	63
6.3.1 Jenis Otot Manusia.....	63
6.3.2 Struktur Anatomi Otot.....	65
6.3.3 Mekanisme Kontraksi Otot	66
6.3.4 Cara Kerja Otot.....	67
6.4 Forum Diskusi.....	68
6.5 Uji Kompetensi	68
DAFTAR PUSTAKA.....	69
BAB 7 SISTEM EKSKRISI DAN OSMOREGULASI.....	71
7.1 Pendahuluan.....	71
7.2 Ekskresi Hewan Darat dan Akuatik	73

7.2.1 Ekskresi Hewan Darat.....	73
7.2.2 Ekskresi Hewan Akuatik.....	73
7.3 Organ Ekskresi Pada Hewan.....	74
7.3.1 Sistem Ekskresi Pada Hewan Invertebrata.....	74
7.3.2 Sistem Ekskresi Pada Hewan Vertebrata.....	77
7.4 Sistem Ekskresi Pada Manusia.....	80
7.4.1 Ginjal	81
7.5 Sistem Osmoregulasi Pada Hewan.....	86
7.5.1 Sistem Osmoregulasi Pada Hewan Invertebrata.....	86
7.5.2 Sistem osmoregulasi pada hewan Vertebrata.....	87
7.6 Forum Diskusi.....	89
7.7 Uji Kompetensi	89
DAFTAR PUSTAKA	90
BAB 8 SISTEM SARAF	91
8.1 Sistem Saraf Avertebrata.....	91
8.2 Sistem Saraf Vertebrata	92
8.3 Unit Penyusun Sistem Saraf Vertebrata	93
8.3.1 Saraf pusat (otak dan sum-sum tulang belakang)	93
8.3.2 Saraf Tepi /Perifer	94
8.4 Unit Fungsional Sistem Saraf.....	95
8.4.1 Sel Saraf (Neuron)	95
8.4.2 Sel glia /Neuroglia	98
8.5 Mekanisme Kerja Neuron.....	99
8.5.1 Fase istirahat.....	99
8.5.2 Fase depolarisasi.....	100
8.5.3 <i>Rising phase</i> /fase transmisi	100
8.5.4 Fase repolarisasi fase ini juga disebut fase refraktori	101
8.5.5 Fase <i>undershoot</i> atau hiperpolarisasi.....	101
8.6 Forum Diskusi.....	102
8.7 Uji Kompetensi	102
DAFTAR PUSTAKA	103
BAB 9 SISTEM ENDOKRIN	105
9.1 Klasifikasi Hormon Berdasarkan Susunan Kimia Hormon	105
9.2 Reseptor Hormon dan Respon Spesifik.....	106
9.2.1 Komunikasi interseluler.....	106

9.2.2 Respon Selular.....	109
9.3 Berbagai Efek Hormon.....	112
9.4 Pemberian Sinyal oleh Regulator Lokal.....	114
9.5 Koordinasi Neuroendokrin dan Pensinyalan Endokrin	115
9.6 Jalur Regulasi Hormon	116
9.6.1 Jalur sederhana.....	116
9.6.2 Regulasi umpan balik hormon.....	118
9.6.3 Insulin dan glukagon	118
9.7 Hipotalamus dan Pituitary sebagai Pusat Regulasi Endokrin	121
9.7.1 Koordinasi Endokrin dan Sistem Saraf pada Vertebrata...	121
9.7.2 Regulasi tiroid: jalur kaskade hormon.....	123
9.7.3 Evolusi fungsi hormon.....	126
9.7.4 Hormon tropik dan nontropik.....	126
9.8 Homeostasis Endokrin	127
9.8.1 Hormon paratiroid dan vitamin D: kontrol kalsium darah.....	127
9.8.2 Hormon adrenal: respon terhadap stres.....	128
9.9 Forum Diskusi.....	133
9.10 Uji Kompetensi.....	133
DAFTAR PUSTAKA.....	134
BAB 10 SISTEM REPRODUKSI	135
10.1 Pendahuluan.....	135
10.1.1 Sistem Reproduksi Invertebrata.....	135
10.1.2 Sistem Reproduksi Vertebrata.....	139
10.2 Forum Diskusi	157
DAFTAR PUSTAKA.....	158
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kontrol Antagonistik	3
Gambar 2.1 Kombinasi proses sensorik dan mekanis untuk memperoleh dan menelan makanan pada hewan	8
Gambar 3.1 Strategi pernapasan pada hewan	18
Gambar 4.1. Oligochaeta dengan sistem peredaran darah tertutup	26
Gambar 4.2 Serangga dan kelompok Crustacea dengan sistem peredaran darah terbuka	27
Gambar 4.3. Sistem sirkulasi tunggal dan ganda pada hewan	28
Gambar 4.4. Lapisan Dinding Jantung	29
Gambar 4.5. Jumlah Ruang Jantung Pada Beberapa Kelompok Hewan	30
Gambar 4.6. Anatomi Jantung	31
Gambar 4.7. Alur Potensial Aksi Pada Jantung	32
Gambar 4.8. Komposisi Darah Vertebrata dan Fungsinya	33
Gambar 4.9. Jenis dan struktur pembuluh darah vertebrata	38
Gambar 4.10 Katup Pada Pembuluh Vena	36
Gambar 4.11. Pembuluh Darah Kapiler	37
Gambar 4.12 . Sistem Limfatik	39
Gambar 5.1. Jenis Leukosit	45
Gambar 5.2. Respon Peradangan	46
Gambar 5.3. Antibodi	47
Gambar 5.4. Sel T helper dan kompleks MHC	50
Gambar 6.1 Pembentukan Tulang Rawan	55
Gambar 6.2 Tulang Pipih	56
Gambar 6.3 Tulang Tidak Beraturan	57
Gambar 6.4 Tulang Sesamoid	57
Gambar 6.5 Struktur Tulang Panjang	58
Gambar 6.6 Struktur Mikroskopik Tulang Kompak	60
Gambar 6.7 Jenis – jenis Sendi Diartrosis	64

Gambar 6.8 Jenis-jenis Otot	65
Gambar 6.9 Struktur Otot	66
Gambar 6.10 Aktin dan Miosin dalam Sel Otot.....	67
Gambar 7.1 Bentuk – Bentuk Ekskresi Nitrogen.....	72
Gambar 7.2 Protonefridia pada Planaria	75
Gambar 7.3 Metanefridia pada Cacing Tanah.....	76
Gambar 7.4 Badan Malphigi Serangga.....	76
Gambar 7.5 Sistem Eksresi Amfibi	78
Gambar 7.6 Sistem Ekskresi Reptil.....	79
Gambar 7.7 Sistem Ekskresi Burung.....	80
Gambar 7.8 Struktur Utama Ginjal.....	82
Gambar 7.9 Nefron pada Ginjal	83
Gambar 7.10 Osmoregulasi pada Ikan Air Laut dan Air Tawar	88
Gambar 8.1. Sistem saraf berbagai hewan avertebrata dan vertebrata	92
Gambar 8.2. Sistem saraf pusat dan sistem saraf tepi	93
Gambar 8.3 Organisasi system saraf vertebrata.....	94
Gambar 8.4. fungsional neuron pada sistem saraf perifer.....	95
Gambar 8.5 Cara Neuron mengirimkan informasi.....	96
Gambar 8.6. Sel saraf	97
Gambar 8.7. Neuron sensori, interneuron dan neuron motorik.....	98
Gambar 8.8. Sel glia	99
Gambar 8.9. Mekanisme kerja neuron.....	102
Gambar 9.1 Struktur dan kelarutan hormon	106
Gambar 9.2 Sinyal endokrin	107
Gambar 9.3 Sinyal parakrin	107
Gambar 9.4 sinyal autokrin.....	107
Gambar 9.5 sinyal sinaptik.....	108
Gambar 9.6 Sinyal neuroendokrin	108
Gambar 9.7 Kalenjar endokrin utama manusia	109
Gambar 9.8 (a) reseptor terletak di membrane plasma, (b) reseptor terletak di nucleus	110
Gambar 9.9 Jalur transduksi sinyal.....	111

Gambar 9. 10 Reseptor hormon steroid secara langsung Mengatur ekspresi gen.....	112
Gambar 9. 11 Satu hormon, berbeda reaksi.....	113
Gambar 9.12 Metaforfosis serangga	116
Gambar 9.13. Jalur endokrin sederhana.....	117
Gambar 9.14. Jalur neuroendokrin sederhana	118
Gambar 9.15. Pengaturan kadar glukosa oleh glukagon dan insulin.....	119
Gambar 9.16. Produksi dan pelepasan hormon hipofisis posterior	122
Gambar 9.17. Produksi dan pelepasan hormon hipofisis anterior	123
Gambar 9.18. Jalur hormon cascade	124
Gambar 9.19. Peran hormon paratiroid (PTH) dalam mengatur kadar kalsium darah mamalia	128
Gambar 9.20. Pengaturan stress pada kalenjar adrenal	130
Gambar 10.1 Sistem Reproduksi Lalat Buah	138
Gambar 10.2 Perbedaan Sistem Reproduksi Seksual dan Aseksual	139
Gambar 10.3 Sistem Genitalia Ikan	141
Gambar 10.4 Sistem Reproduksi Amfibi Jantan	142
Gambar 10.5 Sistem Reproduksi Amfibi Betina	143
Gambar 10.6 Sistem Reproduksi Reptil Jantan.....	144
Gambar 10.7 Sistem Reproduksi Reptil Betina.....	145
Gambar 10.8 Sistem Reproduksi Aves	146
Gambar 10.9 Alat Reproduksi Laki – laki (atas : eksterna).....	149
Gambar 10.10 Struktur Sperma.....	151
Gambar 10.11 Genitalia Interna Wanita.....	154
Gambar 10.12 Genitalia Eksterna Wanita.....	156

BAB 1

PENGANTAR FISILOGI HEWAN

Oleh Meyta Wulandari

1.1 Pendahuluan

Fisiologi hewan adalah studi yang mempelajari bagaimana bentuk atau struktur dan fungsi biologis hewan dalam menopang kehidupan dan membentuk respon terhadap kondisi lingkungan. Proses biologis bekerja pada kehidupan hewan, dari tingkat organisasi molekuler, seluler, jaringan, organ, sistem organ hingga organisme. Fisiologi hewan didukung dengan konsep homeostasis lingkungan intra dan ekstraseluler, sistem saraf, dan endokrin untuk regulasi homeostasis, dan berbagai sistem fisiologis termasuk keseimbangan ion dan osmotik, ekskresi, respirasi, sirkulasi, metabolisme, pencernaan, dan suhu. Sel dapat menjalankan fungsinya dengan baik memerlukan kondisi yang sesuai seperti suhu yang tepat, pH dan konsentrasi beragam komposisi kimia yang tepat. Namun kondisi ini dapat berubah-ubah karena dipengaruhi faktor internal maupun eksternal. Oleh karena itu melalui homeostasis (keadaan tetap) sel mampu mempertahankan kondisi internal dalam keadaan yang konstan. Mekanisme homeostatis menjaga tubuh dalam keseimbangan dinamis dengan terus-menerus menyesuaikan diri dengan perubahan yang dihadapi sistem tubuh (Moyes et al., 2014).

Suatu organisme perlu mengatur suhu tubuh melalui proses termoregulasi, seperti pada organisme yang hidup pada iklim yang dingin, contohnya beruang kutub, memiliki struktur tubuh yang membantu menahan suhu rendah dan menghemat panas dalam tubuhnya. Struktur yang dimaksud adalah bulu dan lemak yang berisfat insulatif untuk mengurangi kehilangan panas. Pada iklim yang panas, organisme memiliki mekanisme berkeringat seperti pada manusia, ataupun terengah-engah seperti pada anjing, yang

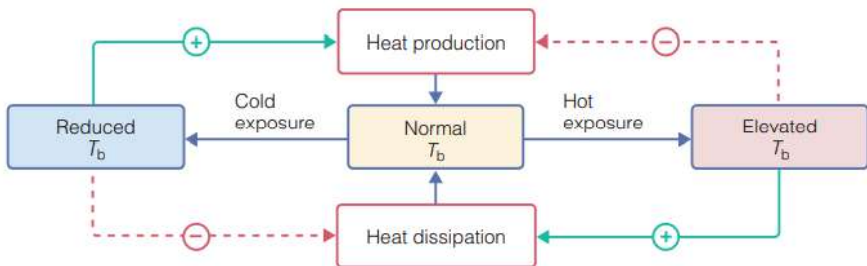
membantu dalam melepaskan panas pada tubuh yang berlebih (Hickman et al. 2017).

1.2 Homeostasis

Kemampuan untuk menjaga lingkungan internal yang konstan merupakan konsep homeostais. Hewan yang tidak mampu mempertahankan kondisi lingkungan internalnya akibat perubahan lingkungan eksternalnya disebut **konformer**. Kelompok hewan konformer adalah kelompok hewan yang jika lingkungan internal tubuhnya berubah mengikuti perubahan lingkungan eksternalnya, terdapat batasan-batasan derajat perubahan temperature yang dapat ditolerir oleh hewan tersebut. Jika melewati batas toleransi akan menyebabkan kematian atau kerusakan yang signifikan. Oleh sebab itu, sebagian besar vertebrata tetap mempertahankan kondisi internalnya meskipun lingkungan eksternalnya berubah. Kelompok hewan yang mampu mempertahankan lingkungan internalnya meskipun lingkungan eksternalnya berubah disebut **regulator**. Pada setiap strategi memiliki kelebihan dan kekurangan. Adanya respon fisiologis membutuhkan energi metabolisme, maka menyesuaikan diri dengan lingkungan lebih menghemat energi daripada terjadi proses regulasi. Namun perubahan lingkungan dapat memberikan efek yang buruk pada fisiologis, sehingga mekanisme regulasi menjadikan lingkungan internal menjadi lebih stabil. Lingkungan internal diregulasi melalui mekanisme-mekanisme kompleks yang tercakup dalam proses homeostasis sehingga kondisi yang ada tetap berbeda dan perbedaan itu relatif konstan (Sherwood et al, 2013).

1.3 Sistem Umpan Balik (*Feedback*)

Organisme menjaga homeostasis dengan (1) menganalisis kondisi eksternal dan (2) jika perlu memulai respon pengganti (3) menjaga area vital terlindungi dari perubahan yang tidak menguntungkan. Hewan lebih sering menjaga kondisi homeostasis dengan menggunakan jalur kontrol refleks. Perubahan dalam lingkungan internal atau eksternal memberikan stimulus. Stimulus tersebut kemudian menimbulkan respon. Umpan balik terbagi atas dua yaitu umpan balik negatif dan positif (Moyes et al., 2014).



Gambar 1.1 Kontrol Antagonistik (Moyes et al., 2014)

Temperatur suhu tubuh dipertahankan relatif konstan oleh loop antagonistik. Jika kondisi dingin menyebabkan penurunan suhu tubuh, hal ini memicu peningkatan produksi panas dan penurunan pembuangan panas. Ketika suhu tubuh meningkat, jalur produksi panas dihambat dan jalur pembuangan panas distimulasi, mengoreksi suhu panas. Hewan mengontrol suhu tubuh dengan mengatur produksi panas dan pembuangan panas (Gambar 1). Hormon memediasi banyak kontrol antagonis. Insulin dan glukagon adalah pengontrol antagonis kadar glukosa (Moyes et al., 2014).

a. Umpan balik negatif menjaga homeostasis

Pada umpan balik negatif, respon mengirimkan sinyal kembali ke stimulus untuk mengurangi intensitas stimulus. Misalnya pada saat makan, makanan yang masuk ke lambung akan mempengaruhi volume lambung dan memicu umpan balik negatif, memberikan sinyal pada otak untuk mengurangi nafsu makan (Ahima & Antwi, 2008).

b. Umpan balik positif menyebabkan respons yang eksplosif

Beberapa sistem fisiologis dikendalikan oleh umpan balik positif. Tidak seperti umpan balik negatif, yang meminimalkan perubahan dalam variabel yang diatur, umpan balik positif memaksimalkan perubahan dalam variabel yang diatur. Jalur yang melibatkan umpan balik positif mulai perlahan tetapi intensitasnya meningkat dengan cepat. Pada umpan balik positif juga harus ada sinyal yang memungkinkan hewan menghentikan proses pada waktu yang tepat, sehingga tindakan tidak lepas kendali. Sistem umpan balik positif hanya

memiliki peran sangat kecil dalam menjaga homeostasis. Salah satu contohnya adalah proses laktasi. Mekanisme umpan balik positif dalam mengontrol fungsi-fungsi fisiologis normal hewan akan dapat berubah menjadi suatu kefatalan. 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 (Sherwood et al, 2013).

c. Fenotipe, genotipe, dan lingkungan

Sifat fisiologis hewan adalah aspek **fenotip** hewan, sifat-sifat fisiologis, seperti karakteristik hewan lainnya, sebagian besar ditentukan oleh gen genom-**genotipe**, tetapi juga dipengaruhi oleh cara gen diatur, terutama sebagai respons terhadap kondisi eksternal. Genotipe individu memiliki kapasitas untuk menghasilkan variasi yang cukup besar dalam sifat seluler. Meskipun gen yang sama ditemukan di setiap sel, mereka diatur dalam kombinasi untuk memungkinkan hewan mengembangkan jaringan yang berbeda. Misalnya, ketika telur katak yang telah dibuahi berkembang menjadi kecebong, proses perkembangan diaktifkan untuk menghasilkan insang dan ekor. Ketika kecebong mengalami metamorfosis, proses lain dipicu yang menghasilkan pembentukan paru-paru dan kaki, dan kematian sel-sel di insang dan ekor. Selain mengatur program perkembangan normal, genotipe mengontrol cara hewan dapat mengubah fenotipe mereka sebagai respons terhadap kondisi fisiologis dan lingkungan. Perbedaan genotipe di antara hewan sangat penting untuk variasi fenotipik yang menjadi dasar seleksi alam (Yang, W et al., 2013).

Satu genotipe dapat menghasilkan banyak fenotipe, tergantung pada kondisi lingkungan yang dialami hewan tersebut. Kemampuan satu genotipe untuk menghasilkan lebih dari satu fenotipe, bergantung pada kondisi lingkungannya disebut **plastisitas fenotipik**. Istilah plastisitas fenotipik mencakup berbagai perubahan fenotipe, beberapa reversibel dan beberapa ireversibel. Plastisitas perkembangan, atau polifenisme, adalah bentuk plastisitas fenotipik di mana perkembangan dalam kondisi berbeda menghasilkan fenotipe

alternatif pada organisme dewasa yang tidak dapat dibalikkan oleh perubahan lingkungan selanjutnya (Fusco & Minelli, 2010).

Aklimasi dan aklimatisasi ketika mengacu pada proses yang menyebabkan perubahan reversibel pada fenotipe suatu organisme sebagai respons terhadap perubahan lingkungan. Aklimasi mengacu pada proses perubahan sebagai respons terhadap variabel lingkungan yang terkendali (biasanya di laboratorium), sedangkan aklimatisasi merujuk pada proses perubahan sebagai respons terhadap variasi lingkungan alami (Moyes et al., 2014).

1.4 Forum Diskusi

Diskusikan Bersama kelompokmu! (case study)

1. Apa yang terjadi jika suhu tubuh terus meningkat?
2. Bagaimana mekanisme homeostasis untuk mempertahankan suhu tubuh dalam kisaran normal?

1.5 Uji Kompetensi

1. Bandingkan dan kontras umpan balik negatif dengan umpan balik positif!
2. Apa saja cara fenotip seseorang dapat berubah?

DAFTAR PUSTAKA

- Ahima, R. S., & Antwi, D. A. (2008). Brain regulation of appetite and satiety. *Endocrinology and metabolism clinics of North America*, 37(4), 811–823.
<https://doi.org/10.1016/j.ecl.2008.08.005>
- Fusco, G., & Minelli, A. 2010. Phenotypic plasticity in development and evolution: facts and concepts. Introduction. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 365(1540), 547–556.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0267>
- Hickman, C.P., Kats, L.B., Keen, S.L., Ober, W.C., Ober, C.W. 2017. *Laboratory studies in Integrated Principles of Zoology*. McGraw-Hill Education, New York, U.S.A.
- Moyes, Christopher D and Patricia M Schulte. 2014. *Principle of Animal Physiology*. Second Edition. Pearson Education Limited. England
- Sherwood, L., Klandorf, H. and Yancey, P.H. 2013. *Animal physiology: From genes to organisms*. Pacific Grove, CA, USA: Brooks/Cole.
- Yang, W., Kang, X., Yang, Q. Yang, Lin, Yao., and Fang, Meiyang. 2013. Review on the development of genotyping methods for assessing farm animal diversity. *J Animal Sci Biotechnol* 4, 2. <https://doi.org/10.1186/2049-1891-4-2>

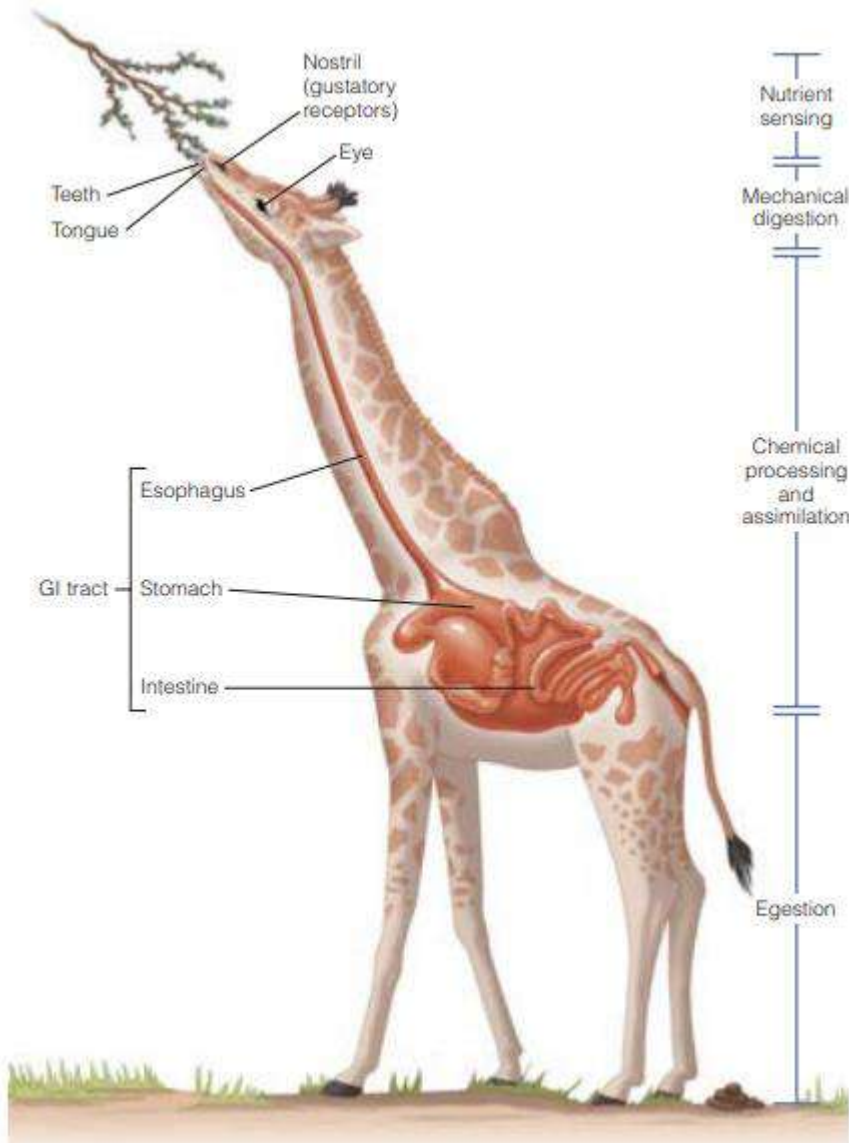
BAB 2

SISTEM PENCERNAAN

Oleh Meyta Wulandari

Sistem pencernaan berkontribusi pada homeostasis dengan mentransfer nutrisi, air, dan elektrolit dari lingkungan eksternal ke lingkungan internal. Karena sel-sel hidup bergantung pada aliran nutrisi yang berkelanjutan untuk mempertahankan kebutuhan metabolisme mereka, kebanyakan hewan menghabiskan banyak waktu dan energi untuk memperoleh dan mencerna makanan (Sherwood et al, 2013).

Fisiologi pencernaan berkaitan dengan semua jaringan yang berkontribusi pada pemecahan fisik dan kimia makanan (Gambar 2.1): sistem sensorik yang digunakan untuk menemukan makanan, struktur fisik yang secara mekanis menghancurkan makanan, dan proses kimia yang memecah makanan menjadi bentuk yang dapat diangkut dan dimetabolisme menjadi molekul lain (Moyes et al., 2014).



Gambar 2.1 Kombinasi proses sensorik dan mekanis untuk memperoleh dan menelan makanan pada hewan (Moyes *et al.*, 2014)

Asimilasi adalah proses sekuensial perolehan dan penyerapan nutrisi yang dimulai ketika organ neurosensorik, seperti antena serangga atau sensor listrik ikan pisau, mendeteksi adanya

makanan. Makanan yang berada di lingkungan harus diperoleh dengan menggunakan organ khusus, seperti cakar pada hewan karnivora atau proboscis pada nyamuk. Setelah diperoleh, makanan biasanya dihancurkan secara mekanis dengan bantuan struktur khusus lainnya, seperti gigi pada mamalia atau lidah pada siput. Kemudian menggunakan proses kimiawi untuk mengubah makanan besar menjadi makromolekul dan molekul kecil (Moyes *et al.*, 2014).

2.1 Nutrisi

Ingesti merupakan proses masuknya makanan dan air ke dalam tubuh. Banyak hewan air memperoleh ion esensial dengan cara melalui permukaan epitel eksternal, seperti insang dan kulit, sebagian besar hewan menyerap nutrisi melalui epitel saluran pencernaan.

Nutrisi esensial yang diperoleh dalam makanan, meliputi karbohidrat, lemak protein, sebagian besar vitamin dan mineral. Nutrisi nonesensial adalah bahan kimia yang dapat dihasilkan hewan dari molekul lain. Karbohidrat, lemak, dan protein merupakan bahan bakar yang dipecah menjadi unit yang dapat diserap (khususnya gula sederhana, asam lemak, dan asam amino), yang digunakan individu hewan untuk menghasilkan ATP melalui proses metabolisme. ATP yang dihasilkan digunakan untuk melakukan aktivitas yang bergantung pada energi tertentu, seperti transpor aktif, kontraksi, sintesis, dan sekresi (Moyes *et al.*, 2014).

2.2 Enzim pencernaan

Pencernaan memerlukan enzim tertentu. Enzim pencernaan memungkinkan hewan mengubah makromolekul kompleks yang masuk melalui makanan menjadi bentuk yang dapat diserap dan diproses menjadi bentuk yang dapat digunakan. Enzim yang digunakan dalam proses pencernaan, meliputi:

- a. Lipase melepaskan asam lemak dari trigliserida (trigliserida lipase) dan fosfolipid (fosfolipase)
- b. Protease (tripsin, kimotripsin) memecah protein menjadi polipeptida yang lebih pendek. Peptidase adalah protease yang membelah asam amino berturut-turut dari ujung polipeptida
- c. Enzim untuk mencerna karbohidrat. Amilase seperti dekstrinase dan glukamilase memecah polisakarida. Disakaridase seperti maltase, sukrase, dan laktasememecah disakarida spesifik
- d. Nuklease memecah DNA menjadi nukleotida, yang kemudian dipecah menjadi nukleotida dan basa nitrogen untuk penyerapan.

Tidak setiap makromolekul yang tertelan mengalami proses pencernaan. Sebagian hewan tidak dapat menghasilkan enzim yang dibutuhkan untuk mengasimilasi makromolekul makanan. Dalam beberapa kasus, kadar enzim dapat bervariasi di antara individu (Sherwood et al, 2013).

2.3 Vitamin dan mineral pada proses katalisis

2.3.1 Vitamin

Vitamin merupakan kelompok kimia yang dikategorikan berdasarkan kelarutannya. Vitamin yang larut dalam lemak adalah A, D, E dan K; vitamin yang larut dalam air adalah kelompok vitamin B dan C. Kelarutan mempengaruhi mode penyerapan dan potensi toksisitas. Apabila seekor hewan mengkonsumsi vitamin yang larut dalam air dengan jumlah yang berlebihan, hanya memberikan efek buruk yang kecil karena setiap kelebihan dapat dengan mudah dikeluarkan melalui urin. Namun, vitamin yang larut dalam lemak dapat menimbulkan masalah karena disimpan dalam jaringan adiposa atau depot lipid dan dapat dilepaskan dalam bentuk racun ketika lemak dimobilisasi. Beberapa hewan mendapatkan vitamin terpilih dari bakteri simbiotik yang hidup di saluran pencernaan.

Kelinci memakan kotorannya sendiri sebagai cara untuk mendapatkan kembali vitamin yang hilang dalam bahan yang tidak dapat dicerna atau disebut koprofagia. Koprofagia meningkatkan

risiko parasit dan penyakit, namun memberikan keuntungan nutrisi bagi beberapa hewan, termasuk kesempatan kedua untuk mengekstraksi nutrisi dari vegetasi yang mereka makan. Nutrien mineral merupakan kumpulan unsur logam yang ikut serta dalam struktur protein, termasuk struktur protein enzimatis. Hewan akuatik mendapatkan banyak nutrisi penting langsung dari air, mengangkutnya melintasi insang atau kulit. Namun, sebagian besar mineral diserap dari makanan (Ebino et al, 1993).

2.3.2 Mineral

Sebagian besar mineral diserap dari makanan, kalsium memasuki sel usus melalui saluran Ca^{2+} dan diekspor ke dalam darah oleh Ca^{2+} ATPase. Seluruh proses transportasi dipercepat dengan adanya protein calbindin. Penyerapan Ca^{2+} dikendalikan oleh vitamin D, yang mengatur sintesis calbindin. Cu, Zn, dan mineral lainnya juga diangkut ke dalam sel usus oleh spesifik carrier. Setelah diserap, mineral dipompa keluar dari sel intestinal ke dalam sirkulasi. Jaringan target mengimpor mineral dari darah sesuai kebutuhan untuk proses biosintetiknya sendiri (Areco, V et al, 2020).

2.4 Penggolongan hewan berdasarkan jenis makanannya

- a. Filter atau pengumpan suspensi, yang berkisar dari spons hingga paus balin, menjebak bahan organik yang tersuspensi dalam air (yang mungkin termasuk partikel mati, bakteri, ganggang, protozoa, dan hewan kecil).
- b. Detritivora, atau pengumpan endapan, seperti cacing tanah, banyak teripang dan tungau, memakan yang mati dan hidup bahan dalam sedimen
- c. Makanan cair, seperti nyamuk dan kelelawar vampir, yang menghisap atau menjilat cairan hewan yang lebih besar tanpa menelan seluruh hewan. Beberapa

pengumpulan cairan disebut parasit jika mereka tetap melekat pada atau di dalam hewan inang untuk waktu yang lama. Contoh kuncinya adalah cacing pita, yang tidak memiliki saluran pencernaan dan hidup di dalam usus inang, di mana ia menyerap molekul organik kecil melalui dinding tubuhnya.

- d. Herbivora pemakan tumbuhan, hewan yang termasuk kedalam golongan herbivora banyak hidup di tempat tempat seperti padang rumput, hutan dan juga persawahan. Selain itu, hewan herbivora juga hidup dengan cara berkelompok dengan sesama jenisnya, sebagian juga berkeluarga seperti gajah dengan anak anaknya.
- e. Karnivora pemakan daging, hewan yang masuk kedalam golongan karnivor karena memangsa hewan lain, hewan ini juga disebut sebagai predator. Predator mendapatkan mangsanya dengan memburu mangsanya itu. Karnivora memiliki taring dan cakar. Kedua hal ini sangat berguna untuk karnivora. Taring berfungsi untuk merobek daging dari mangsa mereka. sedangkan fungsi cakar mencengkeram mangsa karnivora ketika berburu. Contoh karnivora yang singa. harimau. buaya. dan hewan liar lainnya.
- f. Omnivora pemakan segala (daging dan tumbuhan). Pada umumnya hewan omnivor biasanya mendominasi ekosistem terkecuali jika ekosistem sedang terganggu (Moyes *et al.*, 2014).

2.5 Struktur dan fungsi sistem pencernaan pada hewan

2.5.1 Mulut

Pada sistem pencernaan vertebrata di dalam rongga mulut, struktur pembantu yaitu gigi yang berfungsi dalam menghancurkan makanan dan enzim dari kelenjar saliva serta saliva. Saliva adalah mucin yang berada dalam bentuk cair berfungsi sebagai pelubrikasi. Pada mamalia, saliva berperan dalam melonggarkan partikel-partikel agar mempermudah menelan makanan (Matsuo, K et al., 2020).

2.5.2 Saluran Cerna Arthropoda

Pada arthropoda, saluran pencernaannya dilapisi oleh kitin dengan fungsi yang sama dengan mukus yaitu sebagai protektor. Pada invertebrata seperti platyhelminthes, coelenterata, dan spons tidak ditemukan kelenjar ludah. 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 (Moyes *et al.*, 2014).

2.5.3 Ingluvies pada aves

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). Ventrikulus atau lambung, merupakan tempat pencernaan, namun terdapat juga modifikasi yang disebut empedal atau gizzard (Zainuddin et al. 2014).

2.5.4 Empedal (Gizzard)

Empedal merupakan organ yang berupa kantung ber dinding otot kuat dan terlibat dalam proses pencernaan secara fisik dari bahan makanan yang ditelan. Empedal ini terdapat pada invertebrata maupun vertebrata. 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. 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 (Moyes *et al.*, 2014).

2.5.5 Lambung Ruminansia

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 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. Pada kelinci dan rodentia pemakan tumbuhan, terdapat proses yang hampir mirip dengan ruminansia tetapi terjadi di caecum (Moyes *et al.*, 2014).

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. Nutrisi bagi kelinci tergantung kepada proses refeksi tersebut (Moyes *et al.*, 2014).

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. 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. (Moyes *et al.*, 2014)

2.6 Organisme simbiosis

Enterosimbion merupakan hubungan organisme yang hidup di dalam lumen saluran pencernaan, simbion ini hidup di luar jaringan hewan. Sedangkan endosimbion merupakan interaksi organisme yang tumbuh di dalam hewan, biasanya tertanam di antara sel inang dalam jaringan. Jamur adalah enterosimbion penting dalam banyak jenis serangga pemakan tumbuhan. Semut pemotong daun memberi makan fragmen daun ke jamur eksosimbiosis, yang dibudidayakan oleh koloni semut (Hickman et al. 2017).

2.7 Forum Diskusi

Diskusikan bagaimana proses pencernaan mempengaruhi sistem lain pada hewan yang memakan makanan besar mengalami banyak perubahan yang memengaruhi sistem fisiologisnya yang lain.

2.8 Uji Kompetensi

- a. Jelaskan enzim yang berperan dalam sistem digesti!
- b. Sebutkan alasan mengapa kelinci memakan kotoran pertamanya.

DAFTAR PUSTAKA

- Areco, V. A., Kohan, R., Talamoni, G., Tolosa de Talamoni, N. G., & Peralta López, M. E. 2020. Intestinal Ca^{2+} absorption revisited: A molecular and clinical approach. *World journal of gastroenterology*, 26(24), 3344–3364. <https://doi.org/10.3748/wjg.v26.i24.3344>
- Ebino, K. Y., Shutoh, Y., & Takahashi, K. W. 1993. Coprophagy in rabbits: autoingestion of hard feces. *Jikken dobutsu. Experimental animals*, 42(4), 611–613. https://doi.org/10.1538/expanim1978.42.4_611
- Hickman, C.P., Kats, L.B., Keen, S.L., Ober, W.C., Ober, C.W. 2017. *Laboratory studies in Integrated Principles of Zoology*. McGraw-Hill Education, New York, U.S.A.
- Matsuo, K., & Fujishima, I. 2020. Textural Changes by Mastication and Proper Food Texture for Patients with Oropharyngeal Dysphagia. *Nutrients*, 12(6), 1613. <https://doi.org/10.3390/nu12061613>
- Moyes, Christopher D and Patricia M Schulte. 2014. *Principle of Animal Physiology*. Second Edition. Pearson Education Limited. England
- Sherwood, L., Klandorf, H. and Yancey, P.H. 2013. *Animal physiology: From genes to organisms*. Pacific Grove, CA, USA: Brooks/Cole.
- Zainuddin, Z, Masyitha, D, Fitriani & Panjaitan, N. 2014, Struktur Histologi Proventrikulus Ayam Kampung (*Gallus Domesticus*), Bebek (*Anser Anser Domesticus*) Dan Merpati (*Columba Domesticus*), *Jurnal Ilmiah Peternakan*, vol. 2, no. 1, pp. 5–10, viewed 22 October 2023, <<https://media.neliti.com/media/publications/96916-ID-none.pdf>>.

