

FISIOLOGI HEWAN KOMPARATIF

IAIN Batusangkar

Sanksi Pelanggaran Pasal 113 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta, sebagaimana yang telah diatur dan diubah dari Undang-Undang Nomor 19 Tahun 2002, bahwa:

Kutipan Pasal 113

- (1) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000,- (seratus juta rupiah).
- (2) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,- (lima ratus juta rupiah).
- (3) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,- (satu miliar rupiah).
- (4) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,- (empat miliar rupiah).

FISIOLOGI HEWAN KOMPARATIF

Rina Delfita



FISIOLOGI HEWAN KOMPARATIF

Edisi Pertama

Copyright © 2019

ISBN 978-623-218-290-5
ISBN (E) 978-623-218-540-1
14 x 20,5 cm
x, 196 hlm
Cetakan ke-1, Juli 2019

Kencana. 2019.1122

Penulis

Rina Delfita

Desain Sampul

Irfan Fahmi

Tata Letak

Witnasari & Euis

Penerbit

PRENADAMEDIA GROUP

(Divisi Kencana)

Jl. Tandra Raya No. 23 Rawamangun - Jakarta 13220

Telp: (021) 478-64657 Faks: (021) 475-4134

e-mail: pmg@prenadamedia.com

www.prenadamedia.com

INDONESIA

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh isi buku ini dengan cara apa pun,
termasuk dengan cara penggunaan mesin fotokopi, tanpa izin sah dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah Swt., selawat dan salam semoga senantiasa dilimpahkan kepada pendidik segenap manusia Muhammad Rasulullah, juga kepada segenap keluarganya dan para sahabatnya serta mereka yang mengikuti petunjuknya. Naskah buku ini merupakan kumpulan bahan ajar yang disampaikan pada mata-kuliah fisiologi hewan pada Tadris Pendidikan Biologi (S-1) IAIN Batu-sangkar. Buku ini adalah lanjutan buku *Fisiologi Hewan Jilid 1*, yang telah ditulis dan diterbitkan sebelumnya. Buku ini disusun berdasarkan berbagai sumber referensi yang relevan termasuk jurnal dan sebagian besar adalah buku acuan yang berlaku pada skala internasional, yaitu Schmidt-Nielsen (1997) dan Rastogi (2007).

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

Secara umum naskah buku ini terdiri atas enam bab. Bab I mengkaji termoregulasi; Bab II tentang osmoregulasi; Bab III sistem saraf; Bab IV reseptor dan efektor; Bab V mengkaji sistem endokrin; Bab VI mengkaji sistem reproduksi. Buku ini selain bermanfaat bagi mahasiswa, juga bisa menjadi bahan pengayaan bagi guru biologi SMA atau MAN dan guru IPA SMP atau MTs.. Kendatipun demikian, tulisan ini penulis sadari masih jauh dari kesempurnaan sehingga masih diperlukan penyempurnaan. Akhirnya penulis mengucapkan

terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak, sehingga buku ini terwujud. Ucapan terima kasih dan rasa syukur yang sangat mendalam kepada Allah Swt. yang telah memberikan pria saleh Andrizal, S.E.I., M.A. dan tiga orang putra, M. Ghani al-Baroq, Adzka Adzkiya, dan Gina Raudhatul Jannah. Keluarga yang selalu memberi semangat demi terwujudnya tulisan ini.

Batusangkar, 25 Juni 2019

Rina Delfita



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
BAB I TERMOREGULASI	1
A. Nomenklatur Termoregulasi	2
B. Panas metabolik dan suhu tubuh	4
C. Suhu Tubuh pada Poikilotermis	5
D. Suhu Tubuh pada Homeotermis	9
1. Regulasi Panas Secara Fisika	13
2. Regulasi Panas Secara Kimia	14
E. Temperatur Tubuh pada Heterotermis	16
F. Pusat Kontrol Termoregulasi	16
G. Adaptasi Hewan Endoterm Terhadap Suhu Ekstrem	18
1. Adaptasi Terhadap Suhu Dingin	18
2. Adaptasi Terhadap Suhu Panas	19
H. Aklimatisasi Termal	20
I. Ringkasan	21
J. Latihan	22
K. Referensi	23
BAB II OSMOREGULASI	25
A. Pengertian Osmoregulasi	26
B. Peranan Osmoregulasi	26
C. Prinsip Dasar Osmoregulasi	26
D. Osmoregulator dan Osmokonformer	28