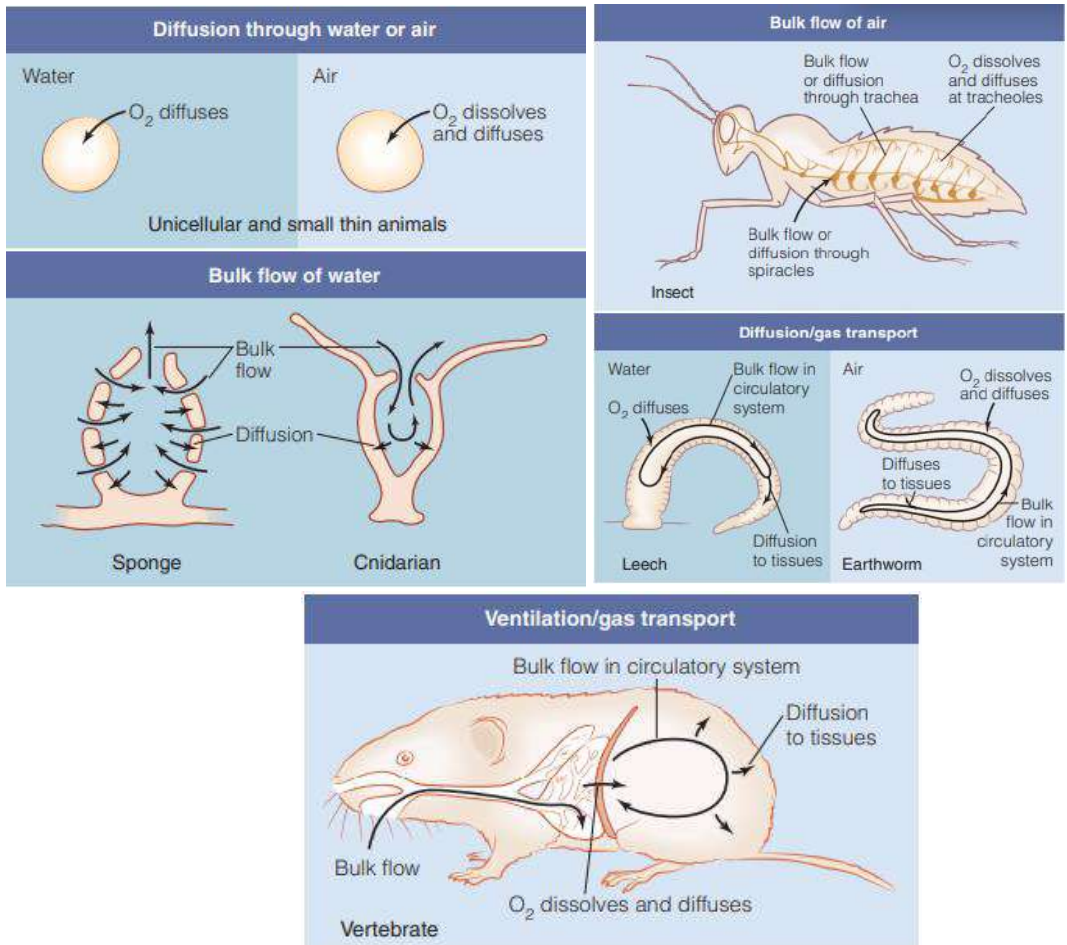
BAB 3

SISTEM RESPIRASI

Oleh Meyta Wulandari

Seluruh rangkaian peristiwa yang menghasilkan pertukaran oksigen dan karbon dioksida antara lingkungan luar hewan dan mitokondria di dalam selnya merupakan pengertian dari sistem respirasi. Sebagian besar hewan bergantung pada respirasi mitokondria untuk memasok ATP yang mereka butuhkan untuk melakukan fungsi seluler normal. Selama proses respirasi, mitokondria mengoksidasi karbohidrat, asam amino, atau asam lemak untuk menghasilkan ATP, mengkonsumsi oksigen dan menghasilkan karbon dioksida dalam prosesnya (Moyes *et al.*, 2014).

Istilah respirasi internal atau seluler mengacu pada proses metabolisme intraseluler yang dilakukan di dalam mitokondria, yang menggunakan O_2 dan menghasilkan CO_2 selama pembentukan energi, adenine trifosfat (ATP), dari molekul nutrisi. Karbondioksida yang dihasilkan oleh sel-sel secara metabolis aktif dan membentuk asam yang harus dibuang oleh tubuh. Energi merupakan kebutuhan yang sangat penting untuk mempertahankan semua aktivitas seluler yang mendukung kehidupan. Metabolisme aerobik bagi sebagian besar hewan sangat diperlukan untuk bertahan hidup dalam waktu yang lama (Moyes *et al.*, 2014).



Gambar 3.1 Strategi pernapasan pada hewan (Moyes et al., 2014)

Organisme uniseluler dan organisme multisel kecil yang hidup di lingkungan perairan dapat memanfaatkan gradien difusi ini untuk mendorong pertukaran gas dengan lingkungan (Gambar 3.1). Molekul oksigen bergerak menuruni gradien ini ke dalam mitokondria (dan karbon dioksida bergerak ke arah yang berlawanan). Hewan yang memperoleh oksigen dari udara memerlukan langkah tambahan: oksigen dalam bentuk gas harus terlebih dahulu larut sebelum dapat melintasi membran sel. Beberapa hewan, seperti spons dan cnidaria, memindahkan media

luar (air laut) dengan tekanan aliran melalui rongga tubuh bagian dalam (Gambar 3.1). Oksigen berdifusi dari air laut ke dalam sel organisme, dan karbon dioksida berdifusi keluar dari sel ke dalam air laut. Air laut yang bersirkulasi melalui rongga tubuh dengan aliran curah membawa karbon dioksida keluar ke lingkungan (Moyes et al., 2014).

Sebagian besar hewan memiliki sistem peredaran darah yang mengangkut oksigen melalui aliran massal ke seluruh tubuh. Pada beberapa hewan, seperti lintah dan cacing tanah, oksigen hanya berdifusi melintasi kulit dan kemudian dibawa oleh tekanan aliran melalui sistem peredaran darah, tetapi banyak organisme memiliki organ pernapasan khusus dengan area permukaan yang luas, baik insang atau paru-paru, untuk pertukaran gas. Hewan dengan insang atau paru-paru internal sering memindahkan media eksternal dengan perpindahan gas atau cairan melintasi permukaan pernapasan, suatu proses yang disebut ventilasi (Moyes et al., 2014).

3.1 Medium Respirasi

Air merupakan media yang lebih sulit daripada udara sebagai tempat melakukan pertukaran gas. Perbandingan antara udara dan air mengungkapkan hal berikut ini:

- a. Viskositas: Air memiliki viskositas yang lebih tinggi dibandingkan dengan udara (sekitar 850 kali lipat) yang memerlukan energi yang lebih besar untuk mempertahankan aliran di atas permukaan alat respirasi.
- b. Kelarutan: CO_2 dan produknya, bikarbonat, menjadi polar, berada dalam konsentrasi yang jauh lebih tinggi daripada di udara. Konsentrasi O_2 di dalam air jauh lebih kecil daripada fase gas: 1 L air pada suhu 15°C mengandung 7 ml O_2 , sedangkan 1 L udara mengandung 209ml O_2 . Oleh karena itu, sekitar 30 kali lebih banyak air dibandingkan udara harus dipindahkan untuk mencapai transportasi ventilasi O_2 yang sama.

- c. Salinitas: Kelarutan O_2 dan CO_2 menurun dengan meningkatnya salinitas; tidak ada efek yang sebanding terjadi di udara.
- d. Temperatur: Tingkat difusi untuk gas meningkat dengan suhu di udara dan air, namun kelarutan O_2 dan CO_2 menurun dengan meningkatnya suhu disekitar.
- e. Variasi Habitat: Daerah dengan O_2 rendah secara permanen (sedimen lumpur), teluk, rawa dan zona intertidal dapat mengalami perubahan tekanan oksigen yang besar, yang naik pada siang hari sebagai hasil fotosintesis dan menurun pada malam hari sebagai akibat dari kebutuhan O_2 .
- f. Komposisi: Air mengandung banyak komponen penunjang kehidupan selain gas. Ini termasuk dalam ion terlarut dan bahan organik (Maina, 2014).

3.2 Respirasi pada insect

Serangga menggunakan sistem yang mirip, terdiri dari serangkaian tabung berongga yang disebut trakea menembus ke seluruh bagian tubuh (Gambar 3.1). Udara bergerak melalui trakea baik dengan difusi atau aliran tekanan, dan di jaringan oksigen dari udara larut dalam cairan ekstraseluler dan berdifusi ke mitokondria, sedangkan karbon dioksida berdifusi keluar dari sel-sel dan masuk ke trakea di mana ia bergerak keluar ke lingkungan eksternal baik melalui difusi atau aliran tekanan (tergantung spesiesnya) (Moyes *et al.*, 2014).

3.3 Respirasi pada amfibi

Respirasi integumen penting pada hampir semua amfibi dan reptil air. Pada katak sistem pernapasannya berubah-ubah seiring dengan tahapan metamorfosisnya. Saat katak masih dalam bentuk berudu, alat pernapasannya adalah insang luar. Saat berudu berubah menjadi katak muda, insang luar tersebut perlahan tertutup dan menjadi insang dalam. Saat katak muda berubah jadi katak dewasa,

alat penapasan katak pun ikut berubah dari insang menjadi paru-paru, lapisan kulit dan lapisan rongga mulut. Pernapasan melalui kulit dilakukan katak utamanya saat berada di perairan. Difusi oksigen dimudahkan oleh keberadaan membrane yang tipis pada kulit katak. Pada bagian ini, difusi oksigen melalui kutaneus masuk ke tubuh katak tepatnya pada sistem sirkulasi (Moyes *et al.*, 2014).

Strategi pernapasan yang digunakan pada hewan untuk mendapatkan oksigen dari lingkungannya dan membuang karbondioksida dapat melalui proses difusi dan perpindahan gas atau cairan dari tekanan tinggi ke tekanan rendah (*bulk flow*).

Strategi respirasi kulit memiliki beberapa keterbatasan.

- a. Kulit yang sangat tipis yang diperlukan untuk meminimalkan jarak difusi dan memaksimalkan laju difusi membuat hewan rentan terhadap pemangsaan atau kerusakan fisik.
- b. Karena penghalang tipis ini harus tetap lembab sehingga oksigen terlarut dapat berdifusi ke dalam sel, hewan yang menggunakan respirasi kulit umumnya terbatas pada habitat akuatik atau terestrial yang sangat lembab.
- c. sebagai akibat dari dua kendala pertama ini, luas permukaan kulit biasanya cukup terbatas (Moyes *et al.*, 2014).

3.4 Respirasi Pada Ikan

Pada ikan bertulang sejati (Osteichthyes) insangnya dilengkapi dengan tutup insang (operculum), sedangkan pada ikan bertulang rawan (Chondrichthyes) insangnya tidak mempunyai tutup insang. Insang terbentuk seperti sisir yang bertumpuk. Setiap sisir tersusun dari lembaran yang banyak mengandung pembuluh kapiler darah. Oleh sebab itu, insang tampak berwarna merah. Ikan yang hidup di lumpur atau di rawa memiliki lipatan – lipatan yang tidak teratur pada rongga insang. Lipatan – lipatan ini disebut labirin. Labirin berfungsi menyimpan udara cadangan untuk bernafas. Contoh ikan yang mempunyai labirin adalah ikan gabus, gurami, dan betok (Evans, Piermarini & Choe 2005).

3.5 Forum Diskusi

1. Jelaskan batasan respirasi kulit

3.6 Uji Kompetensi

1. Jenis struktur apa yang dapat digunakan hewan yang bernapas di air untuk memberi ventilasi pada permukaan pernapasannya?
2. Apa perbedaan antara insang dan paru-paru?

DAFTAR PUSTAKA

- Evans, DH, Piermarini, PM & Choe, KP 2005, 'The Multifunctional Fish Gill: Dominant Site of Gas Exchange, Osmoregulation, Acid-Base Regulation, and Excretion of Nitrogenous Waste', *Physiological Reviews*, vol. 85, no. 1, pp. 97–177.
- Maina, JN 2014, 'Comparative respiratory physiology: the fundamental mechanisms and the functional designs of the gas exchangers', *Open Access Animal Physiology*, vol. 6, p. 53.
- Moyes, Christopher D and Patricia M Schulte. 2014. *Principle of Animal Physiology*. Second Edition. Pearson Education Limited. England

BAB 4

SISTEM PEREDARAN DARAH

Oleh Lia Septya

4.1 Fungsi dan Komponen Sistem Sirkulasi

Sistem sirkulasi memainkan peran penting dalam mendukung fungsi vital tubuh, yaitu 1) Persebaran Nutrisi, 2) Distribusi Oksigen 3) Transport Karbondioksida dan sampah metabolisme 4) Akses peredaran agen imunitas tubuh 5) Osmoregulasi dan Termoregulasi. Mekanisme fungsional sistem sirkulasi melibatkan komponen-komponen yang terintegrasi dalam menunjang kinerja sistem:

Pompa

Struktur organ yang berperan sebagai pompa umumnya dilengkapi oleh ruang tersekat yang dipisahkan oleh katup yang memiliki fungsi utama dalam menjalankan aliran sirkulasi agar terus bergerak pada arah dan ritme yang sesuai. Jantung mamalia adalah contoh pompa dalam sistem peredaran darah dengan empat ruang bersekat.

Saluran

Cairan yang beredar dalam sistem sirkulasi memerlukan wadah berupa struktur menyerupai tabung oleh jaringan penyusun yang cenderung fleksibel. Saluran ini menjadi jalur aliran cairan pada makhluk hidup. Pembuluh darah adalah contoh jelas sebagai saluran sirkulasi

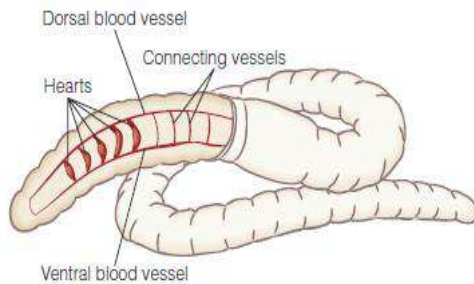
Cairan

Cairan sistem sirkulasi merupakan struktur cair dengan berbagai komponen yang disirkulasikan melalui sistem sirkulasi.

Dalam hal ini, darah dan cairan hemolimfa adalah contoh dari cairan dalam sistem sirkulasi. Pada beberapa jenis hewan sistem sirkulasi mengedarkan beberapa jenis tipe cairan dengan tujuan yang berbeda-beda bahkan diluar dari tujuan utama sistem sirkulasi. Sebagai contoh, pergerakan pada Oligochaeta memanfaatkan tekanan hidrostatik cairan pada sistem sirkulasinya untuk melakukan pergerakan. Disisi lain belalang sebagai salah satu kelompok serangga, memanfaatkan tekanan pada sistem sirkulasi dalam proses *molting*.

4.2 Sistem Sirkulasi Hewan

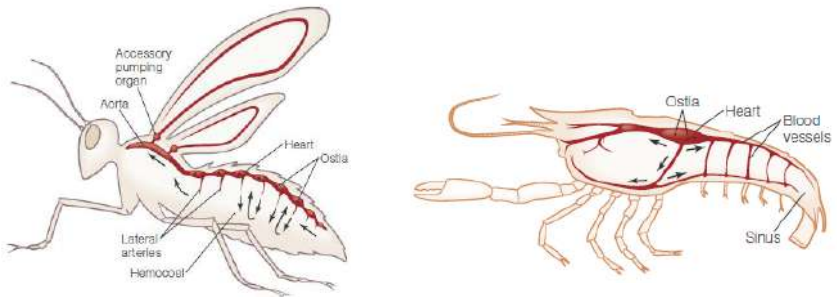
Cairan sirkulasi dapat mengalir melalui saluran tertutup pembuluh darah (**sistem peredaran tertutup**) sehingga memisahkan antara cairan didalam saluran dengan jaringan. Pada tipe ini cairan sirkulasi disebut sebagai **darah**. Pada kelompok oligochaeta (Gambar 1) Jantung memompa darah dan mengalirkannya melalui pembuluh darah tertutup bercabang ke seluruh tubuh.



Gambar 4.1. Oligochaeta dengan sistem peredaran darah tertutup
(Sumber: Moyes *et al.*, 2016)

Selanjutnya terdapat cara mengalir dari cairan sirkulasi melalui ruang terbuka (**sistem peredaran terbuka**) sehingga memungkinkan cairan bersinggungan langsung dan bercampur dengan jaringan disekitarnya. Oleh sebab itu pada hewan dengan sistem sirkulasi terbuka sangat sulit dibedakan antara darah, cairan jaringan dan cairan limfa. Cairan sirkulasi ini disebut sebagai

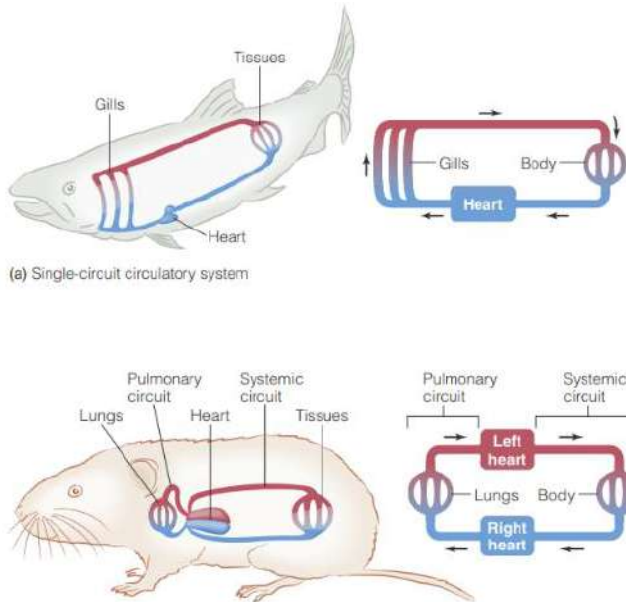
hemolimfa. Serangga dan beberapa kelompok crustacea memiliki sistem hemolimfa. Sistem sirsirkulasi terbuka, dilengkapi oleh ostia yang berfungsi menghisap hemolimfa kedalam jantung untuk dipompa dan dialirkan menuju aorta dan kemudian diarahkan keluar pembuluh terbuka (sinus) menuju rongga tubuh yang disebut hemocoel, disinilah hemolimfa kemudian beredar keseluruh jaringan tubuh.



Gambar 4.2 Serangga dan kelompok *Crustacea* dengan sistem peredaran darah terbuka
(Sumber: *Moyes et al, 2016*)

4.2.1 Sirkulasi Tunggal dan Ganda

Sistem sirkulasi tunggal menempatkan jantung sebagai organ yang memompa darah dalam satu alur atau satu seri, sistem ini dapat ditemukan pada ikan. Darah dari jantung dipompa menuju insang dan dialirkan ke seluruh tubuh lalu kembali ke jantung dalam satu seri. Sedangkan pada **sistem sirkulasi ganda**, jantung akan memompa darah dalam dua alur atau dua seri. Sistem sirkulasi mamalia, amfibi, burung dan reptil adalah contoh untuk sistem sirkulasi ganda. Darah dari ventrikel kiri jantung dipompa ke seluruh tubuh (**sirkuit sistemik**) dan akan kembali ke jantung melalui atrium dan ventrikel kanan dilanjutkan dengan pemompaan darah menuju paru-paru (**sirkuit pulmonari**) yang kemudian dikembalikan lagi ke jantung untuk di edarkan ke seluruh tubuh. Pada sistem ini, aliran darah mengalami dua kali seri pemompaan dengan tujuan yang berbeda.

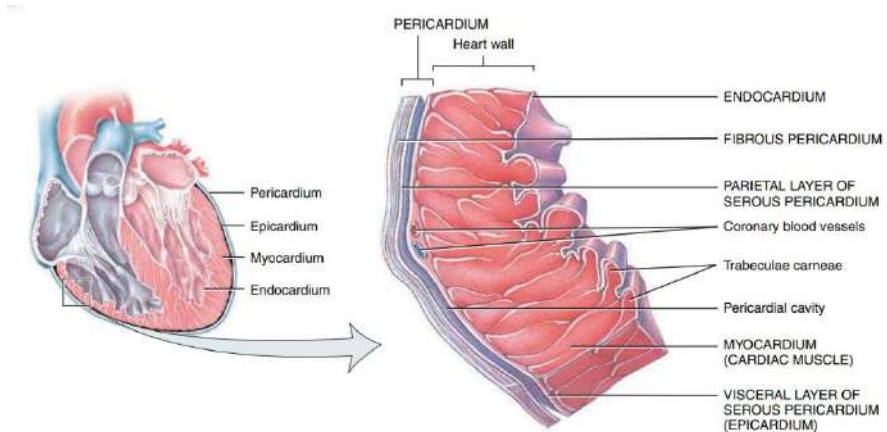


Gambar 4.3. Sistem sirkulasi tunggal dan ganda pada hewan
(Sumber: *Christopher D. Moyes, Patricia M. Schulte - Principles of Animal Physiology-Pearson, 2016*)

4.2.2 Jantung

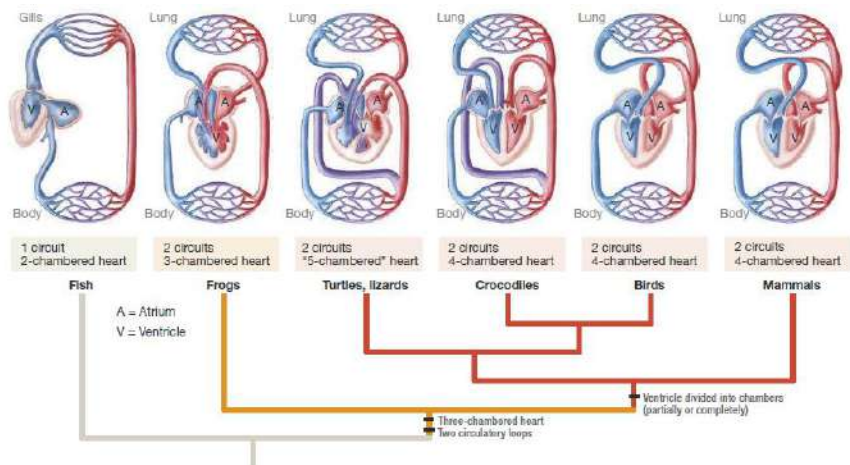
Struktur ruang pada jantung memainkan peran krusial dalam sistem sirkulasi hewan. Jantung vertebrata adalah sebuah contoh yang tepat untuk mempelajari peran jantung dalam sistem kardiovaskuler. Jantung dilapisi oleh **perikardium** yaitu selaput jaringan ikat pembungkus elastis yang akan merenggang menyesuaikan dengan ukuran jantung saat memompa dan relaksasi. Selanjutnya terdapat lapisan terluar dari jantung atau biasa disebut **epikardium**, selaput ini terdiri atas dua lapisan yaitu lapisan viseral yang terdiri atas jaringan mesotelium dan lapisan yang tersusun atas jaringan lemak atau adiposa dan jaringan ikat. Epikardium juga terdiri dari pembuluh darah dan pembuluh limfa. Ruang antara perikardium dan epikardium terisi oleh **cairan perikardial** yang berperan sebagai pelumasan setiap kali ada gesekan antara dinding jantung dan perikardium. Lapisan tengah atau **miokardium**

tersusun atas jaringan otot jantung dengan struktur bercabang yang mendukung fungsi jantung dalam kerja “meremas” saat memompa darah. **Endokardium** sebagai lapisan terdalam tersusun atas jaringan endotelium.



Gambar 4.4. Lapisan Dinding Jantung
(Sumber: *Tortora, 2014*)

Jantung tersusun atas dua jenis ruang, **atrium (serambi)** sebagai ruang penerima darah yang masuk ke jantung dan **ventrikel (bilik)** sebagai ruang tempat darah yang akan dipompa keluar jantung. Jumlah ruang jantung pada hewan berbeda-beda tergantung mekanisme sistem kardiovaskular. Pada vertebrata perubahan dan perkembangan struktur khususnya pada jumlah ruang jantung dipengaruhi oleh kolonisasi hewan air menuju hewan darat dahulu kala, evolusi sistem respirasi, hingga evolusi pada metabolisme hewan. Selain ruang, jantung juga dilengkapi dengan beberapa katup sebagai gerbang buka-tutup yang memiliki andil dalam mengatur kemana darah harusnya mengalir. Penjelasan mengenai katup jantung akan dijelaskan bersamaan mengenai **siklus kardiak**.



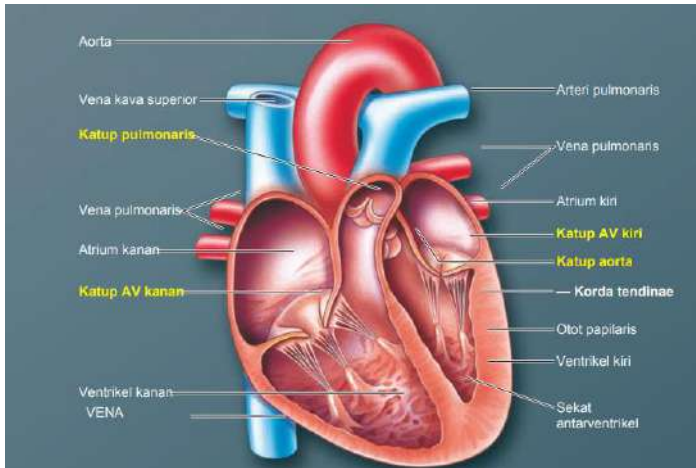
Gambar 4.5. Jumlah Ruang Jantung Pada Beberapa Kelompok Hewan

(Sumber: Moyes, 2016)

Siklus Kardiak. Darah masuk melalui sinus coroner, vena cava superior dan inferior menuju atrium kanan bersamaan dengan itu disisi atrium kiri darah masuk melalui vena pulmonalis. Darah dari atrium kanan kemudian memasuki ruang ventrikel kanan melewati **katup trikuspidalis** yang terbuka, diikuti dengan masuknya darah dari atrium kanan menuju ventrikel kanan melalui **katup bikuspidalis**. Masuknya darah dari area atrium menuju ventrikel terjadi karena adanya tekanan ke area ventrikel yang berada pada kondisi relaksasi (**diastol**) dan kontraksi (**sistol**) pada area atrium.

Setelah darah memasuki ruang ventrikel, kedua katup trikuspidalis dan bikuspidalis secara otomatis menutup untuk mencegah darah kembali ke area serambi. Pada kondisi ini otot ventrikel kemudian berkontraksi (Sistol) untuk mendorong darah keluar dari jantung. Darah dari ventrikel kiri menuju Aorta melewati **katup aorta** dan darah dari ventrikel kanan menuju arteri pulmonalis melewati **katup pulmonalis**. Kedua katup ini juga secara otomatis tertutup setelah darah sepenuhnya keluar dari

ruang ventrikel untuk mencegah darah kembali masuk kedalam jantung.



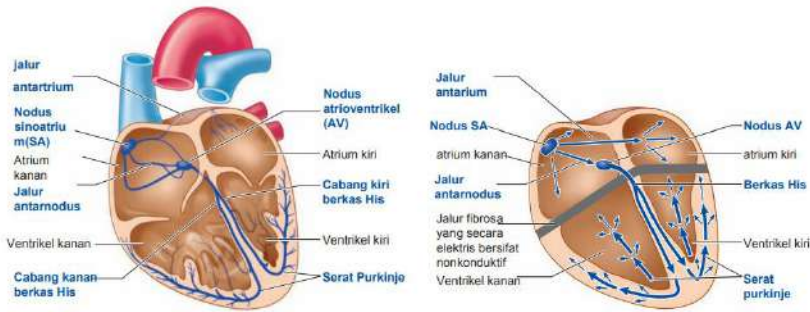
Gambar 4.6. Anatomi Jantung
(Sumber: Sherwood, 2013)

Ketebalan dinding jantung berbeda-beda pada setiap ruang bergantung pada fungsinya. Dinding atrium memiliki struktur lebih tipis karena kinerja yang tidak memerlukan tekanan yang terlalu besar. Sedangkan ventrikel memiliki dinding lebih tebal karena berada pada kondisi dengan tekanan yang tinggi ketika bekerja. Jika dibandingkan dalam potongan melintang, area kiri jantung baik itu ventrikel maupun atrium memiliki dinding yang lebih tebal karena berfungsi memompa darah menuju area yang cukup jauh dari jantung. Sebaliknya, area kanan memiliki dinding lebih tipis karena berfungsi memompa darah dengan tujuan yang cukup dekat.

4.2.3 Mekanisme Kerja Jantung

Jantung tersusun atas serat otot autoritmis istimewa dengan sumber aktivitas listrik tersendiri yang memicu kontraksi pada jantung. Serat ini biasa disebut sebagai **Nodus Sinoatrium (nodus SA)** atau **pacemaker** dengan kemampuan menghasilkan potensial

aksi secara terus menerus sehingga memungkinkan jantung dapat terus berdetak dengan ritme. Selain itu, serat ini juga mengkoordinasikan kontraksi pada ruang jantung untuk membangun sistem pompa darah yang optimal.



Gambar 4.7. Alur Potensial Aksi Pada Jantung
(Sumber: Sherwood, 2013)

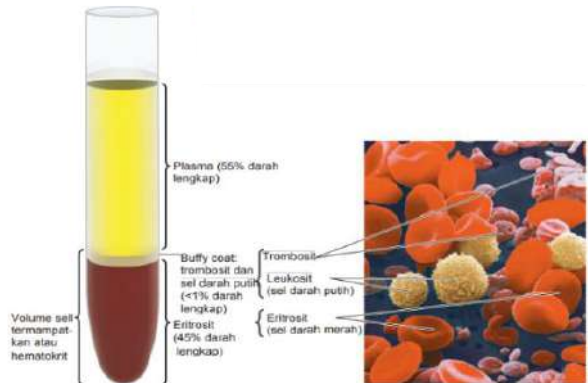
Nodus SA membangkitkan potensial aksi yang kemudian disebar keseluruh dinding atrium dan menghasilkan kontraksi atrium. Bersamaan dengan itu impuls dihantarkan hingga mencapai serat autoritmis lainnya yaitu **Nodus Atrioventrikular (Nodus AV)**. Pada nodus ini impuls ditunda selama 0,1 detik untuk memberikan waktu bagi atrium benar-benar mengosongkan ruangnya dan mengalirkan darah sepenuhnya ke ventrikel. Melalui Nodus AV impuls kemudian dihantarkan kembali menuju dinding-dinding ventrikel melalui **Berkas His** dan diteruskan ke serat-serat otot jantung yang bercabang (**Serat Purkinje**) dan menyebar ke seluruh miokardium ventrikel sehingga menyebabkan ventrikel berkontraksi. Darah dipompa keluar dari jantung melalui ventrikel.

Bila disimpulkan jalur jalannya impuls sebagai berikut:

***Pacemaker* → Dinding Atrium → Nodus AV → Berkas His → Serat Purkinje → Dinding Ventrikel**

4.2.4 Cairan Sirkulasi (Komposisi Darah dan Fungsinya)

Pada hewan baik invertebrata maupun vertebrata, cairan sirkulasi terdiri atas beragam jenis sel-sel yang disebut sebagai **hemosit** dengan peran penting seperti, distribusi nutrisi, pertukaran gas, imunitas hingga faktor penutupan luka. Vertebrata memiliki 5 jenis sel Hemosit yang terkandung dalam darah, yaitu Eritrosit, Monosit, Limfosit, Granulosit dan Trombosit. Darah vertebrata akan terpisah menjadi tiga bagian ketika dilakukan sentrifugasi, yaitu sekitar 55% Plasma darah, kurang dari 1% Sel darah Putih dan keping darah, lalu sisanya diisi oleh sel darah merah. Komposisi ini akan berubah bergantung pada kondisi fisiologis yang terjadi.

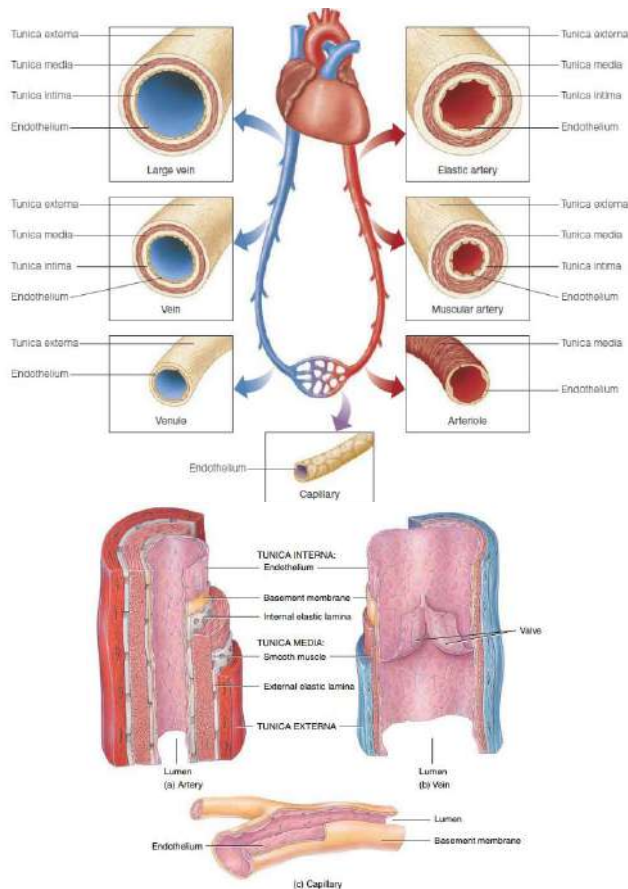


Gambar 4.8. Komposisi Darah Vertebrata dan Fungsinya
(Sumber: Sherwood, 2013)

Konstituen	Fungsi
Plasma	
Air	Berperan sebagai medium transpor; membawa panas
Elektrolit	Berperan dalam eksitabilitas membran; distribusi cairan melalui osmosis antara CES dan CIS; menyangga perubahan pH
Nutrien, zat sisa, gas, hormon	Diangkut dalam darah; gas CO ₂ darah berperan dalam keseimbangan asam-basa
Protein plasma	Secara umum, menghasilkan efek osmotik yang penting dalam distribusi CES antara kompartemen vaskular dan interstisium; menyangga perubahan pH
<i>Albumin</i>	Mengangkut banyak bahan; berperan paling besar dalam menentukan tekanan osmotik koloid
<i>Globulin</i>	
Alfa dan beta	Mengangkut banyak bahan tak-larut air; mencakup faktor pembekuan dan molekul prekursor inaktif
Gama	Merupakan antibodi
<i>Fibrinogen</i>	Merupakan prekursor inaktif untuk jalinan fibrin pada bekuan
Elemen Selular	
Eritrosit	Mengangkut O ₂ dan CO ₂ (terutama O ₂)
Leukosit	
<i>Neutrofil</i>	Menelan bakteri dan debris
<i>Eosinofil</i>	Menyerang cacing parasitik; berperan dalam reaksi alergi
<i>Basofil</i>	Mengeluarkan histamin, yang penting dalam reaksi alergi, dan heparin, yang membantu membersihkan lemak dari darah
<i>Monosit</i>	Dalam transit menjadi makrofag jaringan
<i>Limfosit</i>	
Limfosit B	Menghasilkan antibodi
Limfosit T	Menghasilkan respons imun diperantarai-sel
Trombosit	Berperan dalam hemostasis

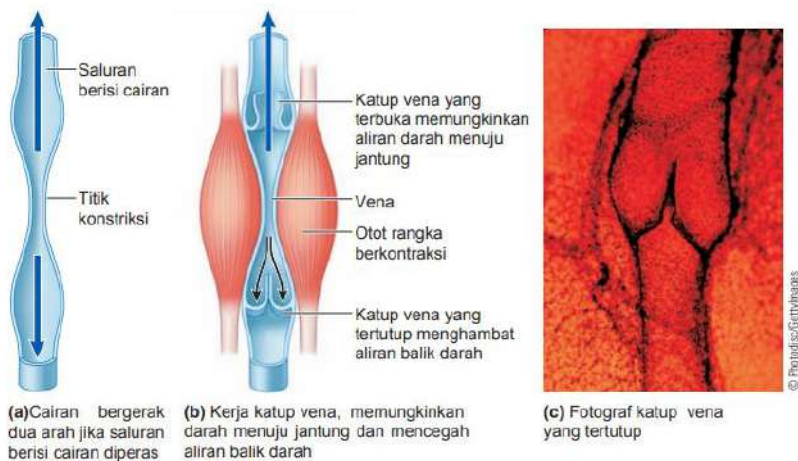
4.2.5 Pembuluh Darah

Sistem peredaran darah tertutup memerlukan saluran termodifikasi guna mendukung mekanisme fisiologis sistemnya. Pada Gambar 4 menampilkan variasi jenis pembuluh darah pada vertebrata yang terdiri atas **arteri, vena dan kapiler**. Terdapat tiga lapisan yang menyusun pembuluh darah, lapisan dalam (tunika intima) disusun dari selapis jaringan epitel pipih endothelium, diikuti lapisan tengah (tunika media) yang tersusun atas jaringan otot serta jaringan ikat dan lapisan terluar (tunika eksterna) yang tersusun dari sebagian besar jaringan ikat.



Gambar 4.9. Jenis dan struktur pembuluh darah vertebrata
(Sumber: Moyes ,2016)

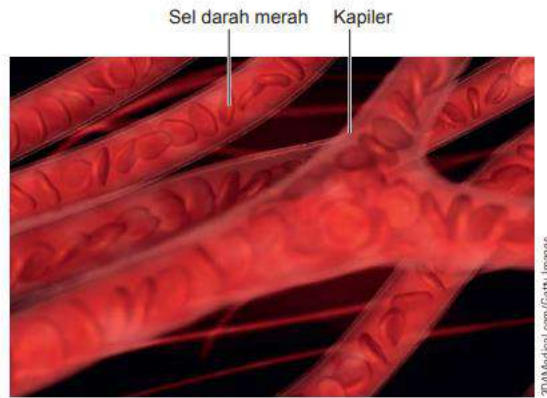
Jika diperhatikan, **Pembuluh Arteri** yang semakin dekat dengan jantung memiliki lapisan tunika eksterna dan media lebih tebal. Struktur ini membuat arteri lebih siap menerima tekanan darah yang keluar dari jantung. Seluruh pembuluh arteri membawa darah kaya akan oksigen untuk dialirkan ke seluruh tubuh (kecuali pembuluh arteri pulmonalis ke paru-paru yang membawa darah kaya CO₂). Semakin jauh dari jantung arteri semakin elastis dengan susunan lapisan yang lebih tebal terdapat pada tunika media yang tersusun atas otot polos.



Gambar 4.10 Katup Pada Pembuluh Vena
(Sumber: Sherwood, 2013)

Pada arteriol hingga kapiler, struktur dikemas semakin kecil dan tipis sehingga memungkinkan darah dapat didistribusikan secara difusi ke jaringan. Setelah terjadi difusi di kapiler, kini darah yang mengandung sampah metabolisme selanjutnya dibawa oleh vena menuju jantung. **Pembuluh Vena** membawa darah yang kaya akan CO₂ (*kecuali* pembuluh vena pulmonalis dari paru-paru yang kaya akan O₂) berada pada posisi menjauhi jantung sehingga menerima dan membawa darah dengan tekanan yang rendah. Karena kondisi ini desain pembuluh vena terdiri atas struktur serta susunan khusus dengan saluran lebih lebar (Lumen) dan dinding

yang lebih tipis. Vena dilengkapi dengan katup yang berfungsi untuk menahan darah agar tidak kembali mengalir berbalik arah. Karena kondisi tekanan tidak sekuat arteri, aliran darah pada pembuluh darah vena dibantu dengan kontraksi pada otot lurik disekitar pembuluh vena yang berperan sebagai pompa untuk membantu mendorong darah menuju jantung.



Gambar 4.11. Pembuluh Darah Kapiler
(Sumber: Sherwood, 2013)

Pembuluh Kapiler adalah pembuluh darah terkecil yang berfungsi sebagai tempat pertukaran nutrisi, gas hingga sampah metabolisme antara darah dan jaringan secara difusi. Diameter saluran kapiler (garis tengah rerata 7 μm) yang hampir seukuran sel darah merah (garis tengah 8 μm) hanya memungkinkan sel darah merah melalui pembuluh kapiler secara satu per satu. Dinding kapiler terdiri atas satu lapis jaringan endotel sehingga mendukung proses difusi antara kapiler dan sel disekitarnya.

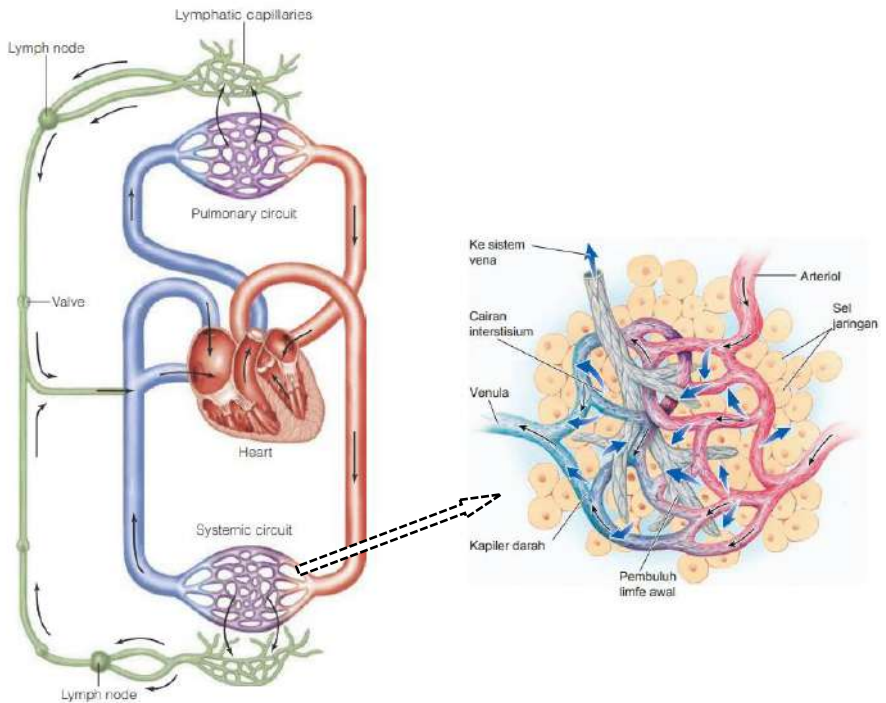
4.2.6 Tekanan Darah dan Regulasinya

Darah yang di pompa dari ventrikel kiri keluar dari jantung menghasilkan **tekanan sistolik** pada arteri yang menyebabkan peregangan pada pembuluh darah. Tekanan ini menjadi lebih besar ketika darah melalui arteriola dengan bukaan yang sempit. Pada saat ventrikel jantung melakukan relaksasi, pembuluh arteri yang elastis kembali ke bentuk semula dan menyebabkan darah

tetap menghasilkan tekanan namun lebih rendah kondisi ini menghasilkan **tekanan diastolik**. Pada situasi kondisi tertentu, sistem saraf atau sistem hormon dapat menginisiasi kontraksi otot polos pada pembuluh darah dan menyebabkan pembuluh darah menyempit dan tekanan darah pada pembuluh darah meningkat, kondisi ini disebut sebagai **vasokonstriksi**. Sebaliknya kondisi otot polos pembuluh darah berelaksasi dan menyebabkan penurunan tekanan darah disebut sebagai **vasodilatasi**.

4.2.7 Sistem Limfatik

Pada proses sirkulasi, darah akan kehilangan cairan yang terdifusi keluar menuju area interstisial ketika mengantarkan nutrisi ke jaringan namun cairan ini tidak sepenuhnya Kembali ketika reabsorpsi cairan bersama sampah metabolisme terjadi. Sekitar 15 % cairan akan tertinggal di jaringan yang kemudian akan dikembalikan lagi masuk kedalam pembuluh darah oleh sistem limfatik. Cairan ini masuk sistem limfatik melalui pembuluh limfa yang tersusun oleh selapis jaringan epitel endothelium. Ujung pembuluh limfa berbentuk seperti akar terbuka yang tersusun dari katup-katup tumpang tindih yang memungkinkan cairan untuk masuk namun tidak dapat mengalir ke arah yang berlawanan sehingga mencegah cairan untuk kembali lagi ke jaringan melainkan bermuara masuk kembali ke pembuluh darah.



Gambar 4.12 . Sistem Limfatik
(Sumber: Moyes, 2013)

Pada, amfibi dan reptil sistem limfatik dilengkapi dengan jantung limfa yang membantu cairan limfa untuk membantu memompa cairan. Saluran pembuluh limfa pada Mamalia dan burung akan melalui beberapa titik kelenjar limfa yang disebut sebagai **nodus limfa**. Pada organ ini, cairan limfa yang nantinya akan masuk ke pembuluh darah akan “dibersihkan” terlebih dahulu. Hal ini memungkinkan karena pada nodus limfa sangat terkonsentrasi sel-sel terspesialisasi yang disebut **limfosit**, sel ini akan membunuh pathogen pada cairan limfa. Cairan limfa yang telah terfiltrasi kemudian dialirkan menuju ke nodus limfa yang lebih besar hingga pada akhirnya akan dialirkan masuk ke dalam sistem sirkulasi peredaran darah melalui pembuluh darah vena di area leher. Hambatan atau gangguan dalam filtrasi maupun reabsorpsi cairan pada sistem limfatik akan menyebabkan

ketidakseimbangan cairan jaringan dan dapat menyebabkan penumpukan cairan jaringan (**edema**).

4.3 Forum Diskusi

Diskusikan Bersama kelompokmu!

Bila kelompok anda adalah komunitas Kesehatan jantung yang menentang penayangan iklan rokok di media, argumen-argumen apa saja yang dapat kelompok anda sampaikan yang dapat memperkuat pelarangan penayangan iklan rokok?!

4.4 Uji Kompetensi

1. Bagaimana pembuluh darah vena dari tubuh bagian bawah mamalia khususnya manusia dapat mempertahankan aliran darah agar terus naik menuju jantung dengan denyut yang lemah ?
2. Mekanisme seperti apa yang dilakukan oleh serangga untuk memasok kebutuhan oksigen sel-sel tubuhnya ?

DAFTAR PUSTAKA

- Campbell, Neil A., Jane B. Reece., Michael L. Chain., Steven A. Wasserman., Peter V. minorsky., Robert B. Jackson. 2011. Biologi. Edisi kesembilan. Erlangga. Jakarta
- Mescher, Anthony L. 2012. *Histologi Dasar Junqueira Teks & Atlas Edisi 12*. Jakarta. Erlangga
- Moyes, Christoper D dan Patricia M Schulte. 2008. *Principles of Animal Physiology 3rd Edition*. Toronto. Pearson.
- Sherwood, Lauralee. 2013. *Introduction to Human Physiology*. Tiongkok. Brooks/Cole Cengage Learning
- Tortora, Gerard J dan Bryan Derrickson. 2014. *Principles Anatomy & Physiology 14th Edition*. USA:Amerika. Wiley

BAB 5

SISTEM IMUNITAS

Oleh Lia Septya

5.1 Sistem Imunitas

Hewan memiliki sistem imunitas sebagai bentuk pertahanan terhadap faktor patogen dari lingkungan atau bahkan sel abnormal dari tubuhnya sendiri. Secara garis besar terdapat dua tipe pertahanan pada sistem imunitas yaitu **kekebalan bawaan (*innate immunity*)** yang dimiliki oleh semua hewan dan **kekebalan yang diperoleh (*acquired immunity*)** yang hanya dimiliki oleh hewan vertebrata.

5.2 Jenis Respon Kekebalan Tubuh Hewan

5.2.1 Kekebalan Bawaan (*Innate Immunity*)

Kekebalan bawaan (*Innate Immunity*) dibentuk oleh **pertahanan penghalang (*barrier*)** dan **respon pertahanan internal**. Kekebalan bawaan selalu tersedia ketika dibutuhkan dan bersifat tidak spesifik sehingga apapun jenis faktor patogen yang diterima akan direspon dengan cara yang sama.

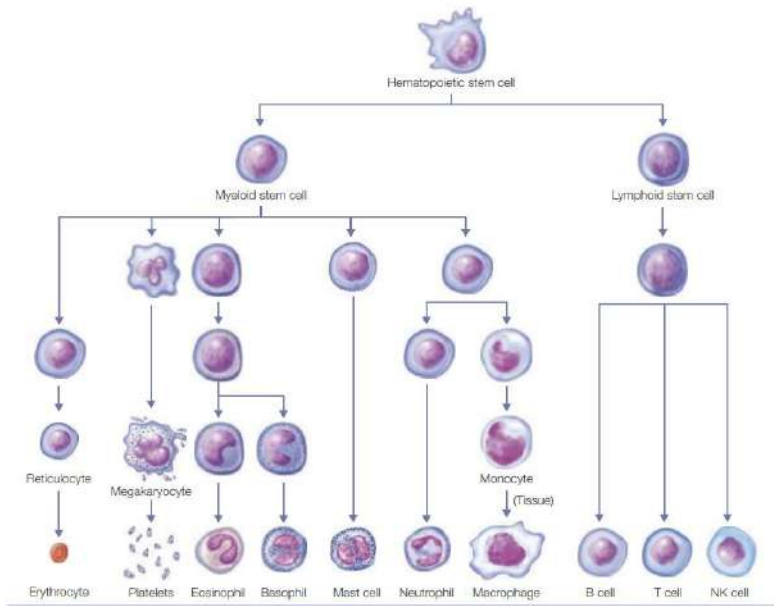
1. Pertahanan Penghalang

Pertahanan penghalang seperti jaringan epitel, membran mukosa dan jaringan sekretori mampu dengan efektif mencegah adanya penetrasi faktor patogen seperti bakteri, virus ataupun jamur ke dalam tubuh hewan. Jaringan epitel atau *barrier* sejenis yang melapis permukaan luar maupun dalam tubuh hewan berfungsi sebagai bentuk pertahanan pertama dan terluar dengan cara menghalangi akses masuk

faktor patogen ke dalam tubuh. Seperti halnya yang dimiliki oleh kelompok serangga dengan lapisan zat kitin pada permukaan tubuhnya yang menghalangi mikroorganisme untuk melakukan penetrasi. Contoh lain pada kulit manusia yang tersusun atas jaringan epitel dengan sel yang rapat membentuk *barrier* yang sangat baik untuk mencegah masuknya mikroorganisme. Pada permukaan saluran pernafasan mamalia yang mensekresikan mukus untuk menjerat mikroorganisme yang melaluinya. Selain penghalang secara fisik, bentuk pertahanan ini juga dapat mencegah infeksi pathogen melalui pembentukan lingkungan yang merugikan bagi pathogen. Sebagai contoh lingkungan asam pada permukaan lambung saluran pencernaan mamalia mampu membunuh patogen sebelum masuk ke saluran pencernaan lebih dalam.

2. Respon Pertahanan Internal

Identifikasi dan Fagositosis. Dalam kondisi tertentu (misal luka gores yang membuka lapisan tubuh hewan) dapat menyebabkan pertahanan penghalang bisa saja terlewat dan patogen masuk ke dalam tubuh. Selanjutnya tubuh hewan akan merespon faktor patogen yang telah masuk ke dalam tubuh dengan mengenali dan menentukannya sebagai “benda asing” atau “tubuh sendiri”. Setiap jenis sel bahkan permukaan tubuh organisme parasit seperti cacing parasit memiliki tanda spesifik yang terdapat pada permukaan sel nya. Tanda ini yang kemudian digunakan untuk mengidentifikasi adanya patogen oleh sistem imun hewan. Pada mamalia, benda asing yang menginfeksi akan dideteksi oleh leukosit melalui **reseptor serupa Toll** atau **TLR** yang mampu mengenali tanda pada subjek infeksi. Saat subjek ini dikenali sebagai “benda asing”, leukosit akan memfagositosis untuk dicerna secara internal. Sebagai contoh, reseptor TLR4 pada leukosit cocok dengan molekul yang ada pada sejumlah bakteri patogen.

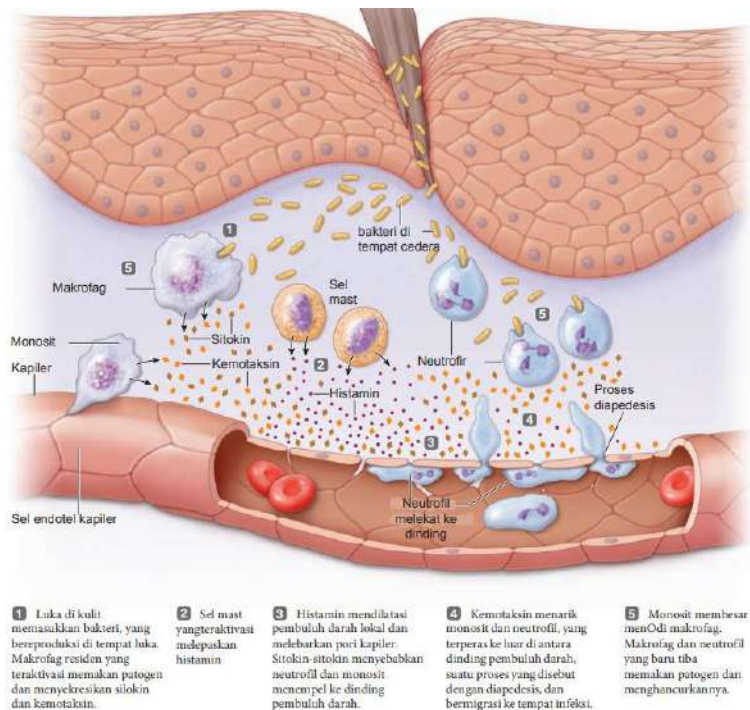


Gambar 5.1. Jenis Leukosit
(Sumber: Sherwood, 2013)

Reaksi Peradangan (*Inflammatory Response*).

Rangkaian inflamasi terjadi secara non spesifik ketika patogen memasuki tubuh yang berfungsi menginisiasi area isolasi bagi patogen dan sel-sel fagosit serta protein plasma. Reaksi diawali dengan aktivasi sel makrofag ketika kehadiran patogen terdeteksi. Sel makrofag yang teraktivasi kemudian mensekresikan senyawa sitokin dan kemotaksin yang berperan sebagai mediator yang memicu sel imunitas lain untuk membantu penyerangan invasi patogen. Selanjutnya terjadi pelepasan histamin oleh sel mast yang mengakibatkan pembesaran pembuluh darah (vasodilatasi). Vasodilatasi hasil induksi histamin yang dilepaskan memungkinkan akumulasi komponen imunitas (protein plasma dan sel fagosit) di dalam darah berkumpul di area ini. Khususnya protein plasma sangat dipermudah untuk dapat bergerak masuk ke dalam area inflamasi karena histamin juga berperan dalam mengatur pori dinding pembuluh darah. Selanjutnya terjadi akumulasi sel neutrofil

dan monosit yang bermigrasi dari dalam pembuluh darah menuju ke area inflamasi secara diapedesis sebagai respon sekresi sitokin dan kemotaksin oleh makrofag di awal reaksi inflamasi. Neutrofil dan monosit yang masuk ke dalam area inflamasi selanjutnya akan memfagositosis patogen-patogen tersebut.



Gambar 5.2. Respon Peradangan
(Sumber: Sherwood, 2013)

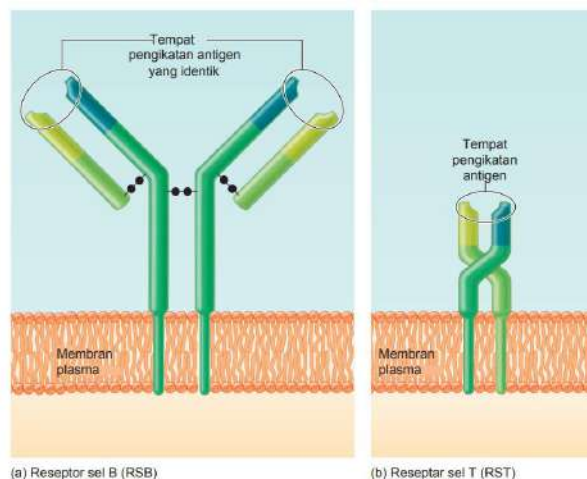
Protein Pendukung Sistem Kekebalan Bawaan dan Sel *Natural Killer*

Selain respon peradangan dan aktifitas leukosit, sistem imunitas bawaan juga diperkuat dengan aktifitas protein interferon dan Sel *Natural Killer* (Sel NK). Interferon disekresikan oleh sel yang terinfeksi oleh virus. Interferon dapat mencegah replikasi virus di sel inang lain serta mampu meningkatkan daya bunuh makrofag, sel NK, dan sel T sitotoksik. Sedangkan Sel NK menyediakan pertahanan

non-spesifik dan segera terhadap sel yang terinfeksi virus dan sel kanker sebelum sel T sitotoksik yang lebih spesifik aktif menyerang patogen.

5.2.2 Kekebalan yang diperoleh/Adaptif (*Acquired/ adaptive Immunity*)

Pada **kekebalan adaptif**, respon yang dihasilkan akan bersifat spesifik terhadap jenis patogen yang menyerang melingkupi **Respon Humoral** dan **Respon Diperantarai Sel**. Respon humoral terjadi melalui aktivitas antibodi yang dihasilkan oleh turunan sel Limfosit B sedangkan Respon Diperantarai Sel merupakan aktivitas dari Limfosit T. Sel B dan sel T memiliki kemampuan spesifik untuk mengenali “benda asing” sehingga mampu mengenali baik itu sel sendiri atau benda asing yang perlu untuk dihancurkan. Antigen (molekul asing berukuran besar dan unik yang memicu respons imun spesifik Sel Limfosit terhadap dirinya sendiri) dapat memicu respon imun spesifik. Reseptor Sel Limfosit B (RSB) dan Reseptor Sel Limfosit T memiliki kemampuan dalam mengenali antigen secara spesifik.



Gambar 5.3. Antibodi
(Sumber: Sherwood, 2013)

Sel Limfosit B bekerja melawan dua jenis antigen berdasarkan kebutuhan terhadap bantuan Sel Limfosit B. **Antigen independen-T** merupakan jenis antigen yang direspon oleh sel B tanpa harus melibatkan sel T dalam pembentukan antibodi. Sebaliknya, **antigen dependen T**, merupakan jenis antigen yang direspon oleh sel B melalui bantuan sel T.

Pada saat antigen dikenali oleh sel B melalui perlekatan antara reseptor dan antigen, Sel B berdiferensiasi menjadi **sel plasma aktif** dan **sel memori** yang mengalami dorman. Pada awal paparan patogen baru, Sel Plasma membutuhkan waktu dalam menghasilkan antibodi yang sesuai dengan antigen pemicu. Respon pembentukan antibodi pada paparan awal disebut sebagai **respon primer**. Selanjutnya sel memori yang terbentuk berperan dalam menyimpan ingatan spesifikasi patogen yang menginvasi tubuh agar pada serangan yang berikutnya menghasilkan respon produksi antibodi yang lebih cepat dan lebih mematikan bagi patogen tersebut. Respon ini disebut sebagai **respon sekunder**. Antibodi ini sendiri terbagi menjadi lima jenis, diantaranya:

- Imunoglobulin IgM, berperan sebagai RSB perlekatan dengan antigen yang diprosuksi pada respon awal sel plasma;
- Imunoglobulin IgG, disekresikan ketika tubuh merespon adanya antigen yang sama yang sebelumnya pernah menginvasi tubuh;
- Imunoglobulin IgE, adalah mediator antibodi yang merespon alergi;
- Imunoglobulin IgA, antibodi yang bisa ditemukan di ditemukan dalam sekresi sistem pencernaan, pernapasan, dan urogenital (urinarius dan reproduktif) serta dalam air susu dan air mata
- Imunoglobulin IgD, terdapat di permukaan sel B namun belum diketahui secara jelas mengenai fungsinya.

Secara umum antibodi berperan dalam mengacaukan fungsi antigen dalam berbagai cara diantaranya perlekatan antibodi dan protein permukaan antigen dapat menghalangi perlekatan antigen dengan sel inang yang akan di infeksi. Contoh lainnya, terbentuknya kompleks perlekatan antigen-antibodi dia suatu kondisi dapat

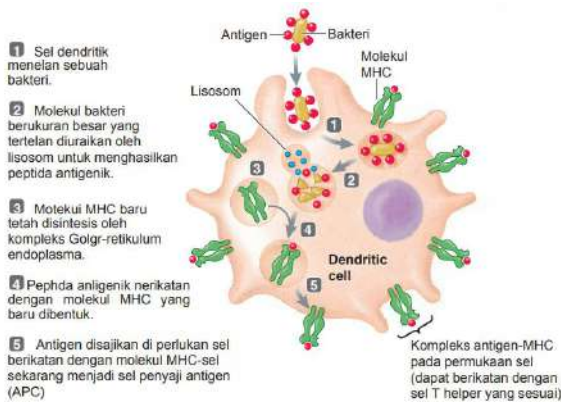
meningkatkan rangkaian aktivasi protein komplementer yang dapat menyerang antigen.

Sel Limfosit T. Berbeda dengan Sel B yang menyerang antigen dengan memproduksi antibodi yang memediasi kerja dan aktivitas antigen, Sel T bekerja dengan cara menyerang serta menghancurkan secara langsung antigen atau sel sasaran (contoh: sel kanker). Tidak seperti sel B, sel T diaktifkan oleh antigen asing hanya jika antigen tersebut berada di permukaan suatu sel yang juga membawa penanda identitas individu yang bersangkutan; yaitu, antigen asing dan antigen-diri yang dikenal sebagai molekul **kompleks histokompabilitas mayor (*major histocompatibility complex*, MHC)**. Terdapat dua jenis MHC, yakni **MHC Tipe I** yang berikatan dengan sel T Sitotoksik sedangkan **MHC Tipe II** akan berikatan dengan Sel T *Helper*. Secara sederhana, Sel T mengenali sel sasaran ketika sel sasaran memiliki dua penanda pada permukaannya yaitu antigen-diri MHC dan antigen patogen. Sel T terbagi menjadi tiga jenis, diantaranya sebagai berikut:

Sel T Sitotoksik, Sel ini akan menghancurkan sel yang terindikasi diinfeksi oleh patogen atau menghancurkan sel diri yang abnormal dengan potensi membahayakan seperti sel kanker. Sebagai contoh, sel inang yang terinfeksi virus akan mengurai selubung protein virus dan mentransfer antigennya ke permukaan sel khusus yang kemudian ditumpukkan pada antigen-diri MHC yang baru terbentuk sehingga Sel T dapat mengenali sel mana yang perlu diserang. Sel T kemudian menyerang dengan cara mensekresikan senyawa kimia yang mampu menghancurkan sel inang sebelum virus bereplikasi didalamnya. Penghancuran sel dapat terjadi melalui lisis atau apoptosis sebagai respon bahan kimia yang di sekresikan oleh Sel T Sitotoksik;

Sel T *Helper*, merupakan Sel T dengan konsentrasi terbanyak daripada jenis Sel T lainnya, berperan menyerang patogen dengan cara memodulasi aktivasi sel imun lain. Sel ini mampu menginduksi Sel B untuk berdiferensiasi menjadi sel mast dan pembentukan antibodi. Selain itu Sel T *Helper* juga mengeluarkan berbagai sitokin, yang meningkatkan aktivitas sel T sitotoksik serta sel ini juga

mampu menghasilkan kemotaksin yang mampu mengundang neutrofil dan calon makrofag ke area invasi patogen;



Gambar 5.4. Sel T *helper* dan kompleks MHC
(Sumber: Sherwood, 2013)

Sel T regulatorik (Treg), Tipe Sel T yang terakhir ini berperan sebagai kontrol respon imun. Sel Treg mengandung sejumlah besar protein intraselular **Foxp3**, yang esensial untuk mengubah perkembangan sel T menjadi Treg dan memungkinkan sel supresor ini untuk menenangkan sel imun lain seperti Sel NK, Sel B, dan Sel T *Helper*.

5.3 Forum Diskusi

Diskusikan Bersama kelompokmu!

Bagaimana vaksin dapat membantu menurunkan kemungkinan mortalitas pada hewan ?!

5.4 Uji Kompetensi

1. Bagaimana Sel T sitotoksik dapat membantu penyerangan sel tubuh abnormal tanpa meleset?
2. Sistem imun tubuh mamalia membutuhkan waktu yang relatif lebih cepat dalam menangani invasi kedua dari jenis patogen yang sama? Mengapa demikian?

DAFTAR PUSTAKA

- Campbell, Neil A., Jane B. Reece., Michael L. Chain., Steven A. Wasserman., Peter V. minorsky., Robert B. Jackson. 2011. Biologi. Edisi kesembilan. Erlangga. Jakarta
- Mescher, Anthony L. 2012. *Histologi Dasar Junqueira Teks & Atlas Edisi 12*. Jakarta. Erlangga
- Moyes, Christoper D dan Patricia M Schulte. 2008. *Principles of Animal Physiology 3rd Edition*. Toronto. Pearson.
- Sherwood, Lauralee. 2013. *Introduction to Human Physiology*. Tiongkok. Brooks/Cole Cengage Learning
- Tortora, Gerard J dan Bryan Derrickson. 2014. *Principles Anatomy & Physiology 14th Edition*. USA:Amerika. Wiley

BAB 6

SISTEM RANGKA DAN OTOT

Oleh Wahyu Anggar Wanto

6.1 Pendahuluan

Manusia mempunyai kemampuan untuk bergerak dan berpindah tempat. Gerakan terjadi melalui kerja sama antara kerangka dan otot. Kerangka manusia terdiri dari lebih dari 200 tulang. Beberapa tulang menyatu dan yang lainnya dihubungkan ke sendi melalui ligamen yang memungkinkan pergerakan. Otot menempel pada tulang dan menghubungkan satu tulang dengan tulang lainnya. Otot mempunyai kemampuan berkontraksi dan dapat menggerakkan tulang dengan mekanisme tertentu. Oleh karena itu otot disebut alat gerak aktif, sedangkan tulang disebut alat gerak pasif.

Kemampuan otot yang digunakan untuk melakukan kontraksi dan juga relaksasi sehingga bisa untuk menggerakkan bagian tulang karena akibat dari otot yang memiliki serabut otot disebut dengan miofibril. Pada miofibril terkandung protein kontraksi yakni seperti aktin dan juga myosin. Dari jumlah semua tulang Sebanyak 206 tulang pada tubuh manusia akan membentuk rangka yang bisa menopang bagian anggota tubuh. Selain digunakan sebagai alat untuk bergerak, ternyata tulang juga mempunyai peran dalam melindungi bagian organ dalam dan juga digunakan sebagai pabrik yang bisa membuat dan menghasilkan sel-sel darah. Sedangkan otot memiliki peranan dalam upaya membantu menggerakkan bagian tulang dengan cara melakukan kontraksi.

6.2 Sistem Rangka pada Manusia

Manusia memiliki kerangka internal yang terdiri dari tulang keras (tulang rangka) dan tulang rawan. Kerangka manusia terdiri atas satu tulang atau gabungan tulang (seperti tengkorak) yang

didukung oleh struktur lain, seperti ligamen (jaringan ikat yang menempelkan satu tulang ke tulang lainnya), tendon (jaringan ikat yang menghubungkan otot dengan tulang) dan otot itu sendiri.

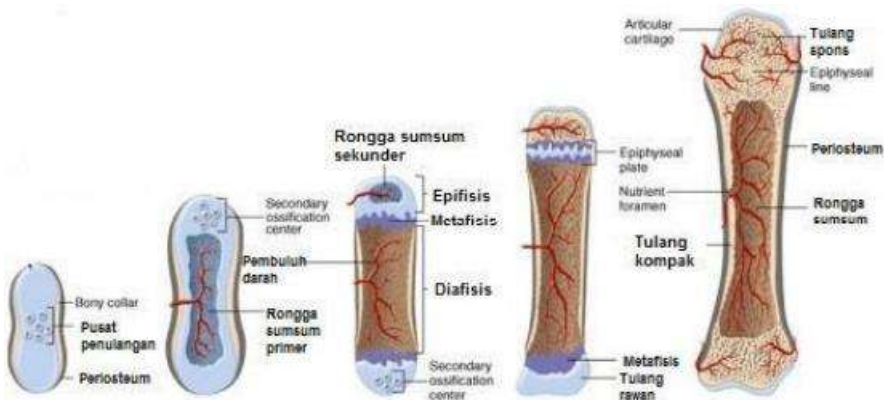
6.2.1 Fungsi dan Kegunaan Sistem Rangka

Lima fungsi utama sistem rangka manusia adalah :

1. Menopang/Menyelaraskan tubuh dengan menyediakan struktur yang mampu menopang seluruh tubuh. Tulang-tulang yang menyusun kerangka, secara individu atau kelompok, menyediakan titik perlekatan berbagai jaringan lunak dan organ.
2. Tempat penyimpanan kalsium dan lemak. Tulang mengandung banyak mineral berbeda seperti kalsium, kalium dan natrium. Kalsium (Ca^{2+}) merupakan mineral utama pembentuk tulang. Jika tubuh kekurangan kalsium, maka tubuh akan mengambilnya dari tulang dan jika terus berlanjut maka tulang bisa menjadi tipis, rapuh dan rentan patah. Selain sebagai cadangan mineral, kerangka juga menyimpan energi dalam bentuk lemak yang disimpan di sumsum tulang kuning.
3. Produksi sel darah. Sel darah merah, sel darah putih dan komponen darah lainnya yang diproduksi di sumsum tulang, terutama pada tulang pendek, tulang pipih, tulang tidak beraturan, jaringan spons (*spongy bone*) di ujung tulang pipa, tulang rusuk dan tulang dada.
4. Melindungi alat vital tubuh. Jaringan lunak dan organ tubuh dikelilingi dan dilindungi oleh rangka. Misalnya, tulang rusuk melindungi jantung dan paru-paru; tengkorak melindungi otak; tulang belakang melindungi sumsum tulang belakang; tulang gelang panggul melindungi sistem reproduksi dan pencernaan.
5. Alat gerak. Tulang berperan sebagai pengungkit ketika otot-otot yang menempel pada tulang berkontraksi sehingga menghasilkan gerakan terhadap sendi. Gerakan pada sendi ini mampu menggerakkan tubuh secara keseluruhan.

6.2.2 Perkembangan dan Pertumbuhan Tulang

Tulang pada bayi sebagian besar disusun oleh tulang rawan. Tulang rawan, sebagian besar terdiri atas kolagen, bersifat pejal dan lentur. Dengan tumbuhnya bayi, sel-sel tulang rawan digantikan dengan tulang keras yang memiliki struktur lingkaran Konsentris dari kalsium dan fosfat di antara sel-sel tulang. Proses perubahan dari tulang rawan ke sel tulang keras dinamakan penulangan (osifikasi). Proses penulangan berlanjut hingga remaja dan dewasa. Epifisis adalah area bagi pertumbuhan secara memanjang bagi tulang-tulang panjang sewaktu kanak-kanak. Pada masa pertumbuhan ini sel-sel pada epifisis membelah dan memanjangkan tulang. Ketika kita tumbuh, tulang bertambah keras dan bertambah berat, tetapi kelenturannya berkurang. Hal itu berarti tulang bertambah kuat tetapi mudah patah.



Gambar 6.1 Pembentukan Tulang Rawan

(Sumber: Syofyan, 2018)

Gambar 6.1 menampilkan proses perubahan tulang rawan menjadi tulang keras. Selama periode embrionik, semua tulang pipa pada awalnya berupa batang tulang rawan yang ditutupi oleh membran (perikondrium). Pusat tulang keras pertama yang disebut diafisis muncul di tengah jaringan yang nantinya akan menjadi tulang pipa. Kalsium disimpan dalam matriks dan sel-sel tulang yang sedang tumbuh. Perikondrium berubah menjadi periosteum, kemudian tulang tumbuh memanjang dan melingkar. Tulang yang tumbuh

memanjang kemudian menjadi dua bagian yaitu batang (diafisis) dan ujung (epifisis).

6.2.3 Struktur Tulang

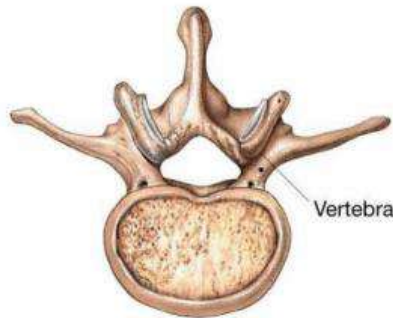
Penyusun utama tulang adalah sel tulang yang didalamnya banyak terdapat senyawa kapur dan fosfat . Senyawa ini juga yang membuat tulang menjadi keras. Macam-macam tulang berdasarkan bentuk tulang:

1. Tulang panjang atau tulang berbentuk pipa. Kelompok tulang ini biasanya lebih panjang, lebar, berbentuk silinder dan berfungsi seperti tuas. Tulang panjang terletak di lengan atas, lengan bawah, paha, betis, telapak kaki, jari tangan, dan ibu jari. Tulang paha adalah tulang terpanjang dan terberat di tubuh.
2. Tulang pendek berbentuk menyerupai kubus, seperti tulang pergelangan tangan dan pergelangan kaki, serta berperan sebagai transmisi gaya. Bentuk tulang ini sebagian besar terdiri dari jaringan tulang spons.
3. Tulang pipih. Tulang pipih ini tipis dan melengkung tersusun atas dua lapisan tulang kompak (tulang keras), di tengahnya terdapat lapisan tulang spons (Gambar 6.2). Tulang pipih membentuk atap pada tulang kepala dan juga terdapat pada tulang dada, tulang rusuk, dan tulang belikat. Tulang-tulang ini melindungi posisi jaringan lunak dan menyediakan permukaan untuk melekatnya otot rangka.



Gambar 6.2 Tulang Pipih
(Sumber: Syofyan, 2018)

4. Tulang Tidak Beraturan. Tulang jenis ini merupakan tulang yang tidak dapat dimasukkan menjadi salah satu dari tiga bentuk yang sudah disebutkan sebelumnya. Kelompok tulang ini mempunyai bentuk yang tidak beraturan (Gambar 6.3). Tulang-tulang ini berfungsi sebagai titik perlekatan otot atau persendian. Tulang belakang, panggul, dan beberapa tulang tengkorak tidak beraturan.



Gambar 6.3 Tulang Tidak Beraturan
(Sumber: Syofyan, 2018)

5. Tulang sesamoid (gambar 6.4) biasanya berukuran kecil, pipih dan berbentuk seperti biji wijen. Tulang-tulang ini tumbuh di dalam tendon dan otot, seringkali terletak di dekat persendian, misalnya di lutut, tangan, dan kaki.



Gambar 6.4 Tulang Sesamoid
(Sumber: Syofyan, 2018)

6. Tulang suutura atau tulang penyambung. Tulang suutura berukuran kecil, pipih dan bentuknya tidak beraturan. Tulang suutura terletak di antara tulang pipih tengkorak dan jumlah, bentuk, serta lokasinya tidak sama untuk masing - masing individu.

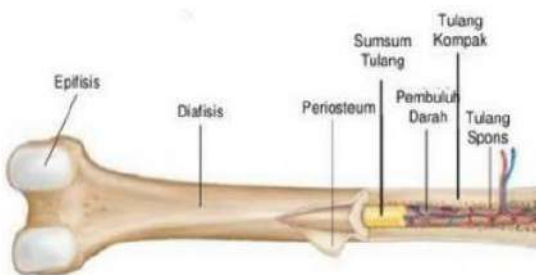
6.2.4 Macam- Macam Tulang Berdasarkan Bahan Penyusun Tulang

1. Tulang atau Osteon

Tulang terdiri atas hampir 50% air. Sekitar 33,5% adalah berbagai bahan mineral terutama garam kalsium dan sekitar 16,5% bahan seluler. Struktur kasar adalah struktur tulang yang dapat dilihat dengan mata telanjang.

a. Struktur Kasar

Setiap tulang mengandung dua bentuk jaringan tulang, yaitu (1) tulang kompak (padat) dan (2) tulang spons. Tulang padat tetap berada di permukaan tulang, membentuk lapisan pelindung yang kuat. Tulang spons terletak di dalam tulang. Gambar 6.5 menunjukkan anatomi tulang paha, tulang yang mewakili tulang panjang. Tulang panjang mempunyai batang berbentuk tabung (tube) yang disebut diafisis. Di ujung setiap tulang terdapat area melebar yang disebut epifisis. Diafisis terhubung ke setiap ujung tulang melalui area yang disebut metafisis.



Gambar 6.5 Struktur Tulang Panjang
(Sumber: Arsih, 2012)

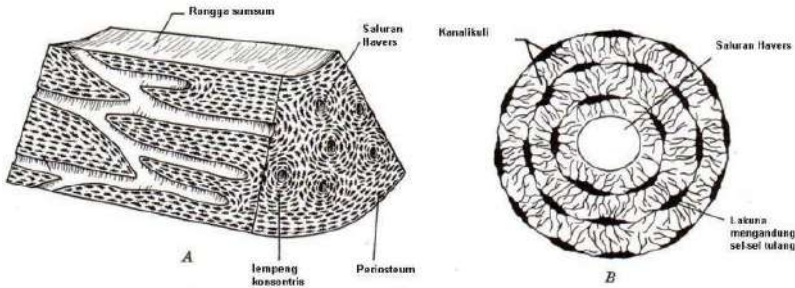
Dinding diafisis terdiri dari lapisan tulang keras dan mengelilingi ruang tengah yang disebut ruang sumsum. Epifisis terdiri dari tulang spons yang ditutupi oleh lapisan tipis yang disebut korteks (tulang keras). Sel tulang spons membentuk banyak rongga. Susunan struktur ini memberikan kekuatan yang diperlukan untuk menopang beban berat. Tulang spons berperan sebagai bantalan yang mampu meredam guncangan atau benturan.

Ruang sumsum diafisis, ruang antarepifisis dan lempeng epifisis mengandung sumsum tulang dan kandungan jaringan ikatnya sedikit. Diketahui ada dua jenis sumsum tulang: sumsum tulang kuning dan sumsum tulang merah. Sel lemak adalah komponen utama sumsum tulang kuning. Sumsum tulang merah terutama terdiri dari sel darah merah, sel darah putih, dan sel induk yang menghasilkan kedua jenis sel darah. Sumsum tulang kuning menyediakan cadangan energi penting dan juga dapat memproduksi sel darah dalam keadaan darurat, seperti setelah seseorang mengalami pendarahan.

b. Struktur Halus

Periosteum merupakan selaput yang menutupi dan melekat erat pada bagian luar tulang, kecuali sela-sela sendi yang ditutupi oleh tulang rawan. Pada periosteum terdapat banyak pembuluh darah. Pembuluh darah berasal dari cabang periosteal hingga ke tulang. Periosteum penting untuk penebalan tulang dan penyembuhan patah tulang (fraktura). Pada penampang tulang keras, terdapat bentuk yang terdiri dari lingkaran atau pelat konsentris. Di tengah setiap lingkaran terdapat kanal yang disebut kanal Havers. Pelat tulang atau lamela tulang tersusun konsentris di sekitar kanal Havers. Di antara lempengan-lempengan tersebut terdapat ruang-ruang kecil yang disebut lakuna. Lakuna tersebut berisi sel-sel tulang yang saling berhubungan dan juga dihubungkan dengan kanal Havers di tengahnya melalui saluran-saluran kecil yang disebut kanalikuli. Sistem Havers yang lengkap adalah sebagai berikut :

- 1) Kanal Havers, yang terletak menjadi pusat berisi serabut saraf, pembuluh darah, dan pembuluh limfe.
- 2) Lamela atau lempeng tulang yang tersusun melingkar
- 3) Lakuna yang mengandung sel tulang
- 4) Kanalikuli yang menyebar di antara lakuna dan menyatukannya dengan kanal Havers.



Gambar 6.6 Struktur Mikroskopik Tulang Kompak
(Sumber: Soewolo, 2000)

2. Matriks dan Sel Tulang

Tulang terdiri dari sel dan matriks. Matriks merupakan komponen jaringan ikat tak hidup yang terdiri dari anyaman serat yang tertanam pada bahan dasar yang homogen. Bahan dasar homogen ini ada yang berbentuk cair, ada yang berbentuk jeli atau bahkan padat. Matriks dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis :

- a. mineral, misalnya kalsium, fosfat, dan karbonat;
- b. semen, berasal dari molekul – molekul karbohidrat;
- c. kolagen yang berbentuk seperti serabut.

Ada tiga jenis sel tulang, yaitu:

- a. osteoblas, sel yang membangun dan memperbaiki tulang;
- b. osteosit, sel tulang yang matang atau siap digunakan; dan
- c. osteoklas, yaitu sel yang menghancurkan tulang.

Adanya tiga jenis sel tulang tersebut membuat tulang mampu terus beregenerasi dengan cara membangun, menggunakan dan menghancurkan ulang untuk mendaur ulang bahan – bahan pembentukkannya.

3. Tulang Rawan atau Kartilago

Tulang rawan terbuat dari bahan padat, bening, berwarna biru keputihan yang memiliki daya tahan kuat. Tulang ini dapat ditemukan di persendian dan di antara dua tulang. Tulang rawan tidak mengandung pembuluh darah tetapi dikelilingi oleh selaput yang disebut perikondrium. Selaput ini berfungsi sebagai tempat tulang rawan menerima darah. Tiga jenis utama tulang rawan :

- a. Tulang rawan hialin terbuat dari serat kolagen (serat yang terbuat dari protein mirip gelatin) yang tertanam dalam bahan matriks transparan dan elastis. Ditemukan menutupi ujung tulang pipa dan di tulang rusuk, hidung, laring, trakea dan bronkus.
- b. Tulang rawan fibrosa tersusun atas berkas-berkas serat dengan sel-sel tulang rawan yang tersusun diantara berkas-berkas serat tersebut, terletak pada lokasi yang memerlukan ketahanan tinggi. Tulang rawan ini ditemukan di rongga panggul dan tulang belikat. Serta tulang rawan penghubung, seperti pada cakram intervertebralis di tulang belakang dan sebagai bantalan pada tulang kemaluan.
- c. Tulang rawan yang mengandung serat elastis berwarna kuning biasa disebut dengan tulang rawan elastis. Ditemukan di daun telinga, epiglotis, dan tuba Eustachius. Jika ditekan atau ditekuk cepat kembali ke bentuk semula dan bersifat fleksibel.

6.2.5 Hubungan Antar Tulang (Persedian)

Tulang-tulang tubuh saling terhubung satu sama lain sehingga dapat menjalankan fungsinya dengan baik. Hubungan antar tulang disebut sendi (*joint*). Tergantung pada kebebasan bergerak yang diciptakan, ada tiga jenis sendi, yaitu sendi sintetis, sendi sintetis, dan sendi diartrosis.

1. Sendi Sinartosis adalah sendi yang tidak dapat digerakkan. Ada dua jenis utama sambungan pada sendi ini yaitu sutura dan sinkondrosis. Sendi ini disatukan oleh jaringan ikat fibrosa padat, misalnya pada tengkorak. Synchondrosis adalah sendi yang terbuat dari tulang rawan hialin, misalnya penghubung antara epifisis dan diafisis tulang dewasa.
2. Amphiarthrosis atau synfibrosis adalah persendian yang dihubungkan oleh tulang rawan, jaringan ikat fibrosa dan ligament yang memungkinkan adanya gerakan ringan. Misalnya saja persendian antara tulang betis dan tulang kering.
3. Diartrosis adalah persendian yang memungkinkan gerakan tulang - tulang secara bebas. Contoh sendi ini adalah sendi engsel pada lutut dan siku dan sendi peluru pada pangkal paha serta lengan atas.

Ujung tulang pembentuk sendi (diarthrosis) mempunyai ciri khas, membentuk sebuah bonggol, sedangkan ujung sisinya membentuk lengkungan yang sesuai dengan ukuran benjolan. Setiap permukaan sendi dilapisi dengan tulang rawan hialin dan ditutupi oleh membran sinovial yang membentuk minyak sinovial. Minyak sinovial atau minyak sendi mempunyai fungsi membuat gerakan menjadi lebih lancar.

6.3 Sistem Otot pada Manusia

Otot-otot merupakan alat gerak aktif. Otot mempunyai tiga kemampuan spesifik berikut.

1. Kemampuan untuk memendek (berkontraksi) disebut kontraktibilitas.
2. Kemampuan untuk melakukan gerakan kebalikan dari gerakan yang ditimbulkan saat kontraksi otot disebut ekstensibilitas.
3. Kemampuan untuk kembali ke ukuran semula setelah kontraksi atau ekstensi disebut elastisitas. Saat otot kembali ke ukuran semula, otot disebut dalam keadaan relaksasi.

Berdasarkan jenisnya, otot terbagi menjadi tiga macam, yaitu otot jantung, otot lurik, dan otot polos.

6.3.1 Jenis Otot Manusia

Otot manusia dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan penampakkannya:

1. Otot Lurik

Otot lurik atau disebut juga dengan otot rangka karena melekat pada rangka dan berfungsi menggerakkan rangka. Otot lurik tersusun atas serabut-serabut otot atau miofibril yang berinti banyak. Miofibril dalam plasma berwarna gelap dan terang, tersusun teratur, dan tampak bergaris sehingga disebut otot seran lintang atau otot lurik. Miofibril membentuk kumpulan serabut yang disebut otot atau daging. Tiap kumpulan serabut dilindungi oleh selaput yang disebut fasia propria, sedangkan otot atau daging dilindungi oleh selaput fasia superfisial. Biasanya gabungan otot berbentuk kumparan dengan bagian tengahnya menggelembung disebut empal atau ventrikel. Sementara itu, bagian tepi gabungan otot tersebut mengecil disebut urat otot atau tendon. Bagian empal dapat berkontraksi mengerut dan mengendur. Setiap otot memiliki dua buah tendon atau lebih. Tendon yang melekat pada tulang yang bergerak disebut insersio, sedangkan tendon yang melekat pada tulang yang tidak bergerak disebut origo. Otot lurik

disebut otot sadar karena bekerjanya dikendalikan oleh kehendak kita. Kontraksinya cepat, tidak teratur, dan mudah lelah. Otot lurik dapat bergerak karena rangsang berupa panas, dingin, arus listrik, dan rangsang kimia.

2. Otot Polos

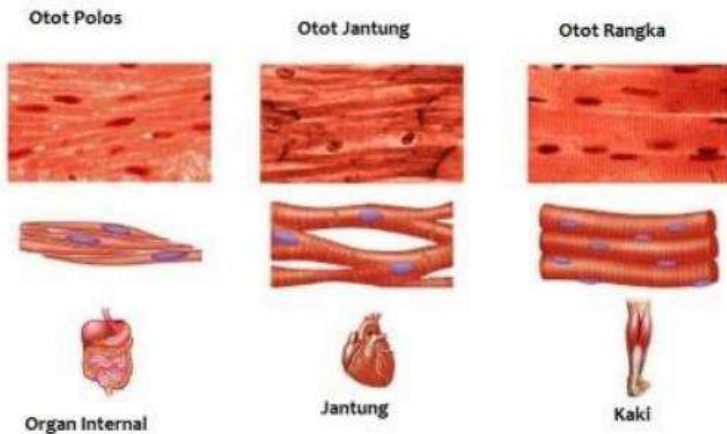
Sel-sel otot polos mempunyai bentuk seperti gelendong, berinti satu, dan terdapat di tengah. Miofibril berwarna polos (tidak berwarna gelap dan terang). Kerja otot polos adalah tidak sadar (tidak dipengaruhi kehendak), lambat, teratur, dan tidak mudah lelah. Otot polos terdapat pada dinding saluran pencernaan, saluran pernapasan, dan pembuluh darah sehingga sering disebut otot alat-alat dalam. Di bawah mikroskop otot polos tampak polos. Bekerjanya dibawah kesadaran kita, misalnya pada rahim, usus, pembuluh darah, dan saluran kelamin.

Gambar	Jenis Sendi	Contoh
 Sendi engsel	1. Sendi engsel adalah persendian yang memungkinkan terjadinya gerakan ke satu arah.	Persendian pada tulang siku dan lutut.
 Sendi pelana	2. Sendi pelana adalah persendian yang memungkinkan gerakan ke dua arah.	Persendian pada hubungan antara tulang ibu jari dan tulang telapak tangan.
 Sendi putar	3. Sendi putar adalah persendian tulang yang satu mengitari tulang yang lain sehingga menimbulkan gerak rotasi.	Tengkorak dengan tulang atlas dan radius dengan ulna.
 Sendi peluru	4. Sendi peluru adalah persendian tulang yang gerakannya paling bebas di antara persendian yang lain, yaitu dapat bergerak ke segala arah.	Tulang lengan atas dengan gelang bahu dan tulang paha dengan gelang panggul.
 Sendi geser	5. Sendi geser adalah persendian yang gerakannya hanya menggeser, kedua ujung agak rata dan tidak berporos. Sendi geser disebut juga sendi kepat atau sendi avoid.	Persendian pada hubungan antara ruas-ruas tulang belakang.
 Sendi loncur	6. Sendi loncur adalah persendian tulang yang memungkinkan terjadinya gerakan badan melengkung ke depan, ke belakang atau memutar.	Skapula dengan klavikula dan karpal dengan metakarpal.

Gambar 6.7 Jenis – jenis Sendi Diartosis
(Sumber : Campbell *et al.*, 2004)

3. Otot Jantung

Otot jantung hanya terdapat pada jantung. Otot ini secara anatomis mempunyai ciri seperti otot lurik, tetapi berinti banyak dan terletak di tengah. Otot jantung mempunyai cabang-cabang yang menghubungkan sel satu dengan sel-sel lain disebut **anastomosis**. Batas antarselnya tampak jelas dan disebut diskus **interkalaris**. Bekerjanya dibawah kesadaran kita, bentuknya bergaris melintang. Otot jantung hanya terdapat pada dinding jantung.



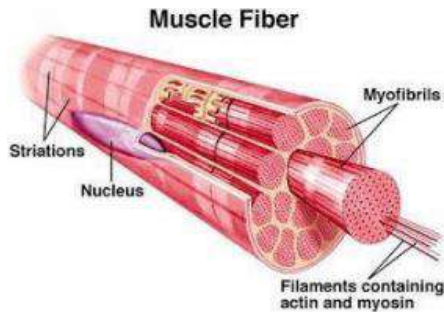
Gambar 6.8 Jenis-jenis Otot

(Sumber: Arsih, 2012)

6.3.2 Struktur Anatomi Otot

Setiap otot terdiri dari ratusan dan terkadang ribuan sel otot. Di dalam setiap sel otot terdapat struktur berserat yang tak terhitung jumlahnya yang disebut serabut otot atau myofibril. Pada setiap serabut otot terdapat banyak serabut tebal dan tipis yang tersusun sejajar. Setiap filamen tipis terbuat dari dua untai molekul yang dipilin menjadi satu. Molekul itu adalah molekul aktin berbentuk bola. Setiap filamen tebal terdiri dari kumpulan molekul miosin. Aktin dan miosin adalah protein yang membantu otot bergerak. Molekul miosin memiliki kepala yang membesar dan ekor

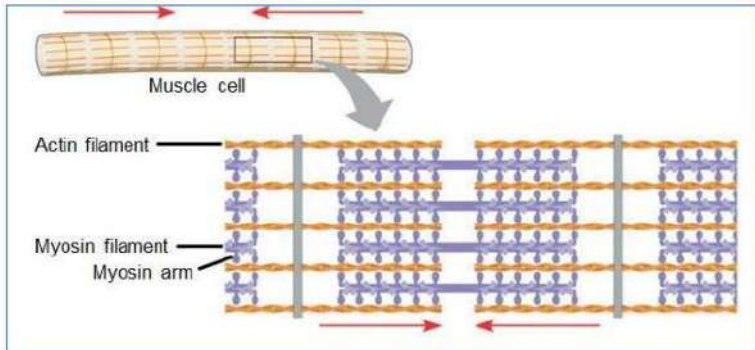
yang panjang. Molekul aktin dan miosin merupakan komponen pembentuk sarkomer.



Gambar 6.9 Struktur Otot
(Sumber: Campbell *et al.*, 2004)

6.3.3 Mekanisme Kontraksi Otot

Otot-otot di tubuh berkontraksi saat distimulasi. Kontraksi otot terjadi sebelum munculnya impuls saraf. Ribuan filamen aktin tersusun sejajar satu sama lain di sepanjang sel otot, diselingi dengan filamen lebih tebal yang terbuat dari protein yang disebut miosin. Kontraksi sel otot terjadi karena filamen aktin dan miosin saling bergeser sehingga menyebabkan sarkomer memendek. Dalam sel otot, filamen aktin berjalan sejajar dengan filamen miosin yang tebal. Miosin bertindak sebagai molekul motorik dengan menggunakan lengan yang “mendorong” dua jenis serat melewati satu sama lain. Koordinasi banyak serat otot yang bergeser ini memungkinkan seluruh sel otot memendek.



Gambar 6.10 Aktin dan Miosin dalam Sel Otot
(Sumber: Campbell *et al.*, 2004)

6.3.4 Cara Kerja Otot

1. Otot sinergis

Secara khusus hubungan antar otot mempunyai cara untuk saling menopang/bekerja sama/menyebabkan gerakan searah. Untuk memindahkan tulang dari satu posisi ke posisi lain lalu kembali ke posisi semula memerlukan setidaknya dua jenis otot dengan aksi berbeda. Misalnya: Semua otot pronator mengatur gerakan telapak tangan mengarah ke bawah dan seluruh otot supinasi mengontrol gerakan telapak tangan untuk mengarah keatas.

2. Otot antagonis

Otot antagonis adalah dua otot atau lebih yang mempunyai tujuan yang sama akan tetapi memiliki prinsip kerja berlawanan. Bisep dan trisep adalah contoh otot antagonis. Saat mengangkat lengan bawah, otot bisep akan berkontraksi dan trisep akan ekstensi. Untuk menurunkan lengan bawah, trisep berkontraksi dan lengan rileks.

6.4 Forum Diskusi

Diskusikan Bersama teman kelompokmu!

Apa yang membedakan tulang dan otot orang yang jarang olahraga dengan atlet olahraga aktif? Jelaskan berdasarkan pembentukan tulang dan cara kerja otot!

6.5 Uji Kompetensi

1. Apa yang mampu aktin dan myosin bekerja dengan lebih baik? Jelaskan!
2. Bagaimana cara menjaga tulang agar tidak terkena penyakit – penyakit tulang?

DAFTAR PUSTAKA

- Arsih, Fitri. 2012. Fisiologi Hewan. Padang : UNP Press.
- Campbell. 2004. Biologi Jilid 5. Jakarta : Erlangga.
- Soewolo. 2000. Pengantar Fisiologi Hewan. Malang : IKIP Malang.
- Purnamasari, Risa dan D. R. Santi. 2017. Fisiologi Hewan. Surabaya : UIN Sunan Ampel.
- Syofyan, Harlinda. 2018. Modul Biologi Dasar. Jakarta : Universitas Esa Unggul.
- Maulani, Arief H., 2019. Modul Belajar Mandiri. Jakarta : Pengembangan Keprofesian Guru.

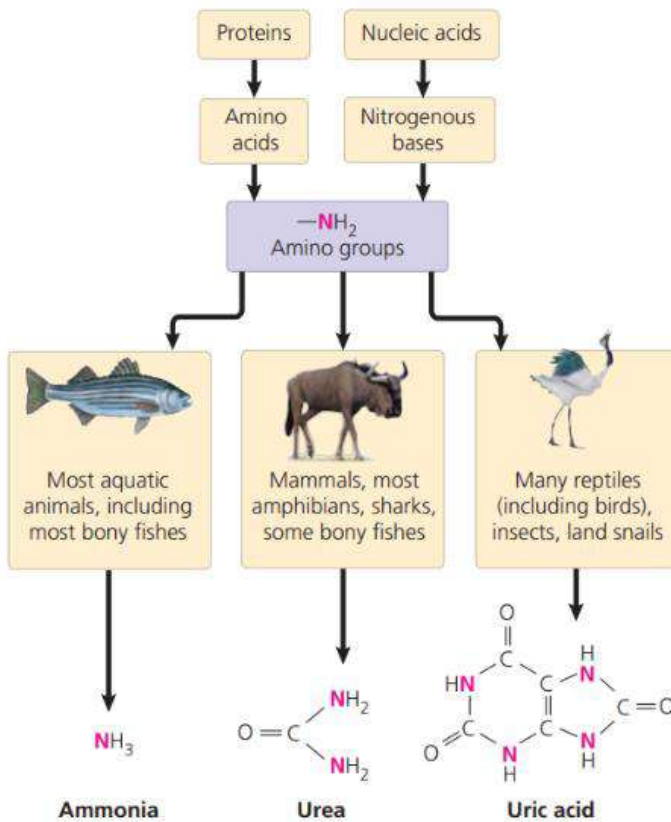
BAB 7

SISTEM EKSRESI DAN OSMOREGULASI

Oleh Wahyu Anggar Wanto

7.1 Pendahuluan

Ekskresi merupakan proses pengeluaran sisa metabolisme dari dalam tubuh. Kelebihan air, gas, garam, dan bahan organik (termasuk sisa metabolisme) perlu dikeluarkan, namun zat-zat yang diperlukan tubuh tetap disimpan. Bahan yang dilepaskan biasanya dalam bentuk larut dalam cairan dan dikeluarkan melalui filtrasi selektif. Alat-alat tubuh yang mempunyai fungsi ekskresi disebut sistem ekskresi. Sistem ekskresi merupakan sistem yang berfungsi untuk proses pembuangan produk sisa metabolisme yang tidak lagi digunakan oleh tubuh seperti CO_2 , H_2O , NH_3 , bilirubin dan asam urat. Metabolit yang tidak dibutuhkan tubuh akan dikeluarkan melalui sistem ekskresi. Cara ekskresi organisme hidup berbeda-beda. Semakin tinggi tingkat organisme hidup, semakin kompleks organ ekskresinya.



Gambar 7.1 Bentuk – Bentuk Ekskresi Nitrogen
(Sumber: Campbell et al., 2004)

Kemampuan mengatur keseimbangan air dan ion dalam suatu lingkungan dengan mengendalikan tekanan osmotik biasa disebut dengan regulasi osmotik (osmoregulasi). Osmoregulasi diperlukan karena perbedaan konsentrasi cairan tubuh dan lingkungan. Sel yang menerima terlalu banyak air akan mengalami lisis dan sebaliknya jika kekurangan air maka sel akan mengecil dan mati. Regulasi osmotik juga mempunyai efek menghilangkan zat-zat yang tidak diperlukan oleh sel atau organisme hidup.

7.2 Ekskresi Hewan Darat dan Akuatik

7.2.1 Ekskresi Hewan Darat

Salah satu hewan darat yaitu mamalia darat. Pada mamalia darat, paru-paru adalah satu-satunya organ yang mengeluarkan CO₂. Air yang dikeluarkan oleh paru-paru berasal dari aktivitas metabolisme, yaitu produk limbah dari proses pernafasan. Hati merupakan salah satu organ tubuh yang memiliki banyak peran penting. Hati melakukan dua peran penting: menyimpan zat makanan dan memecah serta menghilangkan produk limbah yang tidak dibutuhkan tubuh. Peran hati yang paling penting sebagai organ ekskresi adalah pembentukan zat buangan bernitrogen dengan jalan deaminasi asam amino.

Organ utama mamalia yang bertanggung jawab untuk proses ekskresi adalah ginjalnya, tempat produk sisa metabolisme yang mengandung zat nitrogen, seperti amonia, dikeluarkan. Melalui proses deaminasi atau proses pembusukan mikroba, asam amino diproduksi dan diubah menjadi amonia di usus. Ginjal bertanggung jawab untuk mengeluarkan zat dalam jumlah berlebihan, seperti vitamin yang larut dalam air, menahan cairan ekstraseluler dengan menghilangkan kelebihan air, dan menjaga keseimbangan asam dan basa. Sekresi dari ginjal berupa urine.

7.2.2 Ekskresi Hewan Akuatik

Ikan memiliki sistem ekskresi berupa ginjal dan lubang yang disebut urogenital. Terletak di belakang anus, lubang urogenital merupakan sebuah lubang yang menghubungkan ginjal dan rahim. Ginjal ikan yang hidup di air tawar dilengkapi dengan glomeruli yang lebih banyak. Sementara itu, sisa metabolisme disaring secara perlahan oleh ikan yang menghuni air laut karena jumlah glomerulinya yang terbatas.

7.3 Organ Ekskresi Pada Hewan

7.3.1 Sistem Ekskresi Pada Hewan Invertebrata

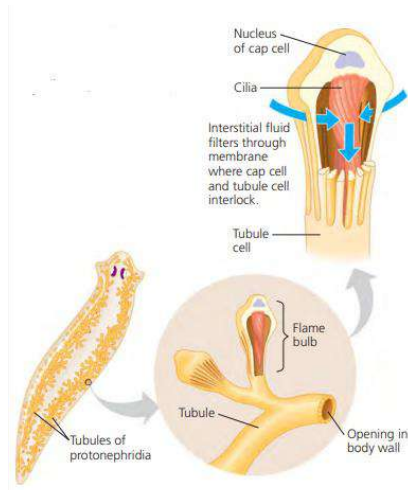
Sistem ekskresi pada hewan tanpa tulang belakang (invertebrata) lebih sederhana dibandingkan hewan bertulang belakang (vertebrata). Sistem ekskresi beberapa hewan invertebrata adalah :

1. Organ Sistem Ekskresi Makhluk Hidup Satu Sel (Protozoa).

Organisme uniseluler mengeluarkan sisa metabolismenya melalui difusi. Karbondioksida (CO_2) dari respirasi sel dilepaskan melalui difusi. Selain itu, cara lain untuk melakukan ekskresi yaitu dengan membentuk vakuola yang berisi hasil sisa metabolisme. Organisme sel tunggal membentuk vakuola yang menyimpan sisa metabolisme dan kemudian mengeluarkannya dari sel.

2. Organ Sistem Ekskresi Planaria

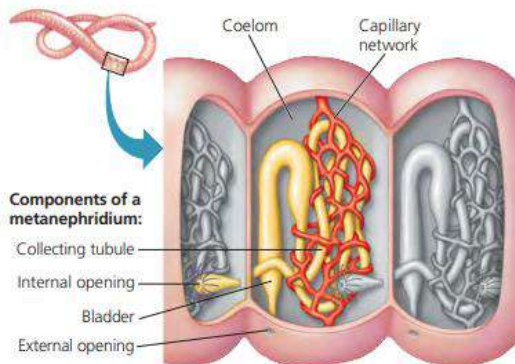
Pada cacing pipih atau planaria, alat ekskresinya relatif sederhana. Organ ekskresi pada planaria berupa jaringan menyerupai pipa yang bercabang-cabang, organ tersebut bernama protonefridia. Pipa-pipa ini dikenal sebagai nephridiophores. Bagian terminal cabang nephridiophore dikenal sebagai sel api. Dinamakan demikian karena ujung sel terus bergerak untuk menyerap dan menyaring sisa metabolisme sel di sekitarnya. Kemudian bersirkulasi melalui sel nephridiophores ke pembuluh ekskretoris.



Gambar 7.2 Protonefridia pada Planaria
(Sumber: Campbell *et al.*, 2004)

3. Organ Sistem Ekskresi Cacing Tanah dan Beberapa Invertebrata lainnya

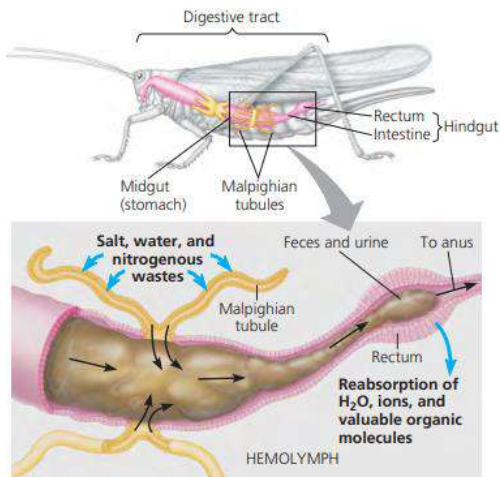
Cacing tanah, moluska, dan beberapa invertebrata lainnya memiliki struktur ginjal sederhana yang disebut nefridia. Strukturnya terdapat di setiap ruas tubuhnya. Di dalam cairan tubuh cacing tanah yang mengisi rongga tubuhnya terdapat sisa metabolisme dan nutrisi. Cairan ini disaring melalui ujung tabung berbentuk corong bersilia yang disebut nefrostoma. Dari tubulus nefrostoma, hasil saring kemudian dialirkan melalui tabung sederhana yang juga dilapisi kapiler darah. Di tubulus ini terjadi reabsorpsi zat-zat penting seperti garam dan nutrisi terlarut. Air dan kotoran ditampung dalam saluran pengumpul, suatu wadah yang merupakan bagian dari nefridia, kemudian dikeluarkan melalui lubang ekskretoris pada dinding tubuh yang biasa disebut nephridiophore.



Gambar 7.3 Metanefridia pada Cacing Tanah
(Sumber: Campbell *et al.*, 2004)

4. Organ Sistem Ekskresi Serangga

Alat ekskresi serangga seperti belalang adalah saluran Malpighi. Tubulus Malpighi tampak seperti untaian buluh tipis yang menempel di ujung usus belakang belalang dan berwarna kekuningan. Limbah dikeluarkan dari cairan tubuh (hemolimfa) melalui saluran Malpighi yang terletak di ujungnya. Cairan tersebut kemudian masuk ke usus bagian proksimal dan dikeluarkan melalui feses dalam bentuk kristal asam urat.



Gambar 7.4 Badan Malphigi Serangga
(Sumber: Campbell *et al.*, 2004)

7.3.2 Sistem Ekskresi Pada Hewan Vertebrata

Pada hewan vertebrata terdapat beberapa jenis ginjal. Beberapa jenis tersebut adalah pronefros, mesonefros dan metanefros. Pronefros adalah jenis ginjal yang berkembang selama tahap embrio atau larva. Pada tahap selanjutnya, ginjal pronefros digantikan oleh ginjal mesonefros. Seiring bertambahnya usia hewan, ginjal mesonefrik digantikan oleh ginjal metanefros. Pada mamalia, reptil dan burung, tipe ginjalnya adalah mesonefros. Namun setelah dewasa, mesonefros akan digantikan oleh metanefros.

1. Organ Sistem Ekskresi Pisces (Ikan)

Ginjal ikan berjumlah sepasang dan bertipe mesonefros. Setelah mencapai tahap dewasa, mesonefros akan berubah menjadi ginjal opisthonefros. Tubulus ginjal ikan juga dimodifikasi menjadi saluran yang mengangkut sperma (vas deferens) ke kloaka. Ikan mempunyai bentuk ginjal yang berbeda-beda, sebagai bentuk adaptasi terhadap lingkungannya. Pada ikan air tawar, kondisi lingkungan yang hipotonik membuat jaringan ikan sangat sensitif terhadap kelebihan cairan.

Ginjal ikan air tawar memiliki struktur yang mirip dengan manusia. Filtrasi dan reabsorpsi juga terdapat pada ginjal ikan. Mineral dan zat makanan diserap dalam jumlah besar, sedangkan air hanya diserap sedikit. Dengan minum sedikit dan mengeluarkan banyak urin, ikan air tawar menjaga jaringan tubuh dalam keadaan hipertonic. Amonia dikeluarkan melalui difusi melalui insang.

Jenis ikan yang hidup di air laut mempunyai adaptasi yang berbeda-beda. Ikan air asin mudah mengalami dehidrasi karena air dalam tubuhnya cenderung mengalir ke lingkungan sekitarnya melalui insang, mengikuti perbedaan tekanan osmotik. Ikan air asin tidak memiliki glomeruli sehingga mekanisme filtrasi tidak terjadi dan proses reabsorpsi ke dalam tubulus ginjal juga berlangsung dalam skala kecil. Akibatnya, ikan air asin beradaptasi dengan banyak meminum air laut, desalinasi (menghilangkan garam dengan mengeluarkan garam melalui

insang), dan memproduksi lebih sedikit urin. Urine yang dikeluarkan akan dikeluarkan melalui lubang di dekat anus. Hal ini berbeda dengan ekskresi urin pada ikan Chondrichthyes, seperti hiu. Hiu mengeluarkan urin ke seluruh permukaan kulit.

2. Organ Sistem Ekskresi Amphibi (Katak)

Opisthonefros adalah jenis ginjal spesifik yang ditemukan di Amphibia. Ginjal dan saluran reproduksi katak jantan menyatu dan berakhir di kloaka. Namun, tidak demikian halnya dengan katak betina. Ginjal katak, seperti halnya ikan, juga merupakan organ yang sangat penting dalam mengatur jumlah air dalam tubuh. Karena kulitnya yang tipis, amfibi mungkin mengalami penipisan cairan jika terus berada di darat dalam waktu lama. Hal ini juga berlaku jika katak terlalu lama berada di air tawar. Air menembus dengan sangat mudah ke dalam jaringan tubuh melalui kulit.

Katak dapat mengatur laju filtrasi dengan bantuan hormon, sesuai dengan kondisi air di sekitarnya. Ketika berada dalam air dengan jangka waktu yang lama, katak mengeluarkan urine dalam volume yang besar. Namun, kandung kemih katak dapat dengan mudah terisi air. Air tersebut dapat diserap oleh dinding kandung kemihnya sebagai cadangan air ketika katak berada di darat untuk waktu yang lama.



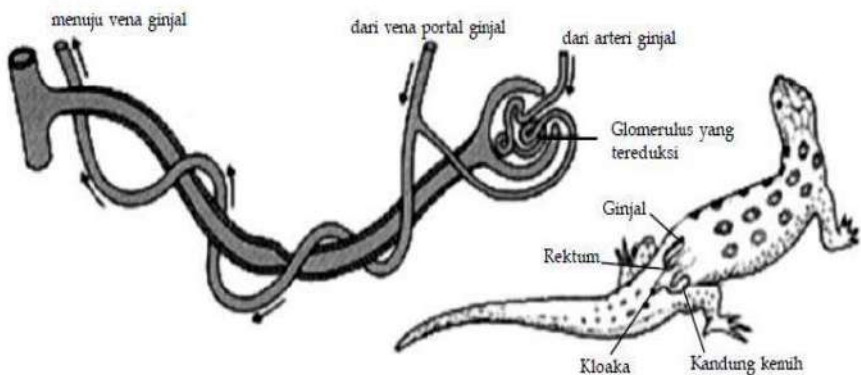
Gambar 7.5 Sistem Eksresi Amfibi

(Sumber: Purnamasari dan Santi, 2017)

3. Organ Sistem Ekskresi Reptilia

Ginjal reptilia dikategorikan sebagai metanefros. Ketika reptilia masih dalam tahap embrio, ginjal mereka biasanya bertipe pronefros, namun ketika mereka tumbuh dewasa akan menjadi bentuk mesonefros dan akhirnya menjadi ginjal metanefros. Asam urat merupakan hasil ekskresi reptil. Asam urat ini tidak terlalu toksik jika dibandingkan dengan amonia yang dihasilkan oleh Mammalia. Asam urat dalam jumlah besar dapat dikeluarkan tanpa memerlukan air. Asam urat dikeluarkan ditandai dengan warna putih pada feses.

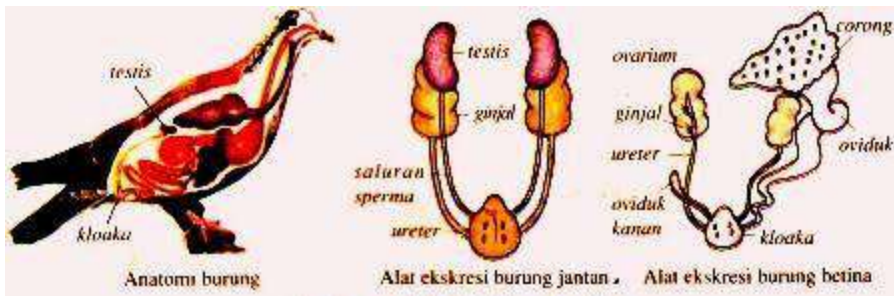
Reptil tertentu menghasilkan amonia melalui sistem reproduksinya. Misalnya, pada buaya dan kura-kura. Penyu yang hidup di lautan memiliki kelenjar ekskresi untuk mengeluarkan garam yang dikandung dalam tubuhnya. Muara kelenjar ini adalah di dekat mata. Hasil ekskresinya berupa air yang mengandung garam. Saat penyu bertelur, orang sering melihatnya menitikkan air mata. Namun yang kita lihat sebenarnya adalah hasil ekskresi garam. Ular, buaya dan aligator tidak memiliki kantung kemih, sehingga asam urat yang diproduksi oleh ginjal keluar bersama feses melalui kloaka.



Gambar 7.6 Sistem Ekskresi Reptil
(Sumber: Purnamasari dan Santi, 2017)

4. Organ Sistem Ekskresi Aves

Burung mempunyai ginjal tipe metanefros. Burung tidak memiliki kandung kemih, sehingga urin dan fesesnya bercampur dan keluar melalui kloaka. Urine burung dikeluarkan dengan berbentuk senyawa asam urat. Metabolisme burung sangat cepat. Oleh karena itu, sistem ekskresi juga harus berlangsung dengan kecepatan tinggi. Peningkatan efisiensi ini terlihat dari jumlah nefron pada ginjal burung. Dalam 1 mm³ ginjal burung terdapat 100 hingga 500 nefron. Jumlah ini hampir 100 kali lebih besar dibandingkan jumlah nefron pada manusia. Beberapa burung laut juga memiliki kelenjar ekskresi garam yang terbuka di ujung matanya. Hal ini untuk mengimbangi pola makannya yang berupa ikan laut dengan kandungan garam tinggi.



Gambar 7.7 Sistem Ekskresi Burung

(Sumber: Purnamasari dan Santi, 2017)

7.4 Sistem Ekskresi Pada Manusia

Sistem ekskresi bertanggung jawab untuk menghilangkan sisa metabolisme dari tubuh, termasuk pernafasan CO₂, berkeringat, dan pembuangan urin. Sistem ekskresi membantu menjaga homeostatis melalui tiga cara, yaitu pengaturan osmotik, pembuangan sisa metabolisme dan pengaturan konsentrasi sebagian besar komponen cairan tubuh. Limbah metabolisme merupakan hasil pemecahan zat makanan dengan molekul kompleks sehingga tidak berguna lagi bagi tubuh. Limbah metabolik meliputi CO₂, H₂O, NHS, pewarna empedu dan asam urat. Metabolit yang tidak dibutuhkan tubuh akan dikeluarkan

melalui sistem ekskresi. Alat ekskresi makhluk hidup sangat beragam: semakin tinggi tingkat organisme, semakin kompleks alat ekskresinya. Istilah lain dalam sistem ekskresi manusia adalah :

1. Defekasi : proses mengeluarkan sisa-sisa makanan yang telah dicerna yang disebut feses. Zat yang dilepaskan tidak pernah mengalami metabolisme di jaringan. Zat yang dikeluarkan antara lain zat yang tidak terserap oleh sel epitel usus.
2. Ekskresi merupakan proses pembuangan produk sisa metabolisme yang sudah tidak berguna lagi bagi tubuh.
3. sekresi yaitu pengeluaran getah oleh kelenjar pencernaan ke dalam saluran pencernaan. Getah ini biasanya merupakan sejenis enzim dan memiliki fungsi penting dalam tubuh.
4. Eliminasi adalah proses mengeluarkan zat baik dari rongga kecil maupun besar yang terdapat di dalam tubuh.

Fungsi sistem ekskresi pada manusia antara lain:

1. Mengeluarkan racun dan zat sisa yang tidak diperlukan dalam tubuh
2. Mengontrol kuantitas dan konsentrasi cairan tubuh (osmoregulasi)
3. Menjaga suhu tubuh dalam batas normal (pengkondisian udara)
4. Menstabilkan homeostatis

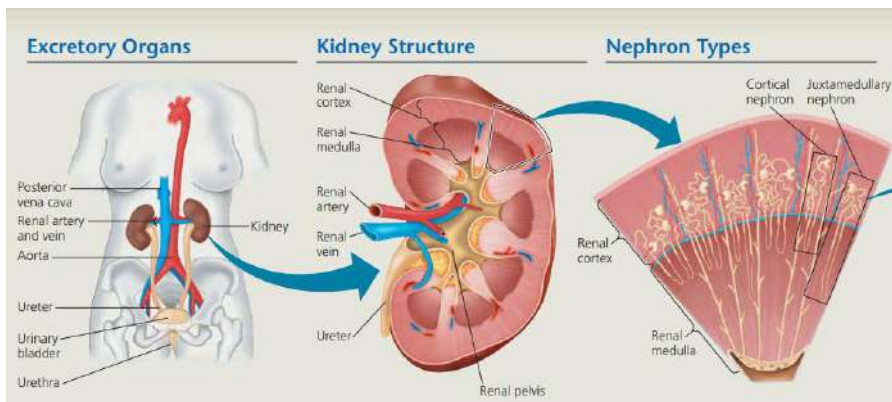
7.4.1 Ginjal

7.4.1.1 Struktur Ginjal

Jalur ekskresi utama pada manusia adalah ginjal. Ginjal manusia disebut juga ginjal, berbentuk seperti kacang, berwarna ungu dan terdiri dari dua jenis. Berat kedua ginjal orang dewasa adalah 120 hingga 150 gram. Manusia mempunyai sepasang ginjal yang terletak di belakang lambung atau abdomen. Di bagian superior (atas) ginjal terdapat kelenjar disebut juga kelenjar adrenal.

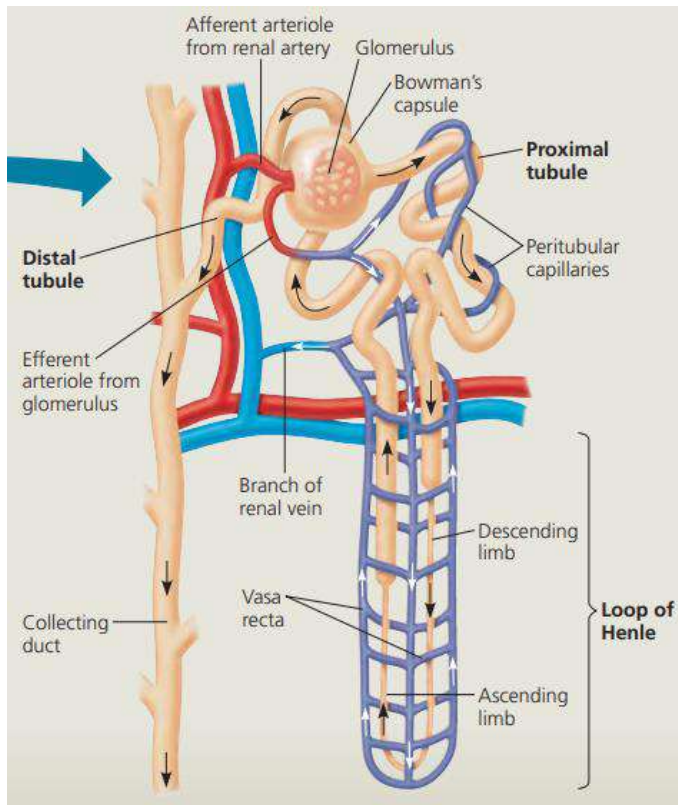
Bagian atas ginjal dilindungi oleh tulang rusuk kesebelas dan kedua belas. Kedua ginjal ditutupi oleh dua lapisan lemak (lemak perirenal dan lemak pararenal) yang membantu menyerap guncangan.

Pada kulit ginjal (korteks) terdapat alat filtrasi darah yang disebut nefron. Glomerulus adalah jaringan kapiler darah, sedangkan lengkung Bowman adalah mangkuk berdinding tebal yang mengelilingi glomerulus. Saluran (tabung) melengkung panjang dikelilingi oleh pembuluh darah. Tubulus yang terletak di dekat badan Malpighi disebut tubulus proksimal. Tubulus yang terletak jauh dari badan Malpighi disebut tubulus distal. Tubulus kontortus proksimal dan distal dihubungkan oleh lengkung Henle. Tempat lewatnya lengkung Henle melalui arteri aferen disebut aparatus paraglomerulus, yang berisi sel makula dan sel paraglomerulus. Sel juxta glomerulus adalah tempat sintesis dan sekresi renin. Cairan menjadi lebih kental di sepanjang saluran dan saluran membentuk urin, yang kemudian dibawa ke kandung kemih melalui ureter. Lengkung Henle adalah pembuluh darah seperti angsa yang berjalan turun ke medula ginjal dan kemudian naik ke korteks ginjal.



Gambar 7.8 Struktur Utama Ginjal
(Sumber: Campbell *et al.*, 2004)

Bagian akhir dari tubulus ginjal adalah saluran (tubulus) pengumpul yang terletak pada sumsum ginjal. Bagian paling luar dari ginjal disebut korteks, bagian lebih dalam lagi disebut medulla (sumsum ginjal). Bagian paling dalam disebut pelvis (rongga ginjal), pada bagian medulla ginjal manusia dapat pula dilihat adanya piramida yang merupakan bukan saluran pengumpul. Ginjal dibungkus oleh lapisan jaringan ikat longgar yang disebut kapsula. Sebuah nefron terdiri dari sebuah komponen penyaring yang disebut korpuskula (atau badan malpighi) yang dilanjutkan oleh saluran-saluran (*tubulus*).



Gambar 7.9 Nefron pada Ginjal
(Sumber: Campbell *et al.*, 2004)

Setiap sel darah mengandung kapiler darah spiral yang disebut glomeruli yang ditemukan di kapsul Bowman. Setiap glomerulus menerima aliran darah dari arteri aferen. Dinding kapiler glomerulus memiliki pori-pori untuk filtrasi. Darah dapat disaring melalui dinding epitel glomerulus dan kapsul Bowman yang tipis dan kenyal, karena tekanan darah yang mendorong plasma filtrat yang dihasilkan akan masuk ke tubulus ginjal. Darah yang disaring meninggalkan ginjal melalui arteri. Antara darah di glomerulus dan kompartemen cairan di kapsul Bowman terdapat tiga lapisan: a. kapiler yang dilapisi oleh sel endotel di glomerulus b. Lapisan membran basal yang kaya protein c. lapisan sel epitel yang melapisi dinding kapsul Bowman (podosit). Darah manusia melewati ginjal 350 kali sehari dengan kecepatan 1,2 liter per menit, menghasilkan 125 cc filtrat glomerulus per menit. Laju filtrasi glomerulus ini digunakan untuk tes diagnostik fungsi ginjal.

7.4.1.2 Fungsi Ginjal

- a. Membersihkan darah dan menghilangkan sisa metabolisme dari tubuh.
- b. Ekskresi zat yang terlalu banyak
- c. Elektrolit tertentu mengalami reabsorpsi oleh tubulus ginjal.
- d. Menjaga keseimbangan asam dan basa dalam tubuh manusia.
- e. Produksi hormon yang berperan dalam pembentukan dan pematangan sel darah merah di sumsum tulang

7.4.1.3 Kerja Ginjal

- a. Pembentukan urin difasilitasi oleh ginjal melalui tiga mekanisme utama: penyaringan, reabsorpsi, dan pengumpulan urin.

1) Filtrasi (penyaringan)

Proses pembentukan urin diawali dengan penyaringan darah, yang terjadi pada kapiler glomerulus. Adanya permeabilitas glomerulus, tekanan tinggi, dan sel kapiler globular berpori (podosit) memudahkan filtrasi. Filtrat

glomerulus, juga dikenal sebagai urin primer, diproduksi melalui filtrasi dan mengandung asam amino, glukosa, natrium, kalium, dan garam lainnya.

2) Reabsorpsi (penyerapan kembali)

Zat-zat yang diperlukan dalam urin mula-mula akan diserap kembali di tubulus proksimal, sedangkan di tubulus distal, produk sisa dan urea akan diisi kembali. Zat ini diserap oleh tubulus ginjal melalui dua cara. Gula dan asam amino diserap melalui difusi, sedangkan air diserap melalui osmosis. Setelah reabsorpsi, tubulus ginjal akan menghasilkan urin sekunder, zat-zat yang diperlukan tidak lagi ditemukan. Di sisi lain, konsentrasi zat sisa metabolisme beracun, misalnya urea, ammonia dan asam urat meningkat.

3) Augmentasi (penambahan)

Augmentasi adalah proses pengisian atau penambahan kembali limbah dan urea yang mulai terjadi di tubulus distal. Dari tubulus ginjal, urin akan masuk ke rongga ginjal dan selanjutnya menuju kandung kemih (vesika urinaria) melalui ureter. Urin akan mengalir keluar melalui uretra.

b. Komposisi urin normal mengandung komponen sebagai berikut: air, urea dan ammonia yang merupakan sisa pemecahan protein dan garam mineral terutama garam meja (NaCl). Pewarna empedu (bilirubin) membuat urin menjadi kuning. Kelebihan zat dalam darah seperti vitamin D, vitamin C, obat-obatan dan hormon juga bisa ditemukan pada urin normal.

c. Faktor yang mempengaruhi produksi urin berasal dari faktor internal dan eksternal yang bersangkutan, antara lain hormon antidiuretik (ADH), hormon insulin, asupan air, dan faktor cuaca.

7.5 Sistem Osmoregulasi Pada Hewan

7.5.1 Sistem Osmoregulasi Pada Hewan Invertebrata

Secara umum, organ osmoregulasi invertebrata pada dasarnya menggunakan mekanisme filtrasi, reabsorpsi, dan ekskresi yang sama seperti ginjal vertebrata untuk menghasilkan urin encer dari cairan tubuh mereka.

1. Osmoregulasi Pada Serangga

Dehidrasi pada serangga terjadi terutama melalui penguapan. Serangga memiliki rasio luas permukaan tubuh/massa tubuh 50 kali lebih besar, dibandingkan mamalia yang hanya memiliki separuh rasio luas permukaan tubuh/massa tubuh. Mekanisme utama dehidrasi pada serangga adalah spirochetes. Untuk mengurangi kehilangan air dari tubuh, sebagian besar serangga akan menutup kepala spirochetes di sela-sela gerakan pernapasan. Cara lain untuk mengatasinya adalah dengan meningkatkan ketahanan kulit terhadap air, antara lain dengan membuat kutikula lilin yang sangat anti air, sehingga serangga hanya kehilangan sedikit air melalui kulit. Sebagai alat ekskresi, serangga memiliki tubuh berbentuk sisik, yang bersama-sama dengan saluran pencernaan bagian belakang membentuk sistem ekskresi osmoregulasi.

2. Osmoregulasi pada Annelida

Cacing tanah seperti *Lumbricus terrestris* merupakan pengatur osmotik yang efektif. Hewan ini aktif menyerap ion. Urine yang dihasilkannya encer, pada dasarnya hipoosmotik, mendekati tingkat isoosmotik darah. Diduga konsentrasi urin diatur oleh kebutuhan air tubuh. Pengaturan homeostatis juga dilakukan melalui metode perilaku, khususnya aktif pada malam hari dan menggali lebih dalam pada tanah saat permukaan tanah kering.

3. Osmoregulasi pada Molusca

Tubuh bekicot memiliki permukaan berdaging yang sangat permeabel terhadap air. Jika dikeluarkan dari cangkangnya, airnya akan hilang secepat air menguap dari permukaan tubuh. Semua spesies bekicot bernafas terutama menggunakan paru-paru yang terbentuk dari mantel tubuhnya dan dibuka melalui lubang kecil. Ketahanan air yang sangat tinggi. Tekanan osmotik cairan internal sangat bervariasi tergantung pada kadar air lingkungan. Untuk menghindari kehilangan air yang terlalu banyak, bekicot lebih aktif pada malam hari, dan jika kondisi semakin kering, bekicot akan bersembunyi dengan cara mengubur dirinya di dalam tanah dan menutupi cangkangnya dengan sejenis penutup yang terbuat dari lendir yang dikeluarkannya. Banyak spesies siput menyimpan air di rongga mantelnya, tampaknya untuk digunakan di lingkungan kering.

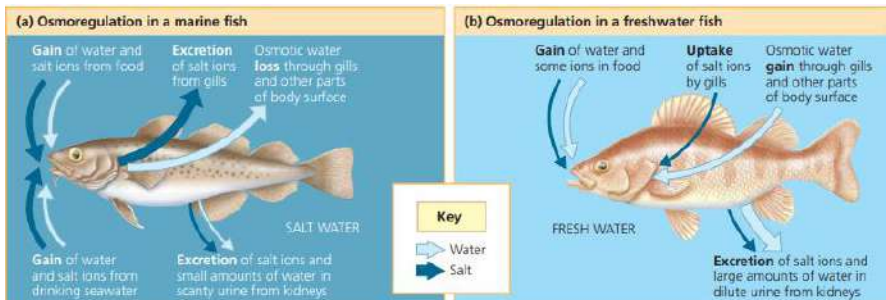
7.5.2 Sistem osmoregulasi pada hewan Vertebrata

1. Osmoregulasi pada ikan

Ikan yang hidup di air tawar mempunyai cairan tubuh yang sangat permeabel terhadap lingkungan, sehingga air cenderung menembus tubuhnya dengan cara berdifusi melalui permukaan tubuh yang semi permeabel. Jika hal ini tidak terkontrol atau seimbang akan mengakibatkan hilangnya garam tubuh dan pengenceran cairan tubuh, sehingga cairan tubuh tidak mampu lagi mendukung fungsi fisiologis normal. Ginjal memompa kelebihan air sebagai urin. Ginjal memiliki sejumlah besar glomeruli berdiameter besar. Hal ini untuk mencegah garam keluar dari tubuh dengan lebih baik, sekaligus memompa urin sebanyak mungkin.

Ikan laut hidup di lingkungan yang hipertonik terhadap jaringan dan cairan tubuh, sehingga cenderung kehilangan air melalui kulit, insang, dan menyerap garam. Untuk mengatasi dehidrasi, ikan “minum” air laut sebanyak-banyaknya. Artinya, kandungan garam dalam cairan tubuh akan meningkat. Meskipun proses ini menghindari dehidrasi, kelebihan garam harus dihilangkan. Karena ikan laut terpaksa menahan air dalam

kondisi osmotik, keluaran uratnya lebih rendah dibandingkan ikan air tawar. Tubulus ginjal dapat bertindak sebagai reservoir (penyimpanan) air. Jumlah glomeruli pada ikan laut cenderung lebih sedikit dan bentuknya juga lebih kecil dibandingkan ikan air tawar.



Gambar 7.10 Osmoregulasi pada Ikan Air Laut dan Air Tawar
(Sumber: Campbell et al., 2004)

2. Osmoregulasi pada Reptilia

Reptil, termasuk ular, buaya, dan penyu, memiliki kulit tipis dan bersisik. Kondisi kulit kering dan bersisik ini menjadi cara yang baik untuk beradaptasi dengan kehidupan di darat, terutama untuk menghindari dehidrasi. Untuk lebih menghemat air, hewan ini mengeluarkan limbah nitrogen dalam bentuk asam urat, yang ekskresinya hanya membutuhkan sedikit air. Selain itu, reptil juga menghemat air dengan mengeluarkan kotorannya yang kering. Faktanya, ketika dehidrasi, kadal dan kura-kura dapat memanfaatkan urin encer yang diproduksi dan disimpan di kandung kemih dengan cara menyerapnya kembali.

3. Osmoregulasi pada Aves

Pada burung, pengaturan keseimbangan air berkaitan erat dengan proses menjaga suhu tubuh. Burung yang hidup di daerah pesisir dan mencari makan di laut (*seabirds*) menghadapi permasalahan berupa konsumsi garam yang berlebihan. Artinya burung harus berusaha menghilangkan kelebihan garam dari tubuhnya. Burung mengeluarkan kelebihan garam melalui

kelenjar garam, yang terletak di cekungan dangkal di bagian atas kepala, di atas setiap mata, dekat hidung. Jika burung laut mempunyai kelebihan garam dalam tubuhnya, maka ia akan mengeluarkan cairan pekat yang banyak mengandung NaCl. Kelenjar garam ini hanya bekerja bila tubuh burung sudah jenuh dengan garam.

4. Osmoregulasi pada Mammalia

Pada mamalia, kehilangan air dan garam bisa terjadi melalui keringat. Sedangkan cara mereka mendapatkan air sama dengan hewan vertebrata lainnya, yakni minum air dan mencari makan. Namun bagi mamalia gurun, air tidak bisa diperoleh dengan minum, misalnya Unta. Unta tidak minum air tetapi dapat bertahan hidup dengan metabolisme air yang dihasilkan dari oksidasi glukosa.

7.6 Forum Diskusi

Diskusikan Bersama teman kelompokmu!

Mengapa jika kita memasukkan ikan air laut kedalam air tawar mereka akan mati? Jelaskan berdasarkan sistem osmoregulasinya!

7.7 Uji Kompetensi

1. Jelaskan perbedaan Pronefros, Mesonefros dan Metanefros!
2. Jelaskan bagaimana seekor Buaya Muara (*Crocodylus porosus*) mampu meregulasi tekanan osmotiknya ketika hewan tersebut berburu mangsa di air laut!

DAFTAR PUSTAKA

- Arsih, Fitri. 2012. Fisiologi Hewan. Padang : UNP Press.
- Campbell. 2004. Biologi Jilid 5. Jakarta : Erlangga.
- Soewolo. 2000. Pengantar Fisiologi Hewan. Malang : IKIP Malang.
- Purnamasari, Risa dan D. R. Santi. 2017. Fisiologi Hewan. Surabaya : UIN Sunan Ampel.
- Syofyan, Harlinda. 2018. Modul Biologi Dasar. Jakarta : Universitas Esa Unggul.
- Maulani, Arief H., 2019. Modul Belajar Mandiri. Jakarta : Pengembangan Keprofesian Guru.

BAB 8

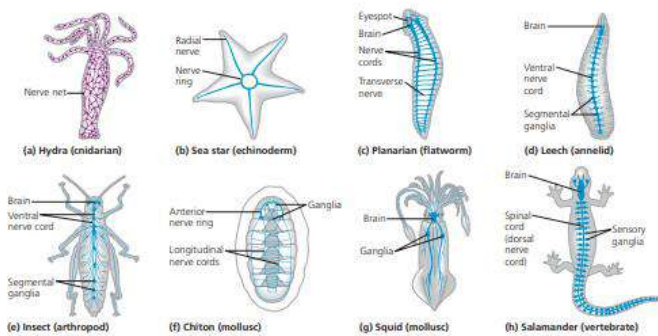
SISTEM SARAF

Kinerja sel-sel di dalam tubuh harus terkoordinasi secara tepat supaya makhluk hidup dapat melakukan aktivitas. Sel yang berperan untuk mengoordinasikan ini adalah sel saraf. Sel saraf mengkomunikasikan informasi/impuls menggunakan kombinasi sinyal listrik dan kimia. Impuls yang diteruskan melalui sistem saraf sehingga dapat terjadi respon terhadap impuls/stimulus yang masuk. Stimulus dapat berupa cahaya, suara, suhu, dan lain-lain.

8.1 Sistem Saraf Avertebrata

Protozoa dan porifera merupakan kelompok avertebrata yang tidak memiliki sistem saraf. Meskipun demikian, sistem saraf hewan tersebut mampu merespon stimulus yang diterima.

Pada coelenterata seperti ubur-ubur mempunyai sel-sel saraf yang menyebar dan terhubung antara satu dengan yang lain, sehingga disebut saraf jala. Echinodermata mempunyai sistem saraf difus, akan tetapi sudah ada struktur yang lebih lengkap yaitu adanya sel saraf motorik, sensorik dan ada reflek. Platyhelminthes mempunyai sistem tangga tali. Arthropoda mempunyai sistem saraf dengan struktur bilateral. Saraf mollusca misalnya pada tiram terdapat ganglion.



Gambar 8.1. Sistem saraf berbagai hewan avertebrata dan vertebrata

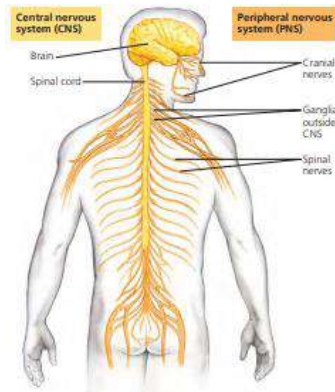
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

8.2 Sistem Saraf Vertebrata

Sistem saraf pisces mempunyai otak yang pendek. Amfibi memiliki otak yang relatif sederhana, tetapi susunan neuron dan sistem saraf sederhana yang mengandung semua fitur struktural utama otak amfibi. Sistem saraf reptil memiliki struktur yang cukup sederhana, namun memungkinkan keragaman fungsional yang besar dalam perilaku spesifik spesies dan adaptasi terhadap berbagai relung. Sistem saraf pusat (SSP) reptil terdiri dari otak dan sumsum tulang belakang yang terorganisir secara linier.

Sistem saraf aves dapat dibagi menjadi sistem saraf pusat yang terdiri dari otak dan sumsum tulang belakang, serta sistem saraf tepi yang meliputi saraf kranial dan tulang belakang, ganglia dan pleksus, serta bagian perifer sistem saraf otonom. Sistem saraf mamalia mempunyai cerebrum besar jika dibandingkan dengan keseluruhan otak.

8.3 Unit Penyusun Sistem Saraf Vertebrata

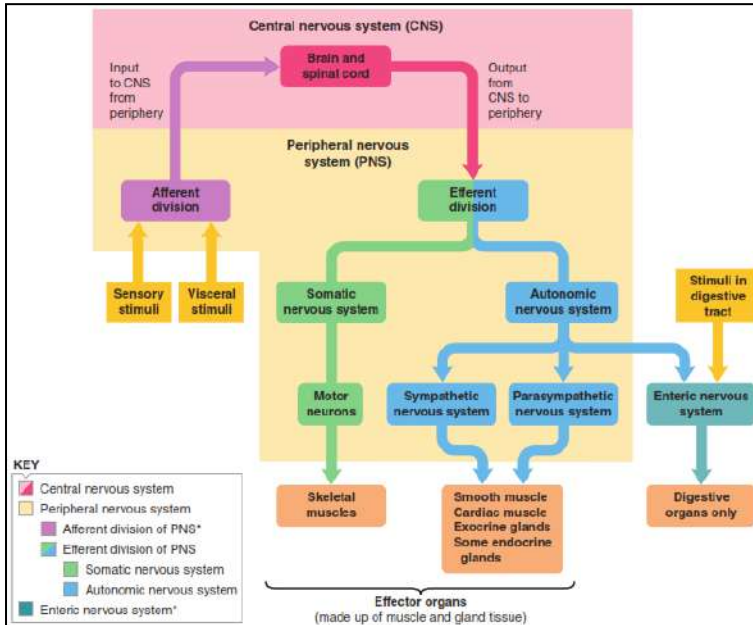


Gambar 8.2. Sistem saraf pusat dan sistem saraf tepi
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

8.3.1 Saraf pusat (otak dan sum-sum tulang belakang)

Otak vertebrata terdiri dari otak depan, otak tengah, dan otak belakang. Setiap bagian otak tersebut mempunyai fungsi masing-masing. Otak depan berfungsi untuk pemrosesan input penciuman (bau), pengaturan tidur dan pemrosesan kompleks lainnya. Otak tengah untuk mengkoordinasikan rute input sensorik. Otak belakang, berfungsi mengontrol aktivitas yang tidak disengaja, seperti sirkulasi darah, dan mengkoordinasikan aktivitas motorik, seperti gerakan.

Sumsum tulang terletak pada kanal tulang belakang yang dibentuk oleh pusat tulang belakang dan lengkung saraf yang berurutan. Sumsum tulang belakang berbentuk pipih pada tetapi cenderung membulat atau berbentuk segi empat pada tetrapoda yang lebih tinggi.

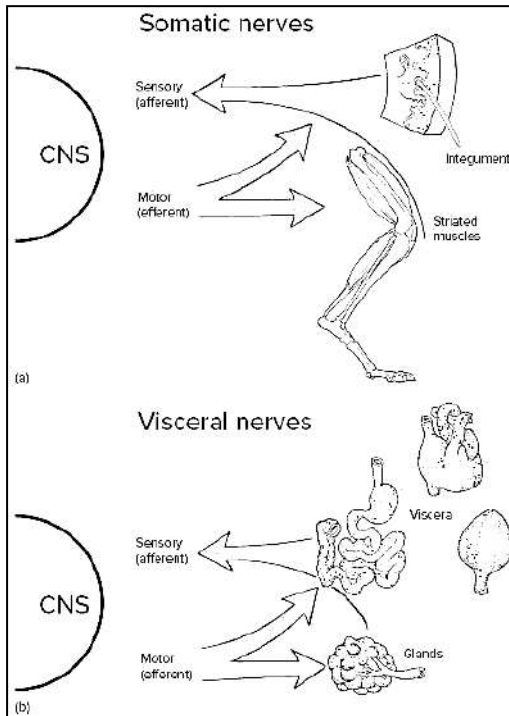


Gambar 8.3 Organisasi system saraf vertebrata

(Sumber : Urry *et al.*, 2021)

8.3.2 Saraf Tepi /Perifer

Sistem saraf perifer mengirimkan informasi ke dan dari SSP dan berperan besar dalam mengatur pergerakan hewan dan lingkungan internalnya. Sistem saraf perifer dibagi menjadi divisi aferen dan eferen. Divisi aferen membawa informasi dari sensor ke SSP, menilai lingkungan eksternal dan memberikan laporan status pada aktivitas internal yang diatur oleh sistem saraf. Divisi eferen mentransmisikan instruksi dari SSP ke efektor organ-organ- otot, kelenjar serta organ lain yang melaksanakan perintah untuk menghasilkan tindakan yang diinginkan.

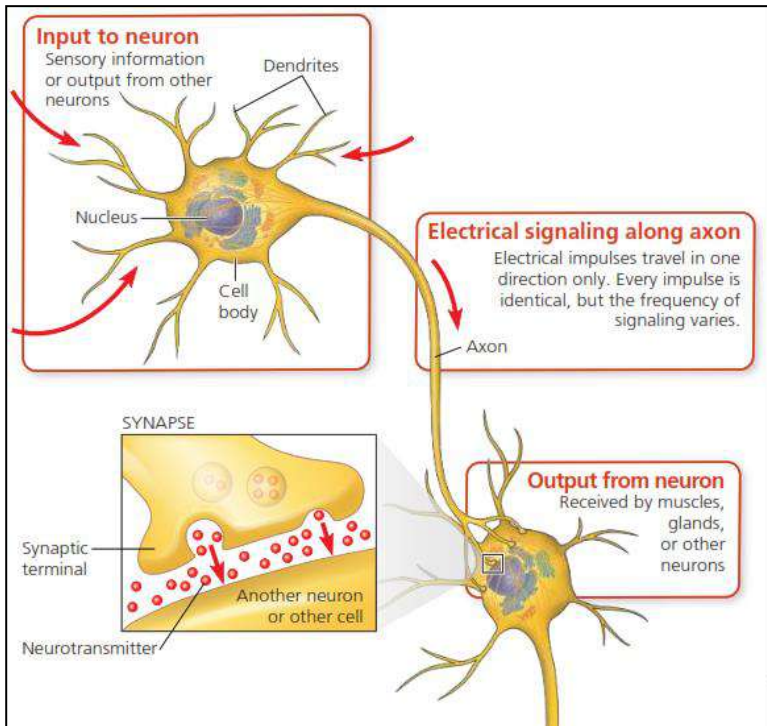


Gambar 8.4. fungsional neuron pada sistem saraf perifer
(Sumber : Kardong, 2019)

8.4 Unit Fungsional Sistem Saraf

8.4.1 Sel Saraf (Neuron)

Neuron merupakan unit fungsional sistem saraf. Neuron bekerja melalui konduksi potensial aksi. Potensial aksi menerjemahkan informasi melalui sistem saraf secara keseluruhan dan sekaligus menjalankan fungsi koordinasi dan kontrol.



Gambar 8.5 Cara Neuron mengirimkan informasi
(Sumber : Urry *et al.*, 2021)

8.4.1.1 Struktur mikroskopis neuron

1. Badan sel utama (soma)

Pada soma terdapat nukleus dan mitokondria.

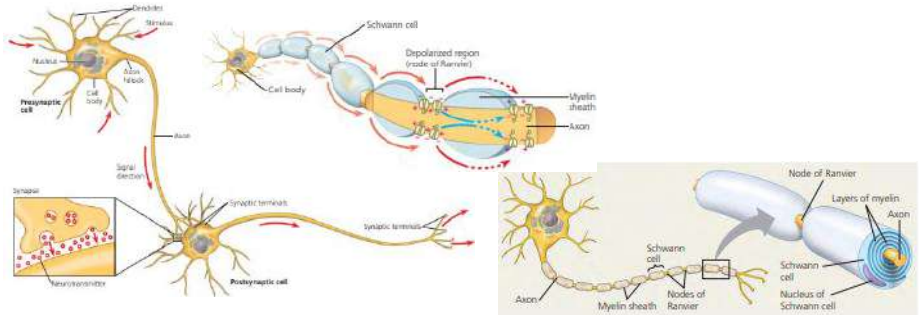
2. Dendrit

Dendrit merupakan pemanjangan dari soma. Dendrit berfungsi menerima informasi dari neuron-neuron lainnya dan dari reseptor sensoris serta memberikan informasi terkait keadaan lingkungan. Informasi tersebut akan diteruskan ke soma.

3. Akson.

Akson adalah penjuruan dari soma. Penghubung antara badan sel dan akson disebut *hillock akson*. Tempat tersebut sangat penting sebagai tempat asal dari potensial aksi saraf. Akson berfungsi mentransmisikan potensial aksi sepanjang badan

akson sampai terminal akson. Terminal akson berhubungan dengan berbagai struktur termasuk dendrit, badan sel, akson dari neuron lainnya, dan juga dengan jaringan non neural seperti otot atau jaringan glandular. Antara terminal akson dengan struktur lainnya ada celah yang disebut dengan sinapsis. Kebanyakan dari akson diselubungi oleh selubung mielin yang terbentuk dari sel-sel glia yang dikenal dengan sel *schwann*. Mielin berfungsi meningkatkan kecepatan transmisi potensial aksi di sepanjang akson. Selubung tersebut bersifat diskontinu karena di beberapa tempat akan ada pembatas atau celah yang disebut dengan nodus ranvier. Pada umumnya, arah potensial aksi menjalar satu arah dari badan sel ke terminal akson.



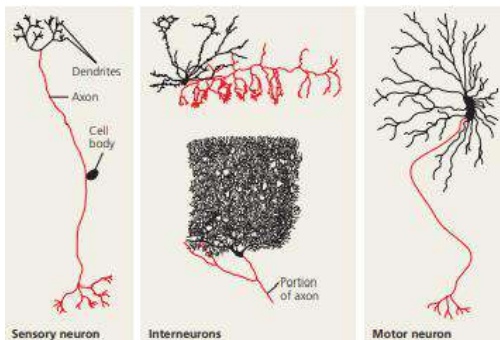
Gambar 8.6. Sel saraf
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

8.4.1.2 Klasifikasi neuron berdasarkan jumlah dendrit yang terhubung ke soma

1. Neuron multipolar
Neuron multipolar memiliki beberapa dendrit di satu ujung, akson di sisi lain.
2. Neuron bipolar
Neuron bipolar memiliki dua proses yang timbul dari tubuh sel
3. Neuron unipolar
Neuron unipolar memiliki satu akson yang membawa impuls ke arah atau menjauh dari akson.

8.4.1.3 Klasifikasi neuron berdasarkan fungsinya

1. Neuron motoris
Disebut juga neuron eferen berfungsi menyampaikan informasi dari sistem saraf pusat ke organ efektor
2. Neuron sensoris
Dikenal juga neuron aferen yang berfungsi meneruskan informasi sensorik dari bagian tubuh ke sistem saraf pusat
3. Neuron penghubung atau interneuron
Biasanya terdapat pada sistem saraf pusat yang fungsinya sebagai penghantar impuls dari satu neuron ke neuron lainnya
4. Neuron sekretori.
Neuron sekretori adalah neuron yang dikhususkan untuk produksi hormon.

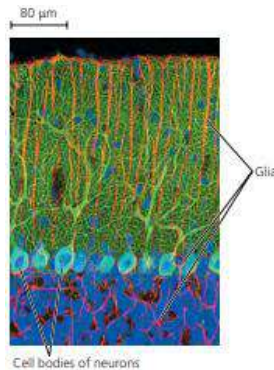


Gambar 8.7. Neuron sensori, interneuron dan neuron motorik
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

8.4.2 Sel glia /Neuroglia

Kelompok kedua dari sel yang ditemukan pada sistem saraf adalah sel glia. Jumlah sel glia sekitar 90% dari sistem saraf. Sel glia menempati separuh dari volume otak, karena sel glia ini tidak bercabang-cabang. Sel glia berhubungan erat dengan neuron walaupun tidak terlibat dalam mengantarkan potensial aksi saraf. Terdapat empat tipe sel glia yaitu astosit, oligodendrosit, sel ependimal dan mikroglia. Astosit mempunyai fungsi sebagai (1) “perekat” utama dari sistem saraf pusat, yaitu merekatkan neuron-neuron; (2) perbaikan kerusakan otak dan neuron (3) menunjang

neuron secara metabolik (4) menghilangkan pengaruh ion K^+ dari cairan ekstraseluler otak pada saat potensial aksi tinggi. Oligodendrosit berfungsi membentuk insulasi selubung mielin akson dalam sistem saraf pusat. Sel endotelial berfungsi melapisi ruang-ruang dalam sistem saraf pusat. Mikroglia berfungsi sebagai pembersih sistem saraf pusat. Mikroglia dalam kondisi normal bersifat pasif, dan akan menjadi aktif apabila terjadi infeksi atau luka pada sistem saraf pusat sel glia mempunyai kemampuan untuk membelah diri.



Gambar 8.8. Sel glia (Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

8.5 Mekanisme Kerja Neuron

Secara umum neuron bekerja dengan cara menghasilkan dan menghantarkan potensial aksi yang merupakan gelombang listrik yang menjalar di neuron.

8.5.1 Fase istirahat

Pada kondisi basal, membran sel neuron bersifat sangat permeabel terhadap ion K^+ karena pada kondisi basal channel K^+ di dalam membran sel terbuka dan memungkinkan lewatnya ion-ion tersebut, sedangkan ion Na^+ kurang permeabel. Permeabilitas terhadap ion ditentukan oleh keberadaan saluran ion (*channel*) yang selektif di dalam membran sel yang hanya ion-ion tertentu saja yang dapat melewatinya. Pada kondisi istirahat, baik saluran natrium

maupun saluran kalium berada dalam keadaan tertutup, namun tetap mempertahankan potensial istirahat membran.

8.5.2 Fase depolarisasi

Selama fase depolarisasi itu, potensial aksi dimulai ketika gerbang aktivitas saluran natrium membuka, saluran kalium tetap tertutup. Ion natrium masuk ke dalam sel dalam jumlah besar, sehingga bagian dalam sel menjadi lebih positif. Potensial aksi adalah perubahan polaritas membran di mana bagian dalam neuron berubah dari muatan negatif menjadi positif selama beberapa milisekon. Potensial aksi terjadi ketika neuron menyampaikan informasi. Potensial aksi ini ditransmisikan sepanjang akson dengan kecepatan mencapai 120 m/s. Kecepatan konduksi ini hanya berlangsung di akson besar yang bermielin. Pada akson yang lebih kecil dan tidak bermielin, kecepatan konduksi hanya sekitar 2.5 m/s. Salah satu aspek penting dari potensial aksi adalah transmisi potensial aksinya tanpa mengalami pengurangan potensial sepanjang akson sehingga ukuran potensial aksi pada hillock akson (sambungan antara akson dan badan sel) sama besar dengan potensial aksi yang terdapat di terminal akson. Potensial aksi merefleksikan terbukanya channel-channel ion dan masuknya (influks) Na^+ ke dalam sel mengikuti stimulus eksternal.

Tidak semua stimulus akan menghasilkan potensial aksi, namun hanya stimulus yang mampu meningkatkan potensial dasar membran (RMP) ke level ambang batas. Ambang batas potensial aksi membran berkisar antara 10-15mV di atas RMP. Pada level ambang batas, mekanisme umpan balik positif dimulai dari masuknya Na^+ ke dalam sel diikuti oleh ion Na^+ lainnya secara terus-menerus. Perubahan awal dari potensial membran ini dikenal dengan depolarisasi. Selanjutnya akan tercapai tegangan puncak selama potensial aksi berlangsung.

8.5.3 *Rising phase/fase transmisi*

Potensial aksi sepanjang akson potensial aksi, yang berasal dari hillocks akson harus melewati terminal akson sebelum menimbulkan pengaruh terhadap neuron, otot, atau jaringan

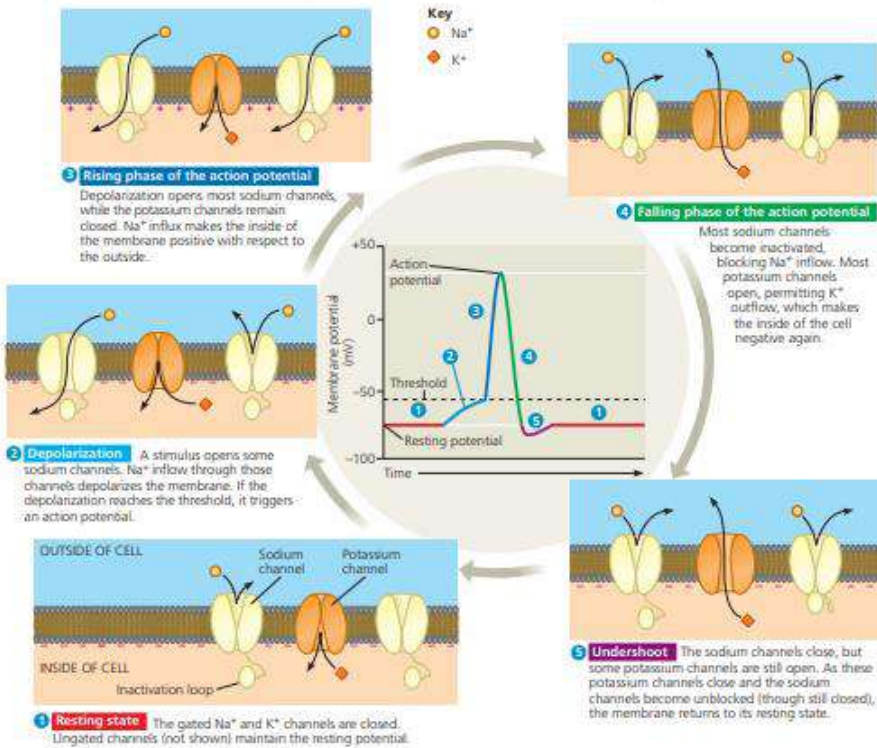
glandular lainnya. Ini juga berlangsung dengan arus lokal. Hal yang terjadi selama potensial aksi adalah bahwa muatan positif di sebelah dalam membran akson ditarik ke sisi sebelahnya yaitu ke bagian yang lebih negatif. Masuknya muatan positif cenderung untuk memindahkan potensial membran ke ambang batas (*threshold*). Jika *threshold* tercapai, potensial aksi menjalar sepanjang akson. Alasan bahwa selubung mielin mempercepat transmisi potensial aksi adalah bahwa seketika setelah membran di sebelahnya mengalami depolarisasi, potensial aksi meloncat dari satu nodus ranvier ke nodus ranvier lainnya. Ini disebut dengan konduksi saltatoris. Akson perlu diselubungi oleh mielin karena pergerakan ion-ion yang diperlukan untuk menghasilkan potensial aksi terhalang pada bagian yang berselubung mielin tersebut sedangkan pada daerah yang tidak berselubung (*naked region*) di nodus ranvier, ion-ion akan bergerak. Oleh sebab itu, satu-satunya tempat di mana terjadinya pergerakan ion adalah pada nodus ranvier yang tidak bermielin, yang akan bermanifestasi pada mekanisme peloncatan aksi potensial dari satu nodus ke nodus ranvier lainnya di sepanjang akson. Dengan cara itu, kecepatan transmisi potensial aksi akan meningkat.

8.5.4 Fase repolarisasi fase ini juga disebut fase refraktori

Pada fase ini, gerbang inaktivasi menutup saluran natrium, dan saluran kalium terbuka. Ion kalium meninggalkan sel, dan bagian dalam sel menjadi lebih negatif dibandingkan dengan bagian luar sel akibat kehilangan muatan positif. Hal ini menyebabkan potensial membran kembali ke kondisi dasar (RMP).

8.5.5 Fase *undershoot* atau hiperpolarisasi

Pada fase ini saluran natrium tertutup, tetapi saluran kalium tetap terbuka karena gerbangnya yang relatif lambat tertutup, tidak mempunyai cukup waktu untuk merespons repolarisasi membran. Kondisi ini disebut dengan fase hiperpolarisasi. Dalam tempo satu atau dua milidetik berikutnya keadaan istirahat dipulihkan, dan sistem tersebut siap untuk merespons stimulus lain.



Gambar 8.9. Mekanisme kerja neuron (Sumber: Campbell *et al.*, 2011)

8.6 Forum Diskusi

Diskusikan Bersama teman kelompokmu!
 Bagaimana respon terjadi apabila salah satu syaraf ada yang rusak akibat zat gangguan fisik?

8.7 Uji Kompetensi

Jawablah soal di bawah ini dengan tepat!

1. Jelaskan terkait unit fungsional sistem saraf!
2. Bagaimana mekanisme kerja neuron?
3. Bagaimana proses transmisi kimia melewati sinapsis?

DAFTAR PUSTAKA

- Campbell, Neil A., Jane B. Reece., Michael L. Chain., Steven A. Wasserman., Peter V. minorsky., Robert B. Jackson. (2011). *Biologi. Edisi kesembilan*. Erlangga. Jakarta.
- Diptyanusa, A., Mulyaningsih, udi., Sari, D.C.R., Partadireja,G., Yunus, J., Arfian,N., Sianipar,O., Susilowati,R., Tasmini,T., Santoto, T.B.T. 2020. *Comprehensive Biomedical Sciences Sistem saraf*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- González, A. *et al.* (2016) 'The Organization of the Central Nervous System of Amphibians', *Evolution of Nervous Systems: Second Edition*, 1-4, pp. 141-170. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804042-3.00005-1>.
- Kardong, K. V. (2019) *Vertebrates: Comparative Anatomy, Function, Evolution*. Eight Edition. New York: McGraw-Hill Education.
- Kent, G.C. and Miller, L. (1997) *Comparative Anatomy of the Vertebrates*. Eight Edition. Dubuque: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Parker, M.G. (1993) 'Avian Neurological Examination : A Review'.
- Sherwood, L., Klandrof, H. and Yancey, P.H. (2011) *Animal Physiology*. Second Edi. Belmont: Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Wyneken, J. (2007) 'Reptilian Neurology: Anatomy and Function', *Veterinary Clinics of North America - Exotic Animal Practice*, 10(3), pp. 837-853. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cvex.2007.05.004>.

BAB 9

SISTEM ENDOKRIN

Oleh Febri Nur Ngazizah

Sistem endokrin merupakan sistem kontrol kalenjar tanpa saluran (*ductless*) yang menghasilkan hormon. Hormon tersebut mengatur reproduksi, metabolisme energi dan beberapa fungsi di dalam tubuh. Bahasa Yunani hormone adalah “horman” yang berarti menggairahkan (membangkitkan). Pada hewan hormon dikeluarkan kedalam cairan ekstraseluler, sistem peredaran darah. Hormon mempunyai reseptor spesifik sehingga hormon hanya akan bereaksi pada sel yang mempunyai reseptor untuk hormon tersebut.

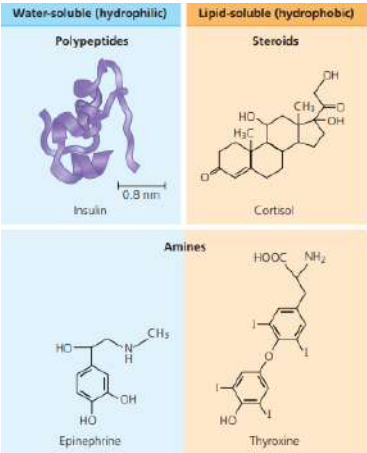
9.1 Klasifikasi Hormon Berdasarkan Susunan Kimia Hormon

Molekul hormon sangat bervariasi dalam hal ukuran dan komponen penyusun kimia hormon. Beberapa variasi ini terlihat dari tiga kelompok kimia hormon yaitu:

1. Polipeptida (protein dan peptida)
Hormon polipeptida terdiri dari dua rantai polipeptida.
2. Steroid
Hormon steroid, seperti kortisol dan ekdisteroid, adalah lipid yang mengandung empat cincin karbon yang menyatu.
3. Amina
Epinefrin dan tiroksin adalah hormon amina, masing-masing disintesis dari satu asam, baik tirosin atau triptofan.

Hormon juga bervariasi dalam kelarutannya. Hormon larut dalam air seperti polipeptida dan sebagian besar hormon amina. Hormon ini mengikat reseptor permukaan sel kemudian menyampaikan informasi ke nukleus melalui jalur intraseluler.

Sedangkan hormon larut dalam lemak seperti hormon steroid, serta sebagian besar hormon nonpolar (hidrofobik) lainnya, seperti tiroksin dapat melewati membran sel dengan mudah. Reseptor untuk hormon yang larut dalam lemak biasanya berada di sitoplasma atau nukleus.



Gambar 9.1. Struktur dan kelarutan hormon
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

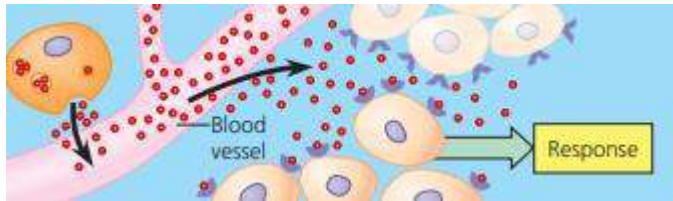
9.2 Reseptor Hormon dan Respon Spesifik

9.2.1 Komunikasi interseluler

Dibedakan berdasarkan jenis sekresi sel dan jalur sinyal dalam mencapai sel target

1. Sinyal endokrin

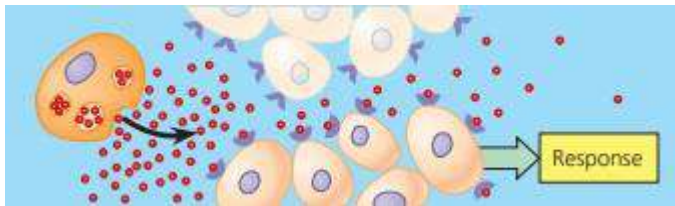
Hormon yang disekresikan sel endokrin menuju sel target melewati aliran darah (hemolimfa). Pensinyalan endokrin mempertahankan homeostasis, memediasi respons terhadap rangsangan lingkungan, serta mengatur pertumbuhan dan perkembangan. Misalnya, hormon mengoordinasikan respons tubuh terhadap stres, dehidrasi, dan kadar glukosa darah rendah. Hormon tersebut memicu perilaku, perubahan fisik yang mendasari kematangan seksual dan reproduksi.



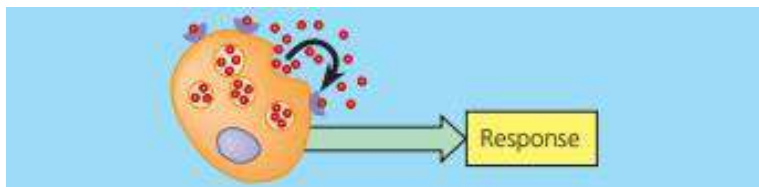
Gambar 9.2. Sinyal endokrin (Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

2. Sinyal parakrin dan autokrin

Sinyal parakrin (dari bahasa Yunani para, menjadi satu sisi), sel target terletak di dekat sel yang mensekresi sedangkan sinyal autokrin (dari bahasa Yunani auto,sendiri), target sel adalah sel yang mensekresi itu sendiri. Pensinyalan parakrin dan autokrin berperan dalam banyak proses fisiologis, termasuk pengaturan tekanan darah, fungsi sistem saraf dan reproduksi.



Gambar 9.3 Sinyal parakrin
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

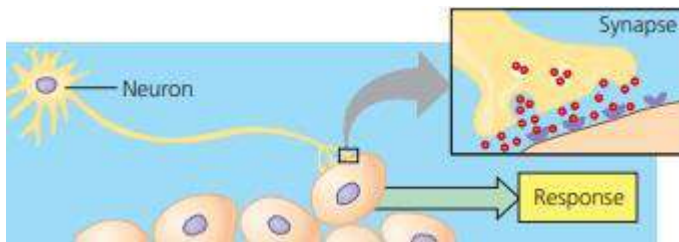


Gambar 9.4. sinyal autokrin
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

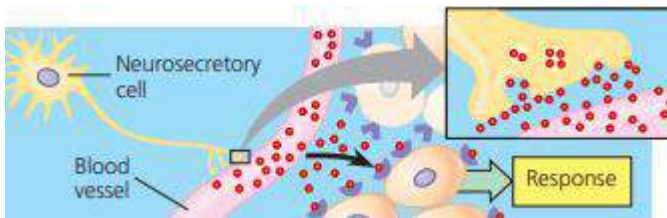
3. Sinyal sinapsis dan neuroendokrin

Pada sinapsis, neuron mensekresi molekul disebut neurotransmitter yang berdifusi dalam jarak yang sangat pendek untuk mengikat reseptor pada sel target. Pensinyalan neuroendokrin, neuron khusus yang disebut sel neurosekretori

mengeluarkan molekul yang berdifusi dari ujung sel saraf ke dalam aliran darah. Molekul-molekul ini yang melewati aliran darah menuju ke sel target merupakan kelas hormon yang disebut neurohormon. Salah satu contohnya adalah hormon anti diuretik, juga dikenal sebagai vasopresin, hormon yang penting untuk fungsi ginjal dan keseimbangan air.



Gambar 9.5. sinyal sinaptik (Sumber: Campbell *et al.*, 2011).



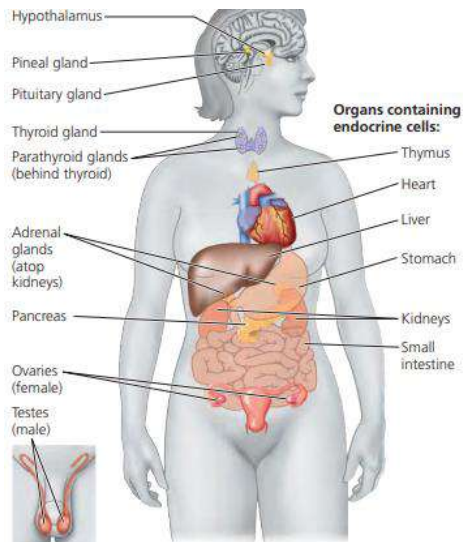
Gambar 9.6. Sinyal neuroendokrin (Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

4. Sinyal feromon

Tidak semua molekul pemberi sinyal yang disekresikan bekerja di dalam tubuh ada juga yang di luar tubuh seperti feromon yaitu bahan kimia yang dilepaskan tubuh ke lingkungan luar. Misalnya, ketika semut mencari makan menemukan sumber makanan baru, ia menandai jalannya kembali ke sarang dengan feromon. Semut juga menggunakan feromon untuk jalur ketika sebuah koloni bermigrasi ke lokasi baru. Feromon mempunyai beberapa fungsi meliputi: menentukan wilayah, peringatan predator dan menarik pasangan. Ngengat sutra raksasa (*Antheraea polyphemus*) betina melepaskan feromon seks ke udara untuk menarik jantan dari jarak hingga 4,5 km.

5. Jaringan dan organ endokrin

Kelenjar endokrin tidak mempunyai saluran sehingga mengeluarkan hormon melalui pembuluh darah. Sedangkan kelenjar eksokrin, seperti kelenjar ludah, memiliki saluran yang membawa zat yang disekresikan ke permukaan tubuh atau ke dalam rongga tubuh.

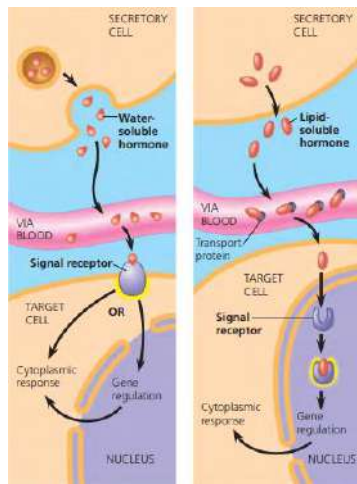


Gambar 9.7. Kelenjar endokrin utama manusia
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

9.2.2 Respon Selular

Ada beberapa perbedaan antara jalur respons untuk hormon berdasarkan kelarutannya. Salah satu perbedaannya adalah lokasi reseptor sinyal sel target (Hormon yang larut dalam air disekresikan oleh eksositosis, berjalan bebas di aliran darah, dan mengikat reseptor sinyal permukaan sel). Mengikat hormon tersebut ke reseptor kemudian menginduksi perubahan molekul sitoplasma dan kadang-kadang mengubah transkripsi gen (sintesis molekul RNA pembawa pesan). Sebaliknya, hormon yang larut dalam lemak berdifusi melintasi membran sel endokrin. Di luar sel, mereka

mengikat protein transpor yang membuatnya tetap larut dalam lingkungan berair dari aliran darah. Setelah keluar dari aliran darah kemudian berdifusi ke dalam sel target, mengikat reseptor sinyal intraseluler dan memicu perubahan transkripsi gen.



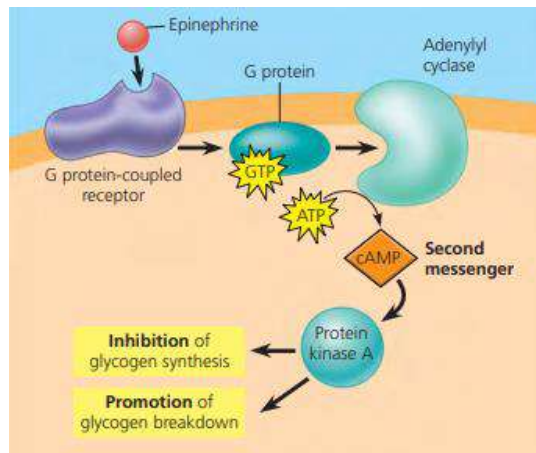
(a) (b)
Gambar 9.8. (a) reseptor terletak di membrane plasma, (b) reseptor terletak di nucleus
 (Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

1. Jalur hormon larut dalam air

Pengikatan hormon yang larut dalam air ke reseptor sinyal protein menghasilkan respon seluler. Responnya dapat berupa aktivasi enzim, perubahan dalam pengambilan atau sekresi molekul tertentu. Serangkaian perubahan protein seluler yang mengubah sinyal kimia ekstraseluler ke respons intraseluler spesifik disebut transduksi sinyal.

Jalur transduksi sinyal biasanya terdiri dari beberapa tahap, masing-masing melibatkan interaksi molekul tertentu, misalnya respons terhadap stres jangka pendek. Ketika seseorang panik saat tertinggal bus, orang tersebut akan berlari mengejar bus, kelenjar adrenal mengeluarkan hormon epinefrin, juga disebut adrenalin. Ketika epinefrin mencapai hati, ia berikatan dengan

reseptor berpasangan protein G di membran plasma target. Pengikatan hormon ke reseptor memicu serangkaian kejadian melibatkan sintesis AMP siklik (cAMP). Aktivasi protein kinase A oleh cAMP menyebabkan aktivasi enzim yang diperlukan untuk pemecahan glikogen dan aktivasi enzim yang diperlukan untuk sintesis glikogen. Hasil akhirnya adalah hati melepaskan glukosa ke dalam aliran darah, menyediakan bahan bakar dibutuhkan untuk mengejar bus.

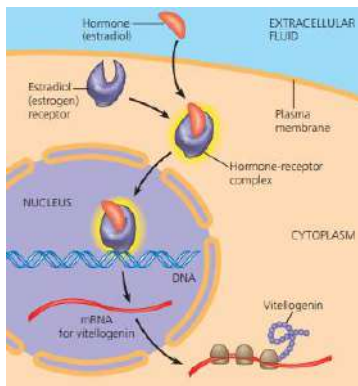


Gambar 9.9. Jalur transduksi sinyal
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

2. Jalur hormon larut dalam lemak

Hormon mengaktifkan reseptor, yang kemudian memicu respons sel. Pada banyak kasus, respons terhadap hormon yang larut dalam lemak adalah perubahan ekspresi gen. Reseptor hormon steroid terletak di sitosol sebelumnya untuk mengikat hormon. Saat hormon tersebut berikatan dengan reseptor akan terbentuk kompleks hormon dengan reseptor, yang bergerak ke dalam nukleus. Di sana, bagian reseptor kompleks tersebut mengubah transkripsi gen tertentu dengan berinteraksi dengan protein pengikat DNA spesifik atau elemen respons dalam DNA misalnya estrogen (hormon steroid yang diperlukan untuk fungsi

reproduksi wanita pada vertebrata). Pada burung dan katak betina, estradiol (suatu bentuk estrogen) memiliki reseptor spesifik di sel hati. Pengikatan estradiol ke reseptor ini mengaktifkan transkripsi gen untuk protein. Mengikuti terjemahan RNA messenger, vitelogenin disekresikan dan dibawa ke dalam darah menuju sistem reproduksi, dimana ia digunakan untuk menghasilkan kuning telur.



Gambar 9. 10. Reseptor hormon steroid secara langsung
Mengatur ekspresi gen
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

Tiroksin, vitamin D, dan hormon larut lemak lainnya yang bukan hormon steroid memiliki reseptor yang biasanya terletak di nukleus. Reseptor ini mengikat molekul hormon yang berdifusi dari aliran darah melintasi kedua membran plasma dan membran nukleus. Sekali terikat oleh hormon, reseptor mengikat ke situs tertentu dalam DNA sel dan merangsang transkripsi gen tertentu.

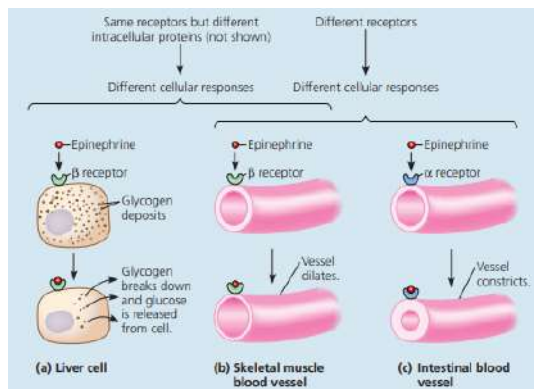
9.3 Berbagai Efek Hormon

Ada banyak hormon yang dapat menimbulkan lebih dari satu jenis respons dalam tubuh. Efek yang ditimbulkan oleh hormon tertentu dapat bervariasi jika sel target berbeda dalam molekul yang menerima atau menghasilkan respons terhadap hormon itu. Misalnya efek dari epinefrin dalam memediasi respons tubuh

terhadap stres jangka pendek. Epinefrin secara bersamaan memicu pemecahan glikogen di hati, aliran darah ke otot rangka utama meningkat dan aliran darah ke saluran pencernaan mengalami penurunan. Efek yang bervariasi ini meningkatkan reaksi tubuh yang cepat dalam keadaan darurat.

Jaringan bervariasi dalam responnya terhadap epinefrin karena bervariasi dalam reseptornya atau dalam jalur transduksi sinyalnya. Pengenalan sel target epinefrin melibatkan reseptor berpasangan protein G. Sel hati memiliki reseptor epinefrin tipe yang mengaktifkan enzim protein kinase A, yang selanjutnya mengatur enzim dalam metabolisme glikogen. Di pembuluh darah yang mensuplai otot rangka, kinase yang sama yang diaktifkan oleh reseptor epinefrin yang sama menonaktifkan enzim spesifik otot. Hasilnya adalah relaksasi otot polos dan karenanya aliran darah meningkat. Sebaliknya, pembuluh darah usus memiliki reseptor epinefrin tipe alfa. Reseptor memicu jalur pensinyalan berbeda yang melibatkan protein G yang berbeda dan enzim yang berbeda. Hasilnya kontraksi otot dan membatasi aliran darah ke usus.

Hormon yang larut dalam lemak sering memberikan efek yang berbeda pada sel target yang berbeda juga. Misalnya, estrogen yang merangsang hati burung untuk mensintesis protein kuning telur vitellogenin juga merangsang sistem reproduksinya untuk mensintesis protein yang membentuk putih telur.



Gambar 9.11. Satu hormon, berbeda reaksi
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

9.4 Pemberian Sinyal oleh Regulator Lokal

Regulator lokal adalah molekul yang disekresikan yang menghubungkan pensinyalan parakrin atau secara langsung mengatur sel yang mensekresi (pensinyalan autokrin). Setelah disekresikan, regulator lokal bertindak pada sel target dalam hitungan detik atau bahkan milidetik, memunculkan respons lebih cepat daripada hormon.

Beberapa jenis senyawa kimia berfungsi sebagai regulator lokal. Regulator lokal polipeptida termasuk sitokin, dan juga sebagian besar faktor pertumbuhan memicu proliferasi dan diferensiasi sel.

Gas *nitric oxide* (NO) berfungsi dalam tubuh baik sebagai neurotransmitter dan regulator lokal. Ketika kadar oksigen (O_2) dalam darah turun, sel-sel endotel di dinding pembuluh darah mensintesis dan melepaskan NO. Oksida nitrat mengaktifkan enzim yang melemaskan sel-sel otot polos di sekitarnya, menghasilkan vasodilatasi, yang meningkatkan aliran darah ke jaringan. NO sangat reaktif dan berpotensi toksik biasanya memicu perubahan pada tar dalam beberapa detik setelah kontak dan kemudian rusak. Pada pria kemampuan NO untuk meningkatkan vasodilatasi memungkinkan fungsi peningkatan aliran darah ke penis, menghasilkan ereksi. Obat Viagra (sildenafil sitrat), pengobatan untuk disfungsi ereksi pria, mempertahankan ereksi dengan memperpanjang aktivitas jalur respon NO.

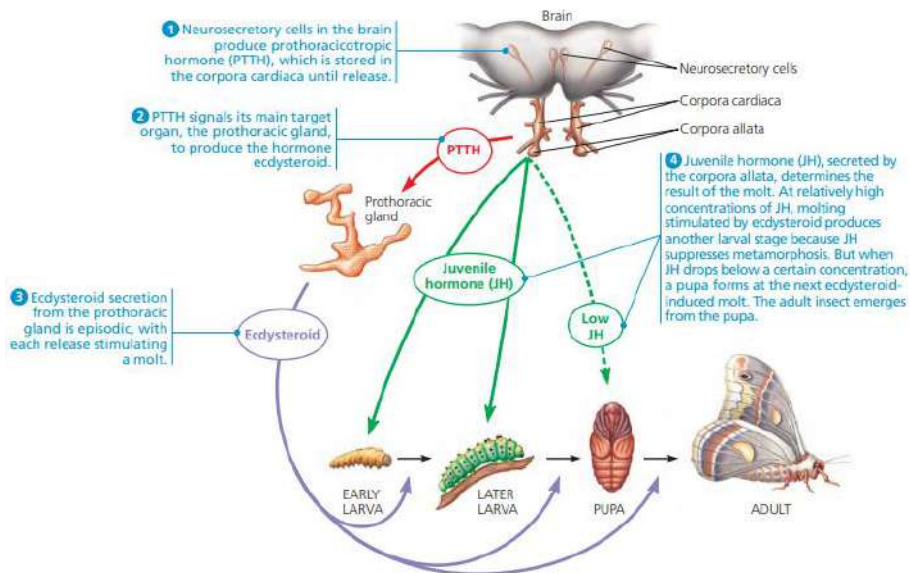
Sekelompok regulator lokal yang disebut prostaglandin adalah asam lemak termodifikasi. Prostaglandin pertama kali ditemukan dalam sekresi kelenjar prostat yang berkontribusi pada air mani. Prostaglandin diproduksi oleh banyak jenis sel dan memiliki aktivitas yang bervariasi. Dalam air mani yang mencapai saluran reproduksi wanita, prostaglandin merangsang otot polos pada dinding rahim wanita untuk berkontraksi, membantu sperma mencapai sel telur. Pada awal persalinan, sel-sel yang mensekresi prostaglandin dari plasenta menyebabkan otot-otot di dekatnya rahim menjadi lebih terpacu, membantu untuk menginduksi persalinan. Dalam sistem kekebalan tubuh, prostaglandin memacu

terjadinya demam dan peradangan dan juga mengintensifkan sensasi rasa sakit. Aspirin dan ibuprofen digunakan sebagai anti-inflamasi dan penghilang rasa sakit karena dapat menghambat sintesis prostaglandin.

9.5 Koordinasi Neuroendokrin dan Pensinyalan Endokrin

Endokrin dan sistem saraf bertindak secara terkoordinasi untuk mengontrol reproduksi dan pengembangan. Sebagai contoh, siklus hidup kupu-kupu. Larva kupu-kupu tumbuh secara bertahap. Karena kerangka luarnya tidak dapat meregang, larva harus berganti kulit (*molting*) secara berkala, melepaskan eksoskeleton lama dan mengeluarkan yang baru. Sel-sel neurosekretori menghasilkan hormon prothoracicotropic (PTTH), neurohormon polipeptida. Adanya PTTH memicu sepasang kelenjar endokrin di belakang otak melepaskan ecdysteroid. Ecdysteroid memicu setiap proses molting berturut-turut, serta metamorfosis larva menjadi kupu-kupu.

Salah satu fungsi hormon juvenil yang disekresikan oleh sepasang kelenjar endokrin lain di belakang otak adalah untuk mempertahankan karakteristik larva. Hormon juvenil memodulasi aktivitas ecdysteroid. Selama tingkat hormon juvenil tinggi, ecdysteroid merangsang molting larva. Ketika tingkat hormon juvenil turun, molting yang diinduksi ecdysteroid menghasilkan kepompong.



Gambar 9.12. Metaforfosis serangga
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

9.6 Jalur Regulasi Hormon

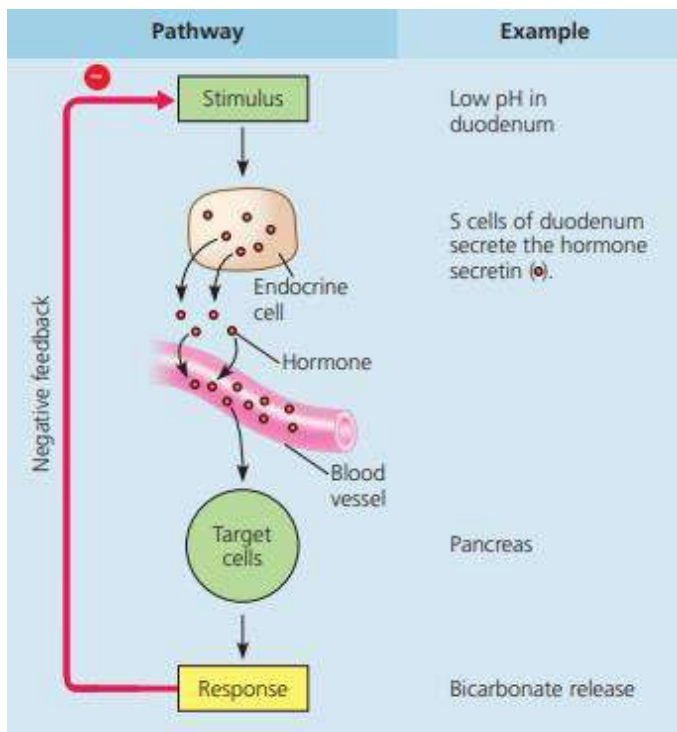
9.6.1 Jalur sederhana

Jalur sederhana terdiri dari endokrin sederhana dan jalur neuroendokrin sederhana. Sel-sel endokrin merespons langsung terhadap stimulus internal atau lingkungan dengan mensekresikan hormon tertentu. Hormon berjalan dalam aliran darah ke sel target kemudian berinteraksi dengan reseptor yang spesifik. Transduksi sinyal dalam sel target menghasilkan respons fisiologis.

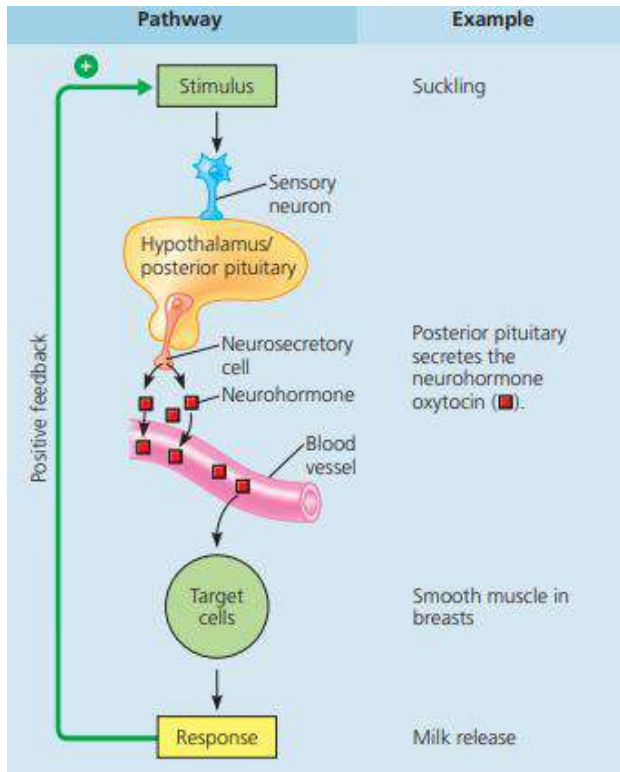
Contoh jalur endokrin sederhana ditunjukkan pada pH rendah di duodenum merangsang sel-sel endokrin tertentu ng disebut sel S, untuk mengeluarkan hormon sekretin. Hormon tersebutmasuk ke aliran darah menuju ke pankreas. Sel target pankreas selanjutnya melepaskan bikarbonat ke dalam saluran yang mengarah ke duodenum, yang akan meningkatkan pH.

Dalam jalur neuroendokrin sederhana, stimulus diterima oleh neuron sensorik, yang merangsang sel neurosekretori. Sel

neurosekretori kemudian mengeluarkan hormon neuro, yang berdifusi ke pembuluh darah dan berjalan ke sel sasaran. Jalur seperti itu mengatur pelepasan susu selama menyusui pada mamalia. Bayi yang menyusui merangsang neuron sensorik pada puting susu, menghasilkan sinyal dalam sistem saraf menuju hipotalamus untuk memicu pelepasan neurohormon oksitosin dari kelenjar hipofisis posterior. Menghasilkan hormon oksitosin yang mengalir ke aliran darah mengakibatkan kelenjar susu mengeluarkan susu.



Gambar 9.13. Jalur endokrin sederhana
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).



Gambar 9.14. Jalur neuroendokrin sederhana
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

9.6.2 Regulasi umpan balik hormon

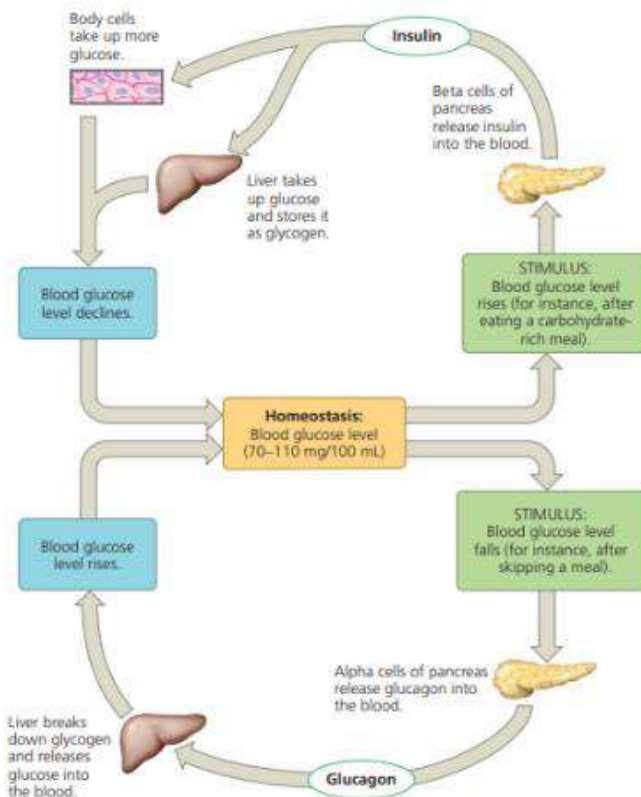
Sebuah loop umpan balik yang menghubungkan respon kembali ke stimulus awal adalah karakteristik dari jalur kontrol. Pada banyak jenis hormon, jalur respons melibatkan umpan balik negatif, loop dimana respon mengurangi stimulus awal. Di kasus pensinyalan sekretin pelepasan bikarbonat oleh pankreas meningkatkan pH di usus, terjadi umpan balik negatif dengan mengurangi atau menghilangkan pensinyalan hormon.

9.6.3 Insulin dan glukagon

Hormon insulin dan glukagon mengontrol homeostasis kadar glukosa darah. Setiap hormon-hormon ini beroperasi dalam jalur endokrin sederhana diatur oleh umpan balik negatif. Ketika

glukosa darah naik di atas kisaran normal, pelepasan insulin memicu penyerapan glukosa dari darah ke dalam sel-sel tubuh, menurunkan konsentrasi glukosa darah. Saat glukosa darah turun di bawah kisaran normal, pelepasan glukagon mendorong pelepasan glukosa ke dalam darah dari simpanan energi, seperti glikogen hati, sehingga meningkatkan konsentrasi glukosa darah.

Glukagon dan insulin diproduksi di pankreas tepatnya di pulau pankreas. Setiap pulau pankreas memiliki sel alfa, yang membuat glukagon, dan sel beta, yang membuat insulin. Seperti semua hormon, insulin dan glukagon disekresikan ke dalam cairan interstisial dan masuk ke sistem peredaran darah.



Gambar 9.15. Pengaturan kadar glukosa oleh glukagon dan insulin
 ((Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

Penyakit diabetes melitus disebabkan oleh kekurangan insulin atau penurunan respon terhadap insulin di jaringan target. Kadar glukosa darah meningkat, tetapi sel tidak dapat mengambilnya glukosa yang cukup untuk memenuhi kebutuhan metabolisme. Sebaliknya, lemak menjadi substrat utama untuk respirasi sel. Pada kasus yang parah, metabolit asam yang terbentuk selama pemecahan lemak terakumulasi dalam darah, mengancam kehidupan dengan menurunkan pH darah dan menguras ion natrium dan kalium dari tubuh. Pada penderita diabetes melitus, kadar glukosa dalam darah dapat melebihi kapasitas ginjal untuk menyerap kembali glukosa. Glukosa yang tersisa dalam filtrat ginjal dikeluarkan. Glukosa ini terkonsentrasi dalam urin.

Ada dua jenis utama diabetes mellitus. Masing-masing adalah ditandai dengan glukosa darah tinggi, tetapi dengan penyebab yang sangat berbeda. Diabetes tipe 1, atau diabetes yang bergantung pada insulin, adalah gangguan autoimun di mana sistem kekebalan menghancurkannya sel beta pankreas. Diabetes tipe 1, yang biasanya muncul selama masa kanak-kanak, menghancurkan kemampuan seseorang untuk memproduksi insulin. Pengobatan terdiri dari insulin, biasanya disuntikkan beberapa kali sehari. Di masa lalu, insulin diekstraksi dari pankreas hewan, tetapi sekarang insulin manusia dapat diperoleh dari bakteri rekayasa genetika, yang relatif murah.

Diabetes tipe 2, atau diabetes yang tidak tergantung insulin, dicirikan oleh kegagalan sel target untuk merespon insulin secara normal. Insulin diproduksi, tetapi sel target gagal mengambil glukosa dari darah, dan kadar glukosa darah tetap tinggi. Meskipun genetik dapat berperan dalam diabetes tipe 2, kelebihan berat badan dan kurang olahraga secara signifikan meningkatkan risiko. Bentuk diabetes ini umumnya muncul setelah usia 40, tetapi bahkan pada anak-anak yang obesitas dapat beresiko mengalami penyakit ini.

9.7 Hipotalamus dan Pituitary sebagai Pusat Regulasi Endokrin

9.7.1 Koordinasi Endokrin dan Sistem Saraf pada Vertebrata

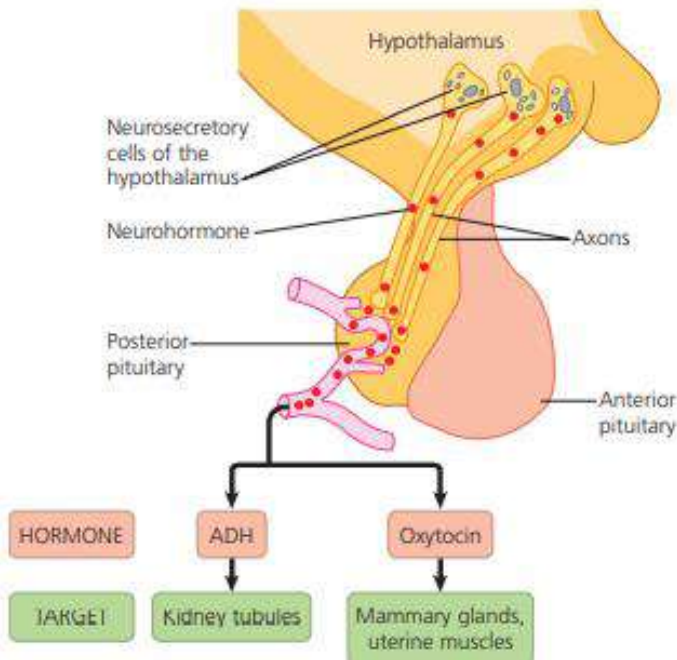
Pada vertebrata, hipotalamus merupakan pusat sistem endokrin dan saraf. Hipotalamus mendapatkan impuls dari saraf di seluruh tubuh, termasuk otak. Sebagai tanggapan, hipotalamus merespon sesuai dengan kondisi lingkungan. Sinyal dari hipotalamus berjalan ke kelenjar hipofisis, hipofisis memiliki bagian posterior dan anterior yang mengeluarkan pengaturan hormon yang berbeda.

Hipofisis posterior merupakan perpanjangan dari hipotalamus. Akson hipotalamus yang mencapai posterior hipofisis mengeluarkan neurohormon yang disintesis di hipotalamus. Sebaliknya, hipofisis anterior adalah kelenjar endokrin yang mensintesis dan mengeluarkan hormon sebagai respon terhadap sinyal dari hipotalamus.

1. Hormon hipofisis posterior

Sel-sel neurosekretori hipotalamus mensintesis hormon hipofisis posterior: oksitosin dan hormon antidiuretik. Setelah melewati hipofisis posterior dalam akson panjang sel neurosekretori, hormon-hormon tersebut disimpan dalam sel hipofisis, untuk dilepaskan sebagai respons terhadap impuls yang ditransmisikan oleh hipotalamus. Oksitosin mengatur sekresi susu oleh kelenjar susu dan juga kontraksi rahim saat melahirkan. Selain itu, oksitosin memiliki target di otak, yang memengaruhi perilaku yang berhubungan dengan ikatan pasangan dan aktivitas seksual.

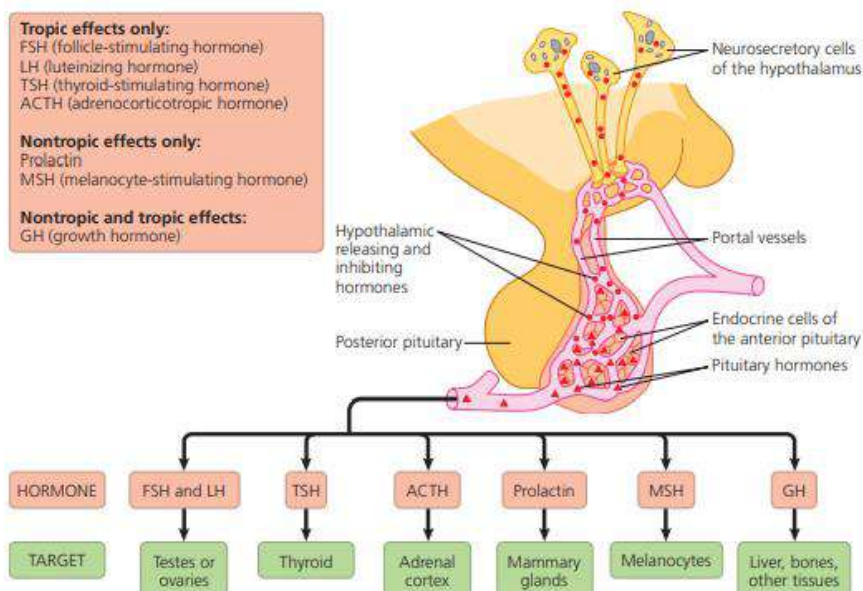
Hormon antidiuretik (ADH), atau vasopresin, mengatur fisiologi dan perilaku. ADH adalah salah satu dari beberapa hormon yang mengatur fungsi ginjal. Secara khusus, ADH meningkatkan retensi air di ginjal, sehingga menurunkan volume urine. ADH membantu menjaga osmolaritas darah dalam kisaran normal. ADH juga memainkan peran penting dalam perilaku sosial



Gambar 9.16. Produksi dan pelepasan hormon hipofisis posterior
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

2. Hormon hipofisis anterior

Sinyal endokrin yang dihasilkan oleh hipotalamus mengatur sekresi hormon oleh hipofisis anterior. Setiap Hormon hipotalamus adalah hormon pelepas atau hormon penghambat dalam pelepasan satu atau lebih hormon spesifik oleh hipofisis anterior. Hormon pelepas prolaktin, misalnya, adalah hormon hipotalamus yang merangsang hipofisis anterior untuk mensekresi prolaktin, yang memiliki aktivitas yang merangsang produksi susu. Prolaktin, memiliki hormon pelepas dan hormon penghambat. Hormon pelepas dan penghambat disekresikan di dekat kapiler di dasar hipotalamus.

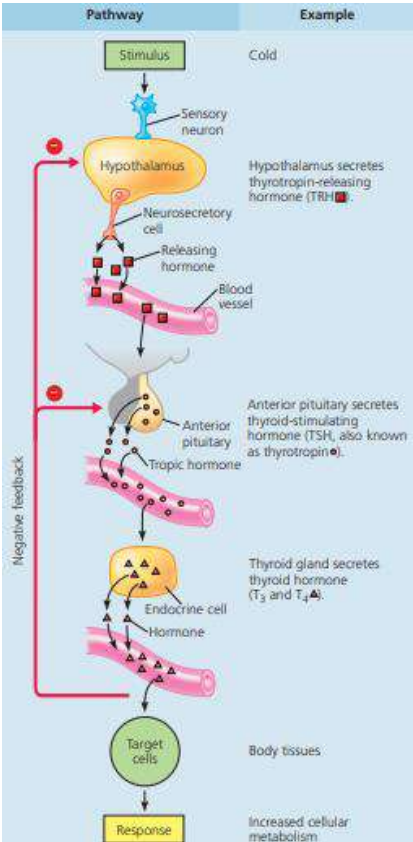


Gambar 9.17. Produksi dan pelepasan hormon hipofisis anterior
 (Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

9.7.2 Regulasi tiroid: jalur kaskade hormon

Kumpulan hormon dari hipotalamus, hipofisis anterior dan kelenjar endokrin target sering diatur menjadi: jalur kaskade hormon. Sinyal ke otak merangsang hipotalamus untuk mengeluarkan hormon yang merangsang atau menghambat pelepasan hormon hipofisis anterior. Hormon hipofisis anterior bertindak pada jaringan endokrin target, merangsang sekresi hormon lain yang menyebabkan terjadinya metabolisme sistemik. Sebagai contoh ketika suhu tubuh turun, hipotalamus mengeluarkan hormon pelepas tiotropin (TRH). Hipofisis anterior merespon terhadap TRH dengan mensekresi hormon perangsang tiroid (TSH), juga dikenal sebagai tiotropin. TSH merangsang pelepasan hormon tiroid. Ketika hormon tiroid terakumulasi, menyebabkan peningkatan laju metabolisme, menghasilkan pelepasan energi panas yang menaikkan suhu tubuh.

Seperti jalur hormon sederhana, jalur hormon kaskade biasanya melibatkan umpan balik negatif. Dalam kasus jalur hormon tiroid, hormon tiroid itu sendiri melakukan umpan balik negatif. Karena hormon tiroid memblokir pelepasan TSH dari hipofisis anterior dan pelepasan TRH dari hipotalamus, loop umpan balik negatif mencegah produksi hormon tiroid yang berlebihan. Pada manusia dan mamalia lain, hormon tiroid mengatur bioenergi, membantu menjaga tekanan darah normal, detak jantung, tonus otot, mengatur pencernaan dan fungsi reproduksi. Terlalu banyak atau terlalu sedikit hormon tiroid dalam darah dapat menyebabkan gangguan metabolisme yang serius.



Gambar 9.18. Jalur hormon kaskade
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

Gangguan fungsi dan regulasi tiroid pada manusia dapat berupa hipotiroid dan hipertiroid. Hipotiroidisme merupakan suatu kondisi tiroid yang dibawah normal dapat menyebabkan gejala seperti penambahan berat badan, kelesuan, dan intoleransi terhadap dingin pada orang dewasa. Sedangkan sekresi hormon tiroid yang berlebihan, atau hipertiroidisme, dapat menyebabkan suhu tubuh tinggi, berkeringat banyak, penurunan berat badan, lekas marah dan tekanan darah tinggi. Bentuk paling umum dari hipertiroidisme adalah penyakit Grave. Penyakit ini ditandai dengan mata menonjol, yang disebabkan oleh akumulasi cairan di belakang mata.

Pada autoimun gangguan ini disebabkan tubuh memproduksi antibodi yang mengikat dan mengaktifkan reseptor untuk TSH. Hasilnya adalah produksi hormon tiroid yang berkelanjutan. Malnutrisi juga dapat mengubah produksi hormon tiroid. Hubungan spesifik antara diet dan sintesis hormon tiroid mencerminkan sifat kimia hormon tiroid. Istilah hormon tiroid sebenarnya mengacu pada sepasang hormon serupa yang berasal dari asam amino tirosin. Triiodothyronine (T3) mengandung tiga atom yodium, sedangkan tetraiodothyronine, atau tiroksin (T4), mengandung empat atom yodium. Pada mamalia, reseptor yang sama mengikat kedua hormon. Kelenjar tiroid mensekresi T4, tetapi sel tar mengubah sebagian besar menjadi T3 dengan menghilangkan satu atom yodium. Tanpa yodium yang cukup, kelenjar tiroid tidak dapat mensintesis jumlah T3 dan T4, dan tingkat darah rendah yang dihasilkan dari T3 dan T4 tidak dapat mengerahkan umpan balik negatif yang biasa pada hipotalamus dan hipofisis anterior. Akibatnya, hipofisis terus mensekresi TSH.

Peningkatan kadar TSH menyebabkan pembesaran kelenjar tiroid yang mengakibatkan gondok, yang ditandai dengan pembengkakan leher yang khas. Manusia dan vertebrata lainnya membutuhkan hormon tiroid untuk fungsi normal sel pembentuk tulang, serta untuk percabangan sel saraf selama perkembangan embrio otak. Pada manusia, hipotiroidisme kongenital, mengakibatkan pertumbuhan tulang yang sangat lambat dan perkembangan mental yang buruk. Keadaan ini sering dapat dicegah

walaupun tidak sepenuhnya jika pengobatan dengan hormon tiroid dimulai sejak dini.

9.7.3 Evolusi fungsi hormon

Selama evolusi, fungsi dari hormon tertentu sering berbeda antar spesies. Sebagai contoh adalah hormon tiroid, yang berperan dalam mengatur metabolisme pada banyak garis keturunan evolusi. Pada katak, hormon tiroid (tiroksin) mempunyai fungsi merangsang resorpsi ekor kecebong selama metamorfosis. Beragam fungsi juga telah berevolusi untuk banyak hormon vertebrata yang lainnya.

Prolaktin, produk dari hipofisis anterior, memiliki cakupan kegiatan yang sangat luas. Prolaktin merangsang pertumbuhan kelenjar susu dan sintesis susu pada mamalia, mengatur metabolisme dan reproduksi lemak pada burung, menunda metamorfosis pada amfibi serta mengatur garam dan keseimbangan air pada ikan air tawar. Peran yang bervariasi ini menjelaskan bahwa prolaktin adalah hormon dengan fungsi yang telah terdiversifikasi selama evolusi kelompok vertebrata.

Hormon perangsang melanosit (MSH) adalah contoh yang lain dari hormon hipofisis anterior dengan perbedaan fungsi dalam garis keturunan evolusi. Pada amfibi, ikan, dan reptil, MSH mengatur warna kulit dengan mengontrol distribusi pigmen dalam sel kulit yang disebut melanosit. Pada mamalia, MSH berfungsi dalam rasa lapar dan metabolisme selain warna.

9.7.4 Hormon tropik dan nontropik

Seperti yang telah dibahas, hormon perangsang tiroid (TSH) mengatur kelenjar tiroid. Kegiatan ini menjadikan TSH sebagai contoh hormon tropis. MSH dan prolaktin tidak mengatur sel atau kelenjar endokrin sehingga disebut hormon nontropik. Hormon hipofisis anterior bertindak sebagai hormon tropik: hormon perangsang folikel (FSH), luteinizing hormone (LH), dan adrenocorticotrophic hormon (ACTH). FSH dan LH merangsang aktivitas pria dan gonad wanita, testis dan ovarium. FSH dan LH juga

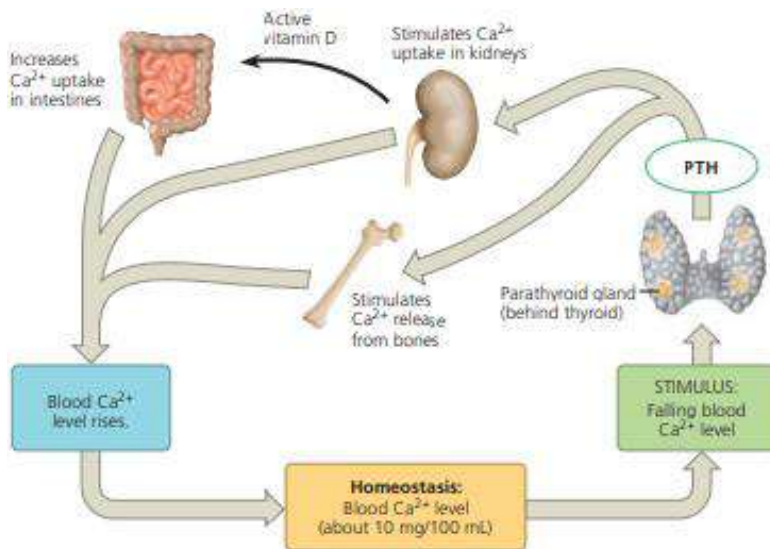
dikenal sebagai gonadotropin, dan keduanya diatur oleh hipotalamus gonadotropin-releasing hormone (GnRH).

9.8 Homeostasis Endokrin

9.8.1 Hormon paratiroid dan vitamin D: kontrol kalsium darah.

Ion kalsium (Ca^{2+}) sangat penting di dalam tubuh. Jika kadar Ca^{2+} darah turun drastis, otot rangka mulai berkontraksi menyebabkan kejang, yang dapat berpotensi terjadinya tetani. Jika kadar Ca^{2+} darah meningkat secara substansial, endapan kalsium fosfat dapat terbentuk di jaringan tubuh, menyebabkan kerusakan organ. Pada mamalia, kelenjar paratiroid, memiliki peran utama dalam regulasi Ca^{2+} darah ketika Ca^{2+} darah turun di bawah (sekitar 10 mg/100 mL), kelenjar ini melepaskan hormon paratiroid (PTH). PTH meningkatkan kadar Ca^{2+} darah melalui efek langsung dan tidak langsung. Dalam tulang, PTH menyebabkan matriks mineral terdekomposisi dan melepaskan Ca^{2+} ke dalam darah. Dalam ginjal, PTH secara langsung merangsang reabsorpsi Ca^{2+} melalui tubulus ginjal.

PTH juga memiliki efek tidak langsung pada ginjal, mendorong konversi vitamin D menjadi hormon aktif. Bentuk vitamin D yang tidak aktif merupakan turunan molekul steroid, diperoleh dari makanan atau disintesis di kulit saat terkena sinar matahari. Aktivasi vitamin D dimulai di hati dan berakhir di ginjal, prosesnya dirangsang oleh PTH. Bentuk aktif vitamin D bekerja langsung pada testis, merangsang penyerapan Ca^{2+} dari makanan dan dengan demikian meningkatkan efek PTH. Saat Ca^{2+} darah naik, loop umpan balik negatif menghambat pelepasan PTH lebih lanjut dari kelenjar paratiroid. Kelenjar tiroid juga dapat berkontribusi pada homeostasis kalsium. Jika Ca^{2+} darah naik di atas normal, kelenjar tiroid akan melepaskan kalsitonin, suatu hormon yang menghambat resorpsi tulang dan meningkatkan pelepasan kelenjar oleh ginjal. Pada ikan, hewan pengerat, dan beberapa hewan lain, kalsitonin diperlukan untuk homeostatis Ca^{2+} .



Gambar 9.19. Peran hormon paratiroid (PTH) dalam mengatur kadar kalsium darah mamalia
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

9.8.2 Hormon adrenal: respon terhadap stres

Kelenjar adrenal vertebrata berhubungan dengan ginjal. Pada mamalia, masing-masing kelenjar adrenal terdiri dari dua kelenjar dengan jenis sel, fungsi dan asal embrio yang berbeda: korteks adrenal pada bagian luar dan medula adrenal pada bagian tengah. Korteks adrenal terdiri sel endokrin sejati, sedangkan sel sekretorik medula adrenal berasal dari jaringan syaraf selama perkembangan embrionik. Jadi, kelenjar adrenal seperti hipofisis, masing-masing kelenjar adrenal adalah kelenjar endokrin dan neuroendokrin yang menyatu.

1. Katekolamin dari medulla adrenal

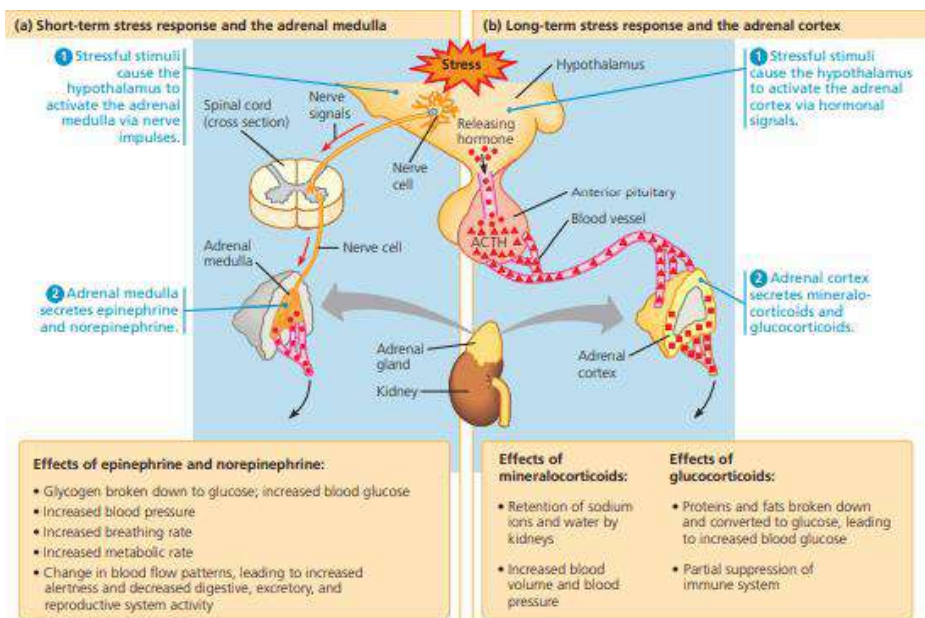
Saat kegiatan jurit malam di kegiatan pramuka tiba-tiba mendengar suara yang menakutkan. Jantung akan berdetak lebih cepat, napas menjadi lebih cepat, otot tegang, dan pikiran panik. Ini dan tanggapan cepat lainnya untuk bahaya yang dirasakan terdiri dari respons "lawan-atau-lari," atau stres akut.

Serangkaian perubahan fisiologis yang terkoordinasi ini dipicu oleh dua hormon medula adrenal, norepinefrin (juga dikenal sebagai noradrenalin) dan epinefrin (adrenalin). Keduanya adalah katekolamin, kelas hormon amina yang disintesis dari asam amino tirosin.

Medula adrenal mensekresi epinefrin dan norepinefrin sebagai respons terhadap stres—apakah kesenangan ekstrem atau bahaya yang mengancam jiwa. Aktivitas utama dari hormon ini adalah untuk meningkatkan jumlah energi kimia yang tersedia untuk penggunaan segera. Baik epinefrin dan norepinefrin meningkatkan kecepatan pemecahan glikogen di hati dan otot rangka, meningkatkan pelepasan glukosa oleh sel-sel hati, dan merangsang pelepasan asam lemak dari sel lemak. Glukosa dan asam lemak yang dilepaskan beredar dalam darah dan dapat digunakan oleh sel-sel tubuh sebagai bahan bakar.

Selain meningkatkan ketersediaan sumber energi, norepinefrin dan epinefrin memberikan efek pada sistem kardiovaskular dan pernapasan. Hormon tersebut meningkatkan denyut jantung dan volume bronkiolus di paru-paru, untuk meningkatkan laju oksigen dan dikirimkan ke sel-sel tubuh. Katekolamin juga mengubah aliran darah, menyebabkan penyempitan beberapa pembuluh darah dan pelebaran lainnya. Epinefrin umumnya memiliki efek yang lebih kuat pada jantung dan tingkat metabolisme, sedangkan peran utama norepinefrin adalah dalam memodulasi tekanan darah.

Sinyal saraf dibawa dari otak melalui involuntary (otonom) neuron mengatur sekresi oleh kelenjar adrenal sumsum belakang. Menanggapi stimulus stres, impuls saraf berjalan ke medula adrenal sehingga memicu pelepasan katekolamin dari sel neurosecretory. Bekerja pada jaringan target, epinefrin dan norepinefrin masing-masing berfungsi dalam jalur neurohormon sederhana. Epinefrin dan norepinefrin juga berfungsi sebagai neurotransmitter.



Gambar 9.20. Pengaturan stress pada kelenjar adrenal
(Sumber: Campbell *et al.*, 2011).

2. Hormon Steroid dari korteks adrenal

Hormon dari korteks adrenal juga berfungsi dalam respon tubuh terhadap stres. Namun berbeda dengan medula adrenal, yang bereaksi terhadap respon dari saraf, korteks adrenal merespon sinyal endokrin. Rangsangan stres menyebabkan hipotalamus mengeluarkan hormon pelepas yang merangsang hipofisis anterior untuk melepaskan hormon tropik ACTH. Ketika ACTH mencapai korteks adrenal melalui aliran darah, merangsang sel-sel endokrin untuk mensintesis dan mengeluarkan steroid yang disebut kortikosteroid.

Dua jenis kortikosteroid utama pada manusia adalah glukokortikoid dan mineralokortikoid. Glukokortikoid memiliki efek pada metabolisme glukosa. Menambah mobilisasi bahan bakar efek glukagon dari pankreas, glukokortikoid mempromosikan sintesis glukosa dari sumber nonkarbohidrat, seperti protein, membuat lebih banyak glukosa sebagai bahan

bakar. Glukokortikoid, seperti kortisol, bekerja pada otot rangka, menyebabkan pemecahan protein otot. Asam amino yang dihasilkan diangkut ke hati dan ginjal, dimana mereka diubah menjadi glukosa dan dilepaskan ke dalam darah. Sintesis dari glukosa dari protein otot menyediakan bahan bakar yang bersirkulasi ketika tubuh membutuhkan lebih banyak glukosa daripada yang dapat dimobilisasi oleh hati dari simpanan glikogennya.

Ketika glukokortikoid dimasukkan ke dalam tubuh pada tingkat lebih tinggi dari normal maka akan menekan komponen tertentu dari sistem kekebalan tubuh. Karena ini efek anti-inflamasi, glukokortikoid kadang-kadang digunakan untuk mengobati penyakit radang seperti radang sendi. Namun, penggunaan jangka panjang dapat memiliki efek samping yang serius.

Mineralokortikoid, efeknya pada metabolisme mineral, bertindak terutama dalam menjaga keseimbangan garam dan air. Misalnya, fungsi aldosteron mineralokortikoid dalam homeostasis ion dan air darah. Volume darah menyebabkan produksi angiotensin II, yang merangsang sekresi aldosteron. Aldosteron merangsang sel-sel di ginjal untuk menyerap kembali ion natrium dan air dari filtrat, meningkatkan tekanan darah dan volume. Aldosteron juga berfungsi dalam respons tubuh terhadap stres berat. Dalam keadaan ini, kenaikan darah meningkatkan tingkat ACTH di mana korteks adrenal mensekresi aldosteron serta glukokortikoid. Produk kortikosteroid dari korteks adrenal meliputi: sejumlah kecil hormon steroid yang berfungsi sebagai hormon seks. Hormon seks yang dihasilkan oleh korteks adrenal adalah terutama hormon "pria" (androgen), dengan jumlah kecil hormon "wanita" (estrogen dan progesteron).

3. Hormon seks

Hormon seks mempengaruhi pertumbuhan, perkembangan, siklus reproduksi serta perilaku seksual, sedangkan kelenjar adrenal mensekresikan sedikit jumlah

hormon-hormon ini. Testis dan ovarium adalah sumber utama hormon seks. Gonad memproduksi dan mensekresikan tiga kategori hormon steroid utama: androgen, estrogen, dan progesterin. Testis terutama mensintesis androgen, yang utama menjadi testosteron. Androgen memiliki peran pada masa pubertas manusia, mereka bertanggung jawab atas perkembangan ciri-ciri kelamin sekunder laki-laki. Konsentrasi tinggi dari androgen menyebabkan suara rendah dan pertumbuhan rambut pada area genital, serta peningkatan massa otot dan tulang.

Estrogen yang paling penting adalah estradiol, yang bertanggung jawab untuk pemeliharaan sistem reproduksi wanita dan untuk pengembangan karakteristik seks sekunder perempuan. Pada mamalia, progesterin, yang meliputi: progesteron, berperan dalam mempersiapkan dan memelihara jaringan rahim yang diperlukan untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan embrio.

Estrogen dan hormon seks gonad lainnya merupakan komponen jalur kaskade hormon. Sintesis hormon ini dikendalikan oleh gonadotropin (FSH dan LH) dari kelenjar hipofisis anterior. Sekresi FSH dan LH dikendalikan oleh GnRH (pelepas gonadotropin hormon) suatu hormon pelepas dari hipotalamus.

4. Pengganggu Endokrin

Antara tahun 1938 dan 1971, beberapa wanita hamil berisiko komplikasi diresepkan estrogen sintetis yang disebut di ethylstilbestrol (DES). Apa yang tidak diketahui sampai tahun 1971 adalah bahwa paparan DES dapat mengubah perkembangan sistem reproduksi pada janin. Secara kolektif, anak perempuan dari ibu yang mengkonsumsi DES lebih sering menderita kelainan reproduksi tertentu, termasuk bentuk vagina dan kanker serviks, perubahan struktur organ reproduksi, dan peningkatan risiko keguguran (aborsi spontan). DES sekarang

dikenal sebagai pengganggu endokrin, molekul asing yang mengganggu fungsi normal jalur hormon.

Ada beberapa hipotesis bahwa molekul dilingkungan juga bertindak sebagai pengganggu endokrin. Beberapa molekul mirip estrogen, seperti yang ada dalam kedelai dan produk tanaman yang dapat dimakan lainnya dapat menurunkan risiko kanker payudara. Contoh lainnya seperti bisphenol A yang merupakan bahan kimia untuk membuat beberapa plastik, telah dipelajari potensi gangguannya pada reproduksi dan perkembangan normal.

9.9 Forum Diskusi

Diskusikan bersama teman sekelompokmu!

Bagaimana hubungan antara endokrin dengan sistem saraf?

9.10 Uji Kompetensi

Kerjakan soal di bawah ini dengan tepat!

1. Apa perbedaan hormon larut air dan hormon larut lemak?
2. Bagaimana mekanisme homeostasis endokrin?
3. Bagaimana peran hormon paratiroid (PTH) dalam mengatur kadar kalsium darah mamalia?

DAFTAR PUSTAKA

- Campbell, Neil A., Jane B. Reece., Michael L. Chain., Steven A. Wasserman., Peter V. minorsky., Robert B. Jackson. (2011). Biologi. Edisi kesembilan. Erlangga. Jakarta.
- Manurung, Rostianah., Bolon, C.M.T. dan Manurung, Nixon. (2017). *Asuhan Keperawatan Sistem Endokrin Dilengkapi Mind Mapping & Asuhan Keperawatan Nansa Nic Noc*. Deepublish. Yogyakarta.

BAB 10

SISTEM REPRODUKSI

Oleh Wahyu Anggar Wanto

10.1 Pendahuluan

Reproduksi adalah salah satu kemampuan hewan untuk menghasilkan keturunan yang mewarisi sifat dari induknya dan meneruskan kelangsungan kehidupan spesiesnya. Apabila suatu spesies tidak mampu melakukan reproduksi maka spesies tersebut akan cepat punah dan hilang dari bumi. Bahkan spesies yang memiliki siklus reproduksi yang cukup lama akan membuat spesies tersebut mampu terancam punah dalam waktu singkat. Jika suatu spesies hilang atau punah, maka akan membuat rantai makanan juga berubah dan berpengaruh pada keseimbangan lingkungan.

Reproduksi hewan dapat dilakukan secara aseksual maupun seksual. Konsep reproduksi aseksual didefinisikan sebagai reproduksi tanpa bertemunya sel sperma jantan dan sel telur betina. Walaupun konsep ini tidak seterusnya tepat, akan tetapi dianggap paling mudah dipahami oleh banyak orang. Pengertian reproduksi seksual adalah reproduksi dicirikan dengan bertemunya sel sperma dan sel telur atau biasa disebut proses fertilisasi. Selain kedua jenis reproduksi di atas, beberapa hewan mampu melakukan partenogenesis, ginogenesis dan androgenesis, akan tetapi kelompok hewan ini hanya sedikit.

10.1.1 Sistem Reproduksi Invertebrata

A. Aseksual

Reproduksi aseksual terjadi pada banyak invertebrata (hewan tanpa tulang belakang). Beberapa contoh reproduksi aseksual adalah pembelahan, pertunasan (pembentukan tunas),

fragmentasi – regenerasi dan sporulasi. Reproduksi dengan pembelahan hanya terjadi pada protozoa (hewan bersel satu), seperti amuba, paramesium, dan euglena. Proses pembelahan diawali dengan pembelahan inti sel menjadi dua, dilanjutkan dengan pembelahan sitoplasma menjadi dua bagian yang masing-masing membungkus masing-masing inti. Kemudian, bagian tengah sitoplasma menyempit dan terpisah sehingga membentuk dua individu. Jika kondisi lingkungan tidak mendukung, amuba akan melindungi dirinya dengan membentuk kista dengan dinding yang sangat tahan lama. Amoeba akan membelah berkali-kali untuk menghasilkan banyak individu baru yang lebih kecil di dalam kista. Ketika kondisi lingkungan membaik, dinding kista pecah dan muncul individu baru, tumbuh dan berkembang menjadi amuba dewasa.

Tunas adalah suatu cara perkembangbiakan dimana individu baru merupakan bagian tubuh induk yang dilepaskan, kemudian tumbuh dan berkembang menjadi individu baru. Contoh hewan yang berkembang biak dengan membentuk tunas adalah *Hydra* sp. Individu *Hydra* baru terbentuk dari bagian tubuh *Hydra* dewasa. Bila sudah cukup besar, tunas akan terpisah dari tubuh induknya. Hewan lain yang berkembang biak dengan cara bertunas antara lain ubur-ubur, terumbu karang, dan anemon laut.

Fragmentasi adalah reproduksi dengan cara memotong bagian tubuh yang kemudian tumbuh menjadi individu baru. Hewan yang berkembang biak dengan cara fragmentasi adalah Planaria. Cacing Planaria mempunyai kemampuan regenerasi yang sangat tinggi. Seekor cacing Planaria dipotong menjadi dua bagian, masing-masing bagian akan tumbuh dan berkembang menjadi dua cacing Planaria.

Spora adalah proses pembelahan ganda untuk menghasilkan spora. Hewan yang berkembang biak dengan spora adalah Plasmodium sp. Plasmodium adalah sejenis protozoa bersel tunggal yang diketahui menyebabkan malaria. Plasmodium melewati dua tahap dalam siklus hidupnya, yaitu

tahap reproduksi generatif dan vegetatif. Tahap reproduksi generatif terjadi di dalam tubuh nyamuk *Anopheles* sp. betina, sedangkan fase vegetatif terjadi pada tubuh penderita malaria.

B. Seksual

Porifera bereproduksi secara aseksual dan seksual. Reproduksi aseksual terjadi melalui pembentukan tunas dan gemmule. Gemmule juga dikenal sebagai tunas internal. Gemmule diproduksi sebelum musim dingin di tubuh Porifera yang hidup di air tawar. Secara seksual, melalui penyatuan sperma dengan sel sel telur, pembuahan terjadi di luar pori-pori tubuh.

Coelenterata bereproduksi aseksual dengan pembentukan tunas. Pembentukan tunas selalu terjadi pada Coelenterata yang berbentuk polip. Tunas tumbuh di dekat kaki polip dan akan tetap melekat pada tubuh induknya sehingga membentuk koloni. Reproduksi seksual dilakukan dengan pembentukan gamet (ovum dengan sperma). Gamet dihasilkan oleh seluruh Coelenterata bentuk medusa dan beberapa Coelenterata bentuk polip. Contoh Coelenterata yang berbentuk polip dan membentuk gamet adalah *Hydra* sp.

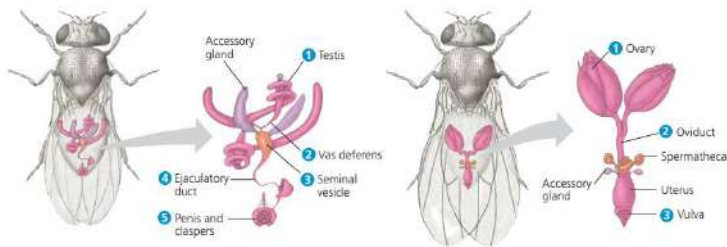
Alat reproduksi jantan (testis) dan alat reproduksi betina (ovarium) **Platyhelminthes** terdapat dalam satu individu sehingga disebut hermafrodit. Organ reproduksi terletak di bagian perut (ventral). Platyhelminthes bereproduksi secara seksual dan aseksual. Reproduksi seksual menghasilkan gamet. Pembuahan sel telur oleh sperma terjadi di dalam tubuh (internal). Inseminasi bisa dilakukan sendiri atau bersama pasangan lain. Tidak semua Platyhelminthes dapat bereproduksi secara aseksual. Beberapa kelompok platipus dapat bereproduksi secara aseksual melalui fragmentasi, kemudian meregenerasi bagian tubuhnya menjadi individu baru.

Nemathelminthes biasanya berkembang biak secara seksual karena sistem reproduksinya bersifat gonad, artinya alat reproduksi jantan dan betina terpisah pada individu yang berbeda. Fertilisasi terjadi secara internal. Hasil pembuahannya

bisa mencapai lebih dari 100.000 butir telur per hari. Saat berada di lingkungan yang tidak menguntungkan, telur dapat membentuk kista untuk melindungi dirinya.

Cacing **Annelida** biasanya berkembang biak secara seksual dengan membentuk gamet, menggunakan klitelum sebagai alat kawin. Clitellum = struktur reproduksi yang mengeluarkan cairan sperma dan membentuk kokon tempat telur disimpan. Namun ada juga spesies yang berkembang biak dengan fragmentasi, setelah itu mereka beregenerasi. Organ seks Annelida ada yang menyatu dengan individu (hermafrodit) dan ada pula yang dipisahkan dari individu lain (gonochoris) oleh larva trochophore yang berenang bebas.

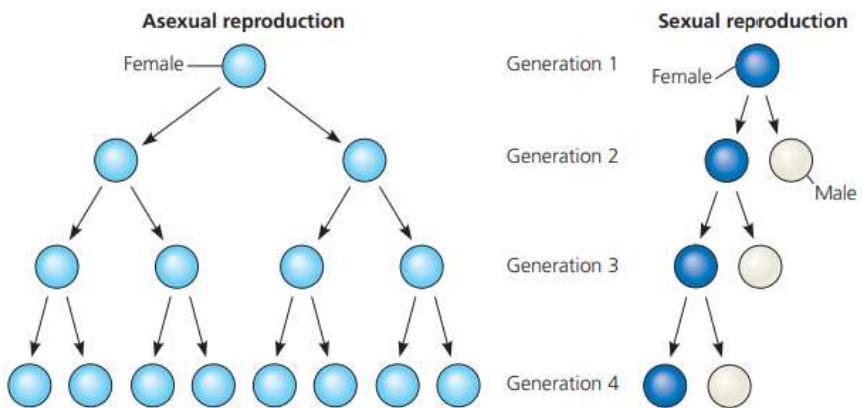
Biasanya artropoda bersifat dioecious (satu individu, satu jenis kelamin), hanya pada kasus-kasus tertentu bersifat hermafrodit. Alat reproduksi pria terdiri dari sperm tube yang menghubungkan vas deferens dan vas deferens, kemudian menuju ke kelenjar ejakulasi. Sedangkan pada wanita, sepasang ovarium dilengkapi dengan tubulus seminiferus yang berfungsi mengangkut sperma pria ke dalam vagina.



Gambar 10.1 Sistem Reproduksi Lalat Buah
(Campbell, et. All., 2004)

Mollusca bereproduksi secara seksual dan masing-masing organ seksual saling terpisah pada individu lain. Fertilisasi dilakukan secara internal dan eksternal untuk menghasilkan telur. Telur berkembang menjadi larva dan berkembang lagi menjadi individu dewasa.

Secara umum filum **Echinodermata**, mengalami seks secara terpisah dengan beberapa pengecualian. Gonad yang relatif besar terletak di sebelah luar dengan pembuluh sederhana, jumlah ovum banyak dan pembuahan terjadi dalam air, larva mikroskopis, bersilia dan transparan serta biasanya hidup bebas dengan berenang-renang dalam air, bermetamorfosis yang kompleks. Beberapa spesies vivipar, beberapa berkembang biak dengan aseksual yaitu dengan pembelahan sel, memiliki daya regenerasi yang besar sekali bila terdapat bagian yang rusak atau terlepas.



Gambar 10.2 Perbedaan Sistem Reproduksi Seksual dan Aseksual
(Campbell, et. All., 2004)

10.1.2 Sistem Reproduksi Vertebrata

A. Sistem Reproduksi Pada Pisces

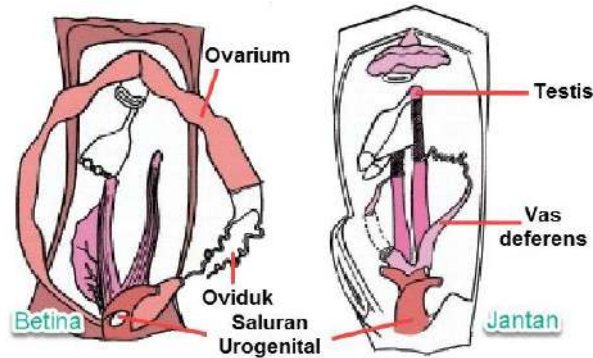
Sepasang testis pada alat reproduksi jantan ikan menghasilkan sperma yang berbentuk seperti telur. Testis kanan lebih tinggi dari kiri, epididimis, vas deferens (saluran yang membawa sperma keluar dari testis), ginjal, saluran kemih, dan kloaka. Terletak pada bagian bawah tulang belakang, testis ikan yang merupakan organ reproduksi jantan berjumlah dua (berpasangan). Struktur testis ikan dilapisi oleh sel

spermatogenik dan membentuk kantong yang berlipat - lipat. Saat memasuki masa kawin testis pejantan akan mulai membesar dan sperma pejantan akan bergerak melalui vas deferens menuju kloaka. Testis menggantung di dinding bagian dalam rongga perut oleh mesenterium. Bentuknya oval dengan permukaan yang kasar. Saluran genital pada elasmobranch, bagian tubulus mesonefrik anterior menjadi saluran aferen, menghubungkan testis dan mesonefros, yang disebut vas deferens. Aferen posterior juga melebar membentuk vesikula seminalis. Vas deferens mengalir ke kloaka. Pada ikan teleost, saluran urin dan saluran reproduksi tidak menyatu ke kloaka.

Ada dua jenis pembuahan pada ikan: pembuahan internal dan pembuahan eksternal. Namun sebagian besar spesies ikan melakukan pembuahan di luar ruangan (fertilisasi eksternal). Ikan jantan yang membuahi sel telur di luar tubuh disebut ikan ovipar. Proses pembuahan sel telur (oosit) oleh sperma terjadi di luar tubuh ikan, dimana sperma masuk ke dalam sel telur melalui lubang yang disebut lobulus. Umumnya hanya satu sperma yang bisa masuk ke dalam sel telur. Sel telur yang dibuahi oleh sel sperma disebut zigot. Ikan yang melakukan pembuahan secara internal disebut ikan ovovivipar. Ikan jenis ini berkembang biak dengan cara melahirkan anaknya. Pembuahan terjadi di dalam tubuh ikan betina (fertilisasi internal). Janin tumbuh di dalam tubuh wanita dan melahirkan seorang anak yang menyerupai individu dewasa. Contoh ikan yang berkembang biak secara ovovivipar adalah platy, guppy, dan molly. Kelangsungan hidup anak hasil ovovivipar lebih baik, namun karena daya dukung ibu terbatas (seperti pada manusia), sehingga jumlah anak per kelahiran tidak banyak.

Sistem Reproduksi Wanita terdiri atas ovarium yang padat tetapi tidak terlalu kompak dan terletak di anterior rongga perut. Saat dewasa, hanya ovarium kanan yang berkembang. Ovarium pada teleost berbentuk lingkaran dan berpasangan. Saluran genital elasmobranch berpasangan, menyatu di bagian anterior, dan mempunyai ostium yang dikelilingi oleh fimbriae. Tuba falopii menyempit dari depan ke belakang. Pada bagian rahim semakin

membesar, dan berakhir di kloaka. Saluran telur teleost lebih pendek dan terhubung langsung ke ovarium. Teleost tidak memiliki kloaka. Ovarium ikan menghasilkan banyak telur. Ukuran telur berbeda-beda tergantung jenis ikannya, ada yang besar dan ada yang kecil. Besar kecilnya telur menentukan jumlah telur yang dimiliki setiap induk. Ikan yang telurnya besar seperti nila dan arwana memiliki jumlah telur yang lebih sedikit dibandingkan ikan yang telurnya kecil seperti cupang dan ikan mas. Hal ini disebabkan kemampuan induk dalam membawa telur tersebut. Ukuran telur pada ikan ditentukan oleh ukuran kuning telur. Semakin besar kuning telurnya, semakin besar peluang kelangsungan hidup embrio dan semakin besar pula ukuran telurnya.



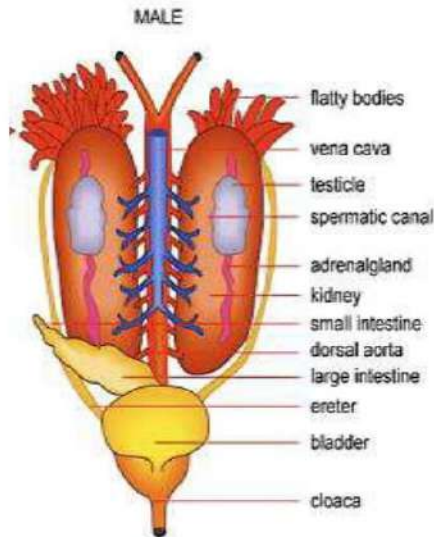
Gambar 10.3 Sistem Genitalia Ikan
(Purnamasari dan Santi, 2017)

B. Sistem Reproduksi Pada Amphibi

Sistem Reproduksi Jantan

- Terdapat sepasang buah zakar berwarna putih kekuningan yang tergantung pada mesenterium. Di bagian dekat ekor terdapat bantalan lemak yang terletak pada posterior rongga perut.
- Saluran kelamin pada amfibi dimulai dengan tubulus ginjal yang bertindak sebagai saluran aferen dan mengangkut sperma dari testis ke saluran mesonefrik. Pada beberapa

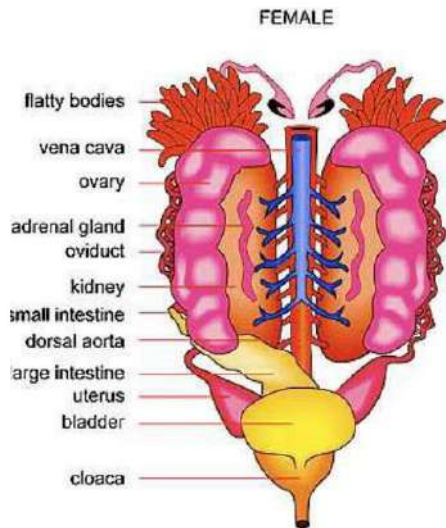
spesies, saluran mesonefros melebar di dekat kloaka membentuk vesikula seminalis (penyimpanan sperma sementara). Vesikula seminalis membesar hanya pada saat memasuki masa reproduksi. Vas aferen adalah saluran sempit yang keluar dari testis dan meluas ke medial hingga bagian kranial ginjal.



Gambar 10.4 Sistem Reproduksi Amfibi Jantan
(Purnamasari dan Santi, 2017)

Sistem Reproduksi Betina

Ovarium berjumlah sepasang, terletak pada sebelah kranial dan menempel pada jaringan lemak (korpus adiposum). Baik ovarium maupun korpus adiposum berasal dari jaringan plica gametalis yaitu gonalis dan pars progonalis. Ovarium digantungkan oleh jaringan mesovarium. Saluran oviduct amfibi merupakan saluran yang berbentuk seperti labirin. Oviduk dimulai dengan struktur yang mirip corong (infundibulum) dengan lubangnya yang disebut oskum abdominal. Tuba fallopi memiliki perpanjangan ke daerah ekor yang disebut tuba mesonefrik dan berakhir di sistem saluran pembuangan (kloaka).



Gambar 10.5 Sistem Reproduksi Amfibi Betina
(Purnamasari dan Santi, 2017)

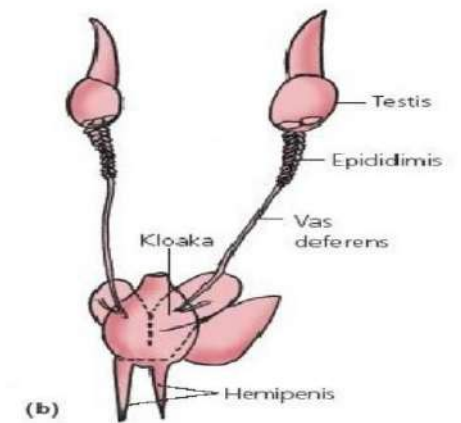
Pembuahan Eksternal

Pada sistem reproduksi ikan dan amfibi, pembuahan terjadi di luar tubuh. Karena kemungkinan pembuahan lebih rendah dibandingkan dengan pembuahan internal, biasanya lebih banyak sel telur yang dihasilkan. Ketika membedah katak betina yang sedang akan bertelur biasanya terdapat struktur hitam yang memenuhi rongga perut. Struktur tersebut adalah ovarium yang berisi telur dengan jumlahnya ribuan. Anatomi katak jantan dan betina juga menyesuaikan hal tersebut. Bagian leher katak betina terdapat cekungan dan kaki depan katak jantan memiliki permukaan yang lebih kasar. Hal ini dimaksudkan untuk saling mengunci saat terjadinya fertilisasi.

C. Sistem Reproduksi Pada Reptil

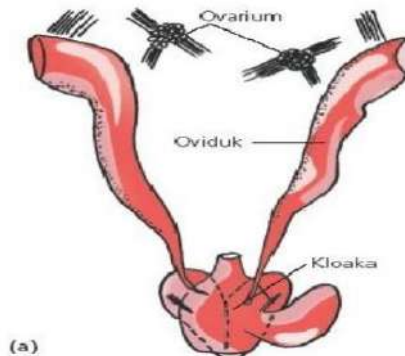
Sistem reproduksi jantan terdiri dari testis yang tersusun berpasangan di bagian dorsal rongga perut, berbentuk lonjong, kecil, berwarna keputihan atau bergaris. Pada kadal dan ular, salah satu testis terletak lebih anterior dibandingkan yang lain. Pada masa kawin, ukuran testis membesar. Mesonefros berfungsi

sebagai saluran reproduksi yang menuju ke kloaka. Beberapa duktus wolfian membentuk gulungan di dekat testis dan membentuk struktur epididimis. Tubulus seminiferus dengan epididymis dihubungkan oleh mesonefros. Duktus deferens pada reptil biasanya terhubung dengan ureter dan alirannya menjadi satu memasuki sinus urogenital pendek, yang bermuara pada kloaka.



Gambar 10.6 Sistem Reproduksi Reptil Jantan
(Purnamasari dan Santi, 2017)

Sistem reproduksi betina memiliki sepasang ovarium, berbentuk lonjong, dengan tonjolan di permukaannya. Letaknya tepat di bagian ventral tulang belakang. Saluran tuba berbentuk lingkaran dan panjang, yang biasanya ditempati oleh organ reproduksi. Bagian anterior bermuara ke dalam rongga ventral, sedangkan bagian posterior bermuara ke kloaka. Dindingnya terdapat kelenjar, bagian anteriornya mengeluarkan albumin yang digunakan untuk menutupi sel telur, kecuali pada ular dan kadal. Bagian posteriornya bertindak sebagai kelenjar kerak atau shell gland yang akan menghasilkan kapur untuk pembentukan cangkang telur.

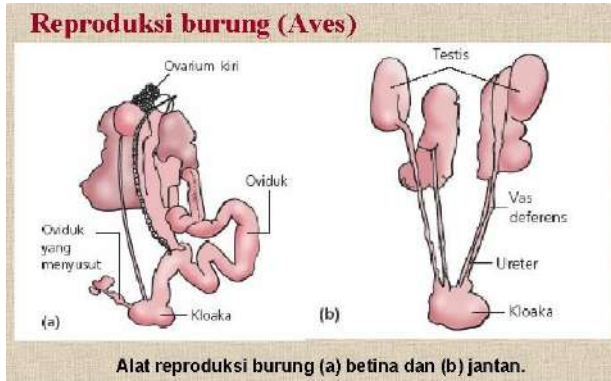


Gambar 10.7 Sistem Reproduksi Reptil Betina
(Purnamasari dan Santi, 2017)

D. Sistem Reproduksi Pada Aves

Kelompok burung ini merupakan hewan yang bertelur. Burung tidak mempunyai organ reproduksi luar dan pembuahan terjadi secara internal. Hal ini terjadi ketika kloaka menempel satu sama lain. Sistem reproduksi jantan terdiri atas testis berpasangan, lonjong atau bulat, permukaannya halus dan terletak di sebelah lobus ventral. Ukurannya bertambah besar selama musim kawin. Pada organ ini sperma diproduksi dan disimpan.

Saluran kelamin terdiri atas tubulus mesonefrik yang membentuk saluran aferen dan epididimis. Ductus wolffian berbentuk melingkar membentuk vas deferens. Pada burung berukuran kecil, saluran distal yang sangat panjang membentuk duktus deferens, yang membesar membentuk ampula dan bermuara ke kloaka sebagai saluran ejakulasi. Sistem reproduksi betina terdiri atas ovarium dan tuba falopii. Kecuali elang, hanya ovarium kiri burung, yang terletak di bagian dorsal rongga perut, yang berkembang. Maka dari itu hanya tuba falopii sisi kiri yang berkembang dan terbagi menjadi beberapa bagian. Bagian anterior berbentuk corong dan mempunyai bukaan yang mengarah ke rongga tubuh berupa ostium yang dikelilingi fimbriae. Pada bagian posterior terdapat magnum yang mengeluarkan albumin.



Gambar 10.8 Sistem Reproduksi Aves
(Purnamasari dan Santi, 2017)

Proses Fertilisasi

Betina dari kelas Aves hanya memiliki satu ovarium, yaitu ovarium kiri. Ovarium kanan belum berkembang sempurna dan mengecil sehingga disebut rudimenter. Ovarium melekat pada corong untuk menerima sel sperma dan dilanjutkan ke saluran tuba falopii. Ujung tuba falopii meluas ke dalam rahim dan bermuara ke kloaka. Pada burung jantan, terdapat sepasang buah zakar yang terletak di sebelah ureter dan membuka ke dalam kloaka. Pembuahan akan terjadi di ujung tuba falopii saat sperma masuk ke tuba falopii. Sel telur yang telah dibuahi akan bergerak menuju kloaka. Selama perjalanan menuju kloaka di daerah tuba falopii, sel telur yang telah dibuahi oleh sperma akan dikelilingi oleh zat kapur yang akan membentuk cangkang telur. Telur dapat menetas jika induknya mengeraminya. Suhu tubuh induk akan membantu embrio berkembang menjadi anakan. Burung muda menetas dengan bantuan paruhnya untuk memecahkan cangkang telur dari dalam. Kebanyakan anakan unggas yang baru menetas matanya masih tertutup, tidak dapat menemukan makanannya sendiri dan harus diberi makan induknya di dalam sarang.

E. Sistem Reproduksi Pada Mammalia (Manusia)

Sistem Reproduksi Pada Pria

Alat reproduksi pria meliputi organ reproduksi internal dan organ reproduksi eksternal. Alat reproduksi bagian dalam laki-laki meliputi testis, saluran reproduksi dan kelenjar aksesori.

1. Testis

Testis merupakan alat reproduksi pria yang terletak di dalam skrotum dan berbentuk lonjong. Testis berpasangan (testis = jamak). Testis berjumlah sepasang dan terletak di sisi kiri dan kanan bagian posterior penis. Testis kiri dan kanan dibatasi oleh septum yang terbuat dari serat jaringan ikat dan otot polos. Fungsi umum testis adalah menghasilkan sperma dan hormon seks pria yang disebut testosteron.

2. Saluran reproduksi

Saluran reproduksi pria meliputi epididimis, vas deferens, saluran ejakulasi dan uretra.

a. Epididimis

Di dalam skrotum terdapat saluran berkelok-kelok yang disebut epididimis yang mengarah keluar dari testis. Sama seperti testis, epididimis juga berjumlah sepasang di sebelah kanan dan kiri. Sperma dapat disimpan di epididimis hingga cukup matang untuk dipindahkan ke vas deferens.

b. Vas Deferens

Perpanjangan dari epididimis adalah vas deferens atau (ductus deferens) yang mengarah ke arah atas tubuh. Vas deferens tidak menyatu pada testis dan ujung vas deferens terletak di prostat. Vas deferens berfungsi sebagai saluran sperma berpindah dari epididimis menuju kantung sperma atau vesikula seminalis.

c. Saluran Ejakulasi

Vesikula seminalis dihubungkan ke uretra dengan saluran pendek yang disebut saluran ejakulasi. Saluran ini berfungsi mengeluarkan sperma ke dalam uretra.

d. Uretra

Uretra yang terletak di penis merupakan organ reproduksi eksternal pria terakhir. Uretra berfungsi sebagai saluran reproduksi yang berasal dari kantung sperma dan merupakan saluran keluarnya urin dari kandung kemih.

3. Kelenjar Asesoris

Saat sperma melewati saluran ejakulasi, berbagai cairan genital yang disekresikan oleh kelenjar aksesori ditambahkan. Cairan ini membantu menjaga kelangsungan hidup dan pergerakan sperma. Kelenjar aksesori pria terdiri atas kantong sperma, kelenjar prostat dan Cowper

a. Vesikula seminalis

Vesikula seminalis, juga dikenal sebagai kantung sperma, terletak di belakang kandung kemih dan berlekuk. Dinding vesikula seminalis menghasilkan nutrisi yang menyediakan sumber makanan bagi sperma.

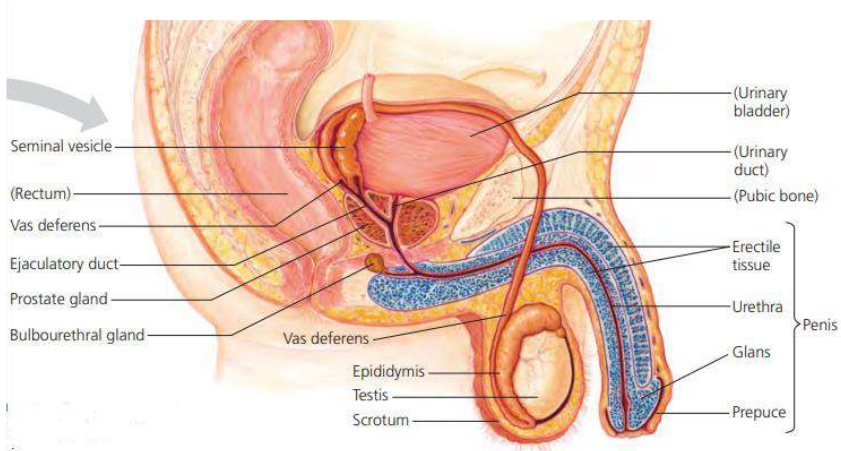
b. Kelenjar Prostat

Prostat mengelilingi bagian awal uretra dan terletak di dasar kandung kemih. Prostat menghasilkan getah yang mengandung kolesterol, garam, dan fosfolipid yang berperan penting dalam kelangsungan hidup sperma.

c. Kelenjar Cowper

Kelenjar Cowper (kelenjar bulbo-urethral) merupakan kelenjar dengan saluran yang mengarah langsung ke uretra. Kelenjar Cowper menghasilkan

getah yang memiliki pH basa untuk membantu sperma mampu menembus kadar asam mulut rahim.



Gambar 10.9 Alat Reproduksi Laki – laki (atas : eksterna)
(Campbell, et. All. 2004)

Organ Reproduksi Luar

Organ reproduksi eksternal pria meliputi penis dan skrotum.

1. Penis

Penis berisi jaringan spons yang membentuk tiga struktur internal penis. Jaringan spons korpus kavernosa terdapat di dua ronggai bagian atas. Di bagian bawah uretra terdapat rongga ketiga, yang terdiri dari jaringan spons dan dikenal sebagai corpus spongiosum. Uretra penis dikelilingi oleh jaringan ereksi yang berisi ruang-ruang berisi banyak pembuluh darah dan ujung saraf sensorik. Ruang tersebut terisi darah saat terjadi rangsangan, sehingga menyebabkan penis ereksi dan menegang.

2. Skrotum

Skrotum (kantung zakar) adalah kantung berisi buah zakar (testis). Terdapat sepasang skrotum yaitu skrotum kanan dan skrotum kiri. Otot dartos dan jaringan ikat membentuk sekat antara skrotum kanan dan kiri. Kontraksi

dan relaksasi skrotum disebabkan oleh pengaturan otot dartos. Otot kremaster, yang merupakan kelanjutan dari otot lurik pada dinding perut, juga menghasilkan serabut otot di dalam skrotum. Otot ini bertindak sebagai pengatur suhu disekitar testis agar kondisinya relatif homeostasis.

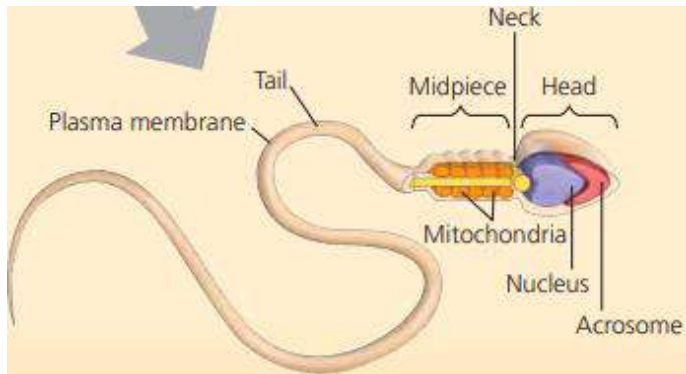
Spermatogenesis

Spermatogenesis terjadi di testis, terutama di tubulus seminiferus. Pematangan sel terjadi di tubulus seminiferus dan kemudian disimpan di epididimis. Dinding tubulus seminiferus terdiri dari jaringan ikat dan jaringan epitel germinal yang berfungsi dalam spermatogenesis. Duri tubulus seminiferus terdapat pada rongga testis (lobulus testis). Testis biasanya memiliki sekitar 250 lobulus testis. Tubulus seminiferus mengandung sejumlah besar sel epitel germinal, yang secara kolektif dikenal sebagai spermatogonia. Dua hingga tiga lapisan sel epitel terluar di tubulus seminiferus mengandung spermatogonia.

Spermatogonia, yang bersifat diploid ($2n$ atau memiliki 23 kromosom berpasangan), berkumpul di tepi membran epitel germinal di bagian yang disebut Spermatogonia tipe A. Spermatogonia tipe A membelah secara mitosis menjadi spermatogonia tipe B. Setelah pembelahan berulang, spermatogonia tipe B berubah menjadi spermatosit primer yang tetap diploid. Setelah beberapa minggu, spermatosit primer menjalani meiosis dan membelah membentuk spermatosit sekunder haploid. Empat spermatid terbentuk setelah spermatosit sekunder mengalami pembelahan lagi melalui meiolisis. Spermatid adalah sperma yang tidak memiliki ekor dan memiliki jumlah setengah kromosom tubuh atau bisa disebut haploid. Setiap spermatid akan berubah menjadi spermatozoa (sperma) saat sudah mencapai tahapan reproduksi dewasa.

Proses pengubahan spermatogonia menjadi sperma disebut spermatogenesis. Saat sperma pertama kali terbentuk, bentuknya seperti sel epitel. Namun, saat spermatid sekunder mulai

memanjang menjadi sperma, akan muncul bentuk yang terdiri dari kepala dan ekor. Kepala sperma terdiri dari sel-sel dengan inti yang tebal dan sitoplasma yang hanya sedikit. Pada permukaan membran di ujung kepala sperma terdapat cangkang tebal yang disebut akrosom. Untaian enzim hialuronidase dan proteinase yang terdapat pada akrosom bertanggung jawab untuk memecah lapisan luar sel telur. Tubuh sperma yang mengandung mitokondria terletak di tengah antara kepala dan ekor sperma. Fungsi sel Sertoli, yang berperan ganda dalam menyediakan makanan dan mengendalikan proses spermatogenesis, terlibat dalam semua fase perkembangan sperma.



Gambar 10.10 Struktur Sperma

(Campbell, et. All. 2004)

Sistem Reproduksi Wanita

Sistem reproduksi wanita meliputi juga organ bagian luar dan bagian dalam yang sebagian besar terletak di rongga panggul. Organ bagian luar (vagina) berfungsi sebagai alat senggama, sedangkan organ bagian dalam berfungsi untuk ovulasi, pembuahan sel telur, pengangkutan blastokista, implantasi, perkembangan janin dan kelahiran. Fungsi sistem reproduksi wanita dikendalikan/diatur oleh hormon gonadotropin/steroid dari sumbu hormon thalamus – hipotalamus – hipofisis – adrenal – ovarium. Selain itu, terdapat organ/sistem non-genital/ekstra-

genital lainnya yang juga terpengaruh oleh siklus reproduksi seperti payudara, beberapa area kulit, pigmentasi, dll.

Organ Reproduksi Internal Wanita

1. Uterus atau Rahim

Organ berotot yang berbentuk seperti buah pir dan dilindungi oleh peritoneum (serosa). Organ ini berfungsi sebagai lokasi retensi, pemberian nutrisi, dan implantasi zigot selama kehamilan. Saat persalinan, kontraksi dinding rahim dan pembukaan leher rahim menyebabkan keluarnya bayi dari tubuh ibunya.

2. Serviks uteri

Bagian terbawah rahim yang membatasi dan menjadi pintu masuk ke dalam rahim. Serviks terdiri dari tiga komponen utama yaitu otot polos, kolagen dan glukosamin yang menjadi jaringan ikat serta elastin. Bagian luar rongga vagina disebut sebagai "uterine portio cervicis", dan ostium uterus internal yang dilapisi dengan epitel skuamo-kolumnar dan mukosa internal. Apabila seorang wanita belum pernah melahirkan lubang ostium externum akan berbentuk bulat kecil, sedangkan jika sudah pernah memiliki riwayat melahirkan, maka ostium tersebut akan berbentuk garis melintang. Leher rahim terletak sejajar dengan tulang belakang iskiadika, yaitu bagian tulang ekor bagian bawah. Kelenjar lendir serviks menghasilkan lendir serviks yang mengandung glikoprotein kaya karbohidrat (lendir) dan berbagai larutan garam, peptida, serta air. Ketebalan lapisan dan kekentalan lendir serviks dipengaruhi oleh siklus menstruasi.

3. Corpus uteri

Corpus uteri terdiri atas: lapisan luar yaitu serosa/peritoneum yang menempel pada ligamen latum uterus di daerah intraabdomen. Lapisan tengah otot

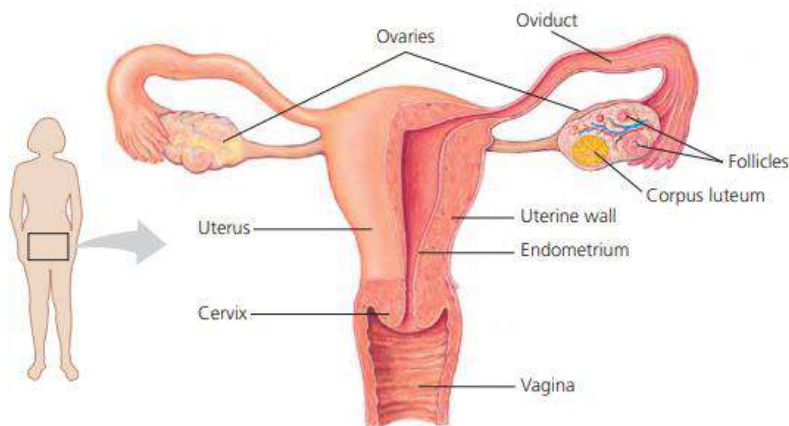
uterus/miometrium berupa tiga lapis otot polos (dari luar menuju dalam serat otot longitudinal, anyaman otot dan otot melingkar), lapisan dalam atau endometrium yang melapisi dinding sebelah dalam rahim mengalami penebalan dan penipisan selama siklus menstruasi di bawah pengaruh hormon ovarium. Terletak di rongga perut, corpus uteri diposisikan horizontal dengan sedikit "membungkuk" ke depan, dan bagian bawah rahim terletak di atas kandung kemih. Rasio ukuran corpus uteri terhadap leher rahim berubah - berubah selama masa pertumbuhan dan perkembangan seorang wanita. Suplai darah ke rahim terutama berasal dari arteri uterina, cabang dari arteri hipogastrik/iliaka interna dan arteri ovarium yang merupakan cabang dari aorta abdominalis.

4. Salping / Tuba Falopii

Sepasang saluran kiri-kanan sepanjang 8 hingga 14 cm berfungsi sebagai jalur pengangkutan sel telur dari ovarium ke rongga rahim. Dinding tuba falopii terdiri dari tiga lapisan: serosa, otot (membujur dan melingkar) dan mukosa dengan epitel bersilia. Tuba falopii terbagi menjadi pars interstitialis, pars isthmica, pars ampularis, serta pars infundibulum dan fimbria, dengan karakteristik yang berbeda dalam hal keberadaan silia dan ketebalan dinding di setiap bagian. Pars Isthmica (proksimal/segmental) merupakan bagian yang lumennya paling sempit, tempat sfingter uterus mengontrol pergerakan gamet. Pars ampularis (tengah/tuba) tempat terjadinya pembuahan biasanya adalah daerah ampula/infundibulum, dan pada kasus kehamilan ektopik (patologis), implantasi biasanya terjadi di bagian dinding saluran ini. Pars infundibulum (distal) dilengkapi dengan fimbriae dan saluran ventral yang terbuka di ujungnya, menempel pada permukaan ovarium. Fungsi fimbriae adalah untuk "menangkap" sel telur yang muncul saat ovulasi dari permukaan ovarium dan mengangkutnya ke tuba falopi.

5. Ovarium

Organ endokrin berbentuk lonjong, terletak pada rongga peritoneum, berpasangan kiri dan kanan. Ditutupi oleh lapisan mesovarium yang berfungsi sebagai jaringan ikat dan jalan bagi pembuluh darah dan saraf. Ovarium mempunyai fungsi membentuk dan mematangkan folikel menjadi sel telur, ovulasi, mensintesis dan mensekresi hormon steroid (estrogen dan progesteron) setelah ovulasi. Ovarium terhubung ke tuba falopi melalui perlekatan fimbriae. Fimbriae “menangkap” sel telur yang dilepaskan selama ovulasi. Ovarium difiksasi oleh ligamen ovarium itu sendiri, ligamen infundibulopelvicum dan jaringan ikat mesovarium. Pembuluh darah berasal dari cabang aorta perut bagian bawah.



Gambar 10.11 Genitalia Interna Wanita
(Campbell, et. All. 2004)

Organ Reproduksi Eksternal Wanita

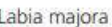
Organ reproduksi eksternal wanita atau vulva terdiri atas mons pubis, labia mayora, labia minora, vestibulum, orificium vagina, vagina dan perineum. Mons pubis berbentuk mirip bibir

dengan lapisan lemak yang tebal dan pada masa pubertas, area ini mulai ditumbuhi rambut kemaluan. Labia mayora merupakan lapisan lemak yang menghubungkan tulang kemaluan ke bawah dan ke belakang, mengandung banyak pleksus vena. Struktur embriologi labia mayora berhomologi dengan skrotum manusia. Labia minora jaringan lipatan tipis di belakang labia mayora, tanpa folikel rambut. Ada banyak pembuluh darah, otot polos dan ujung serabut saraf. Klitoris terdiri atas kepala/kelenjar klitoris yang terletak di bagian atas vulva dan badan klitoris yang menempel pada dinding anterior vagina. Struktur embriologi pada klitoris homologi dengan penis laki-laki. Pada klitoris terdapat titik reseptor androgen yang banyak pembuluh darah dan ujung saraf yang sangat sensitif.

Vestibulum adalah daerah yang batas atasnya klitoris dan batas bawahnya disebut fourchet. Batas sisinya labia minora. Organ ini berasal dari sinus urogenital dan memiliki 6 lubang diantaranya yaitu glandula Bartholini untuk membantu mengeluarkan pelumas ketika berhubungan seksual. Orificium vagina terletak pada bagian anterior vestibulum. Pada anak perempuan (perawan), ditutupi oleh lapisan tipis yang disebut selaput dara, masih utuh dan tidak robek. Selaput dara yang normal memiliki lubang kecil tempat keluarnya darah menstruasi. Lubang kecil tersebut bisa berbentuk bulan sabit, bulat, lonjong, bersepta, atau fimbriae. Setelah berhubungan seksual atau mengalami trauma lainnya, selaput dara bisa robek dan bentuk lubangnya menjadi tidak beraturan. Selaput dara yang tidak normal, seperti selaput dara imperforata primer (perforated hymen) yang menutupi seluruh lubang vagina, dapat menyebabkan darah menstruasi menumpuk di rongga vagina bagian dalam.

Vagina adalah rongga muskulomembran berbentuk seperti tabung, membentang dari tepi mulut rahim hingga ke bagian vulva. Terdapat 4 region fornix (daerah dekat dengan mulut rahim) yaitu fornix anterior, fornix posterior, dan fornix lateral kanan dan kiri. Dinding ventral dan dorsal vagina bersifat elastis, ditutupi lapisan epitel pipih berlapis yang mampu berubah

A diagram of a female figure in profile, facing right. A horizontal line is drawn across the waist, indicating the measurement point for waist circumference.



156 | Fisiologi Hewan

10.2 Forum Diskusi

Diskusikan Bersama teman kelompokmu!

Jelaskan dan gambarkan bagaimana Oogenesis pada sistem reproduksi wanita!

10.1 Uji Kompetensi

1. Jelaskan perbedaan Ovipar dan Ovovivipar!
2. Apa yang dimaksud dengan pembuahan eksternal dan pembuahan internal? Deskripsikan!

DAFTAR PUSTAKA

- Arsih, Fitri. 2012. Fisiologi Hewan. Padang : UNP Press.
- Campbell. 2004. Biologi Jilid 5. Jakarta : Erlangga.
- Soewolo. 2000. Pengantar Fisiologi Hewan. Malang : IKIP Malang.
- Purnamasari, Risa dan D. R. Santi. 2017. Fisiologi Hewan. Surabaya : UIN Sunan Ampel.
- Syofyan, Harlinda. 2018. Modul Biologi Dasar. Jakarta : Universitas Esa Unggul.
- Maulani, Arief H., 2019. Modul Belajar Mandiri. Jakarta : Pengembangan Keprofesian Guru.

BIODATA REVIEWER



Dr. Yohanes Edy Gunawan, M.Si.

Dosen Program Studi Biologi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Palangka Raya

Penulis lahir di Malang tanggal 20 Juni 1959. Penulis menyelesaikan S1 di Biologi IKIP Negeri Malang. Pra S2 Biologi Perkembangan, S2 Biologi Perkembangan Hewan dan S3 Biologi Molekuler di Institut Teknologi Bandung. Penelitian yang telah dilakukan penulis antara lain Pengaruh Estradiol Benzoat Terhadap Saluran Reproduksi Mencit (*Mus Musculus*) Swiss Webster Muda, Deteksi Glikoprotein dan Karakterisasi Gen Pengkode Zona Pelusida 3 (*Zp-3*) Pada *Petaurus Breviceps Papuanus* dan *Dactylopsila Trivigata* (Marsupialia : *Petauridae*), Penentuan Efek Antifertilitas Ekstrak Buah Uwei Namei (*Flagellaria Indica* L.) Pada Mencit (*Mus Musculus* L.) Swiss Webster Albino, Efek Fraksi Steroid Uwei Namei (*Flagellaria Indica* L.) Terhadap Struktur Tubulus Semiferus dan Epididimis Mencit Swiss Webster Albino, Efektivitas Fraksi Steroid Buah Uwei Namei (*Flagellaria Indica* L.) Sebagai Pengendali Fertilitas Pada Mencit (*Mus Musculus* L.) Swiss Webster Albino, Pengaruh Ekstrak Etanol Umbi Bawang Sabrang (*Elutherine Americana*) Terhadap Diabetes Tipe II (SP3T Kalimantan Tengah). **Efek Samping Penggunaan Bajakah Kalalawit (*Uncaria Gambir* Roxb.) Terhadap Hati dan Ginjal Sebagai Sistem Ekskresi.**

BIODATA PENULIS



Meyta Wulandari, S.Si., M. Sc

Dosen Program Studi Biologi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Palangka Raya

Penulis merupakan lulusan dari S1 Program Studi Biologi Universitas Negeri Yogyakarta dan melanjutkan studi Magister Program Studi Biologi dengan bidang kajian Zoologi di Fakultas Biologi UGM. Setelah lulus Magister tahun 2017, penulis aktif sebagai dosen tetap di Program Studi Bank Darah STIKES Guna Bangsa Yogyakarta hingga 2021, dan sejak 2022 hingga saat ini bertugas di Program Studi Biologi FMIPA, Universitas Palangka Raya, Kalimantan Tengah. Buku ini merupakan karya keduanya, setelah sebelumnya ia turut berkontribusi dalam buku ajar diantaranya adalah Biologi Sel dan Genetika yang diterbitkan oleh Penerbit NEM. Riset yang pernah dikerjakan diantaranya adalah virologi, kultur sel hewan, parasitologi dan biologi reproduksi. Penulis dapat dihubungi melalui surel meytawulan15@gmail.com.

BIODATA PENULIS



Lia Septya, S.Pd., M.Si.

Dosen Program Studi Biologi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Palangka Raya

Penulis lahir di Kotabumi tanggal 1 September 1994. Menyelesaikan Pendidikan S1 Jurusan Pendidikan Biologi di Universitas Lampung kemudian melanjutkan Studi S2 Jurusan Magister Biologi di Sekolah Ilmu dan Teknologi Hayati, Institut Teknologi Bandung dengan konsentrasi keilmuan Zoologi. Saat ini penulis merupakan Dosen tetap di Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya. Selain menjalankan tugas profesi dosen penulis juga mulai menekuni kegiatan menulis sebagai sarana pemanfaatan bidang keilmuan yang ditekuni.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: Liaseptya1994@gmail.com

BIODATA PENULIS



Wahyu Anggar Wanto, S. Si., M. Si.

Dosen Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu
Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya

Penulis lahir di Pontianak, 27 Desember 1994. Penulis tumbuh dan besar di Malang, Jawa Timur dan mengenyam pendidikan dasar hingga sekolah menengah atas di kota tersebut. Penulis mengambil S1 dan S2 di Jurusan Biologi, FMIPA, Universitas Brawijaya. Saat ini penulis menjadi dosen program studi biologi, FMIPA, Universitas Palangka Raya dengan konsentrasi taksonomi hewan. Penulis berharap dengan adanya buku ini, mampu menambah ilmu pengetahuan kepada tiap pembacanya. Selain itu penulis juga meminta maaf apabila ada salah kata ataupun salah informasi yang tidak disengaja oleh penulis.

BIODATA PENULIS



Febri Nur Ngazizah, S.Pd., M.Si

Dosen Program Studi Biologi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Palangka Raya

Penulis lahir di Banjarnegara tanggal 8 Februari 1991. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Pendidikan Biologi di Universitas Ahmad Dahlan dan melanjutkan S2 pada Jurusan Biologi peminatan Biomedis di Universitas Jenderal Soedirman. Pada Tahun 2017-2022 penulis menjadi dosen di program studi DIII Analis Kesehatan Stikes Borneo Cendekia Medika Pangkalan Bun. Tahun 2022-sekarang penulis menjadi dosen di Program Studi Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Palangka Raya. Penulis menekuni bidang Mikrobiologi dan Parasitologi.