E. Organ Osmoregulasi	31
1. Insang	31
2. Ginjal dan Kantung Kemih	31
3. Saluran Pencernaan	33
4. Kelenjar Rektum pada <i>Elasmobranchiata</i>	33
5. Kulit, Membran Operkular, dan Kantung Yolk	34
F. Respons Osmotik Hewan	34
1. Regulasi Osmotik Hewan Laut	35
2. Regulasi Osmotik pada Hewan Air Payau	39
3. Regulasi Osmotik pada Hewan Air Tawar	42
4. Regulasi Osmotik Hewan Terrestrial	45
G. Mekanisme Osmoregulasi Hewan Mamalia	60
H. Rangkuman	62
I. Latihan	64
J. Referensi	64
 BAB III SISTEM SARAF	 67
A. Unit Penyusun Sistem Saraf	69
1. Sel Saraf (Neuron)	69
2. Sel Glia	73
B. Mekanisme Kerja Neuron	74
C. Sinyal-sinyal dalam Sistem Saraf	78
D. Transmisi Sinapsis	79
1. Transmisi Listrik Melintasi Sinapsis Listrik	80
2. Transmisi Kimiawi Melintasi Sinapsis	81
E. Organisasi Sistem Saraf	84
1. Organisasi Sistem Saraf Hewan Uniseluler	84
2. Jaringan-jaringan Saraf (<i>Nerve Net</i>)	85
3. Sistem Saraf Bilateral (<i>Bumbung Neural</i>)	86
4. Sistem Saraf Segmentasi	87
5. Sepalisasi (<i>Cephalization</i>)	87
F. Sistem Saraf Vertebrata	90
1. Saraf Pusat (Otak dan Sum-sum Tulang Belakang)	91
2. Saraf Tepi	93
G. Ringkasan	95



H. Latihan	96
I. Referensi	96
BAB IV RESEPTOR DAN EFEKTOR	99
A. Reseptor	99
1. Jalur Penerimaan Stimulus oleh Reseptor	100
2. Klasifikasi atau Tipe-tipe Reseptor	102
B. Efektor	119
1. Kromatofor	120
2. Pergerakan Intrasel	120
3. Pergerakan <i>Amuboid/Pseudopodia</i>	121
4. Otot	122
E. Ringkasan	135
E. Latihan	136
G. Referensi	137
BAB V SISTEM ENDOKRIN	139
A. Pengertian Hormon	139
B. Klasifikasi Hormon	141
C. Sistem Endokrin pada Invertebrata	143
1. <i>Coelenterata</i>	143
2. <i>Platyhelminthes</i>	144
3. <i>Nematoda</i>	144
4. <i>Annelida</i>	144
5. <i>Molusca</i>	145
6. <i>Crustacea</i>	146
7. <i>Insekta</i>	147
D. Sistem Endokrin pada Vertebrata	148
1. <i>Hipotalamus</i>	148
2. Kelenjar <i>Pituitari/Hipofisa</i>	149
3. Kelenjar Perifer Endokrin	151
E. Mekanisme Kerja Hormon	156
1. Mekanisme Kerja Hormon dengan Reseptor yang Terletak di Membran Sel	157
2. Mekanisme Kerja Hormon yang Memiliki Reseptor Sitosolik (di Sitoplasma)	159



F. Ringkasan	161
G. Latihan	163
H. Referensi	163
BAB VI SISTEM REPRODUKSI	165
A. Mekanisme Reproduksi	165
1. Reproduksi Aseksual (Vegetatif)	165
2. Reproduksi Seksual	168
B. Organ Reproduksi Vertebrata	170
1. Sistem Reproduksi Jantan	170
2. Sistem Reproduksi Betina	172
C. Organ Reproduksi <i>Invertebrata</i> (Serangga)	176
D. Gametogenesis	178
1. Pembentukan Gamet Jantan (<i>Spermatogenesis</i>)	178
2. Pembentukan Gamet Betina (<i>Oogenesis</i>)	180
E. Kontrol Hormonal	182
1. Kontrol Hormonal pada Hewan Jantan	182
2. Kontrol Hormonal pada Hewan Betina	184
F. Reproduksi Manusia	185
1. Siklus Menstruasi	185
2. Kehamilan (Pregnansi)	187
3. Proses Kelahiran (Parturisi)	190
G. Ringkasan	191
H. Latihan	193
I. Referensi	193
BIODATA PENULIS	195



I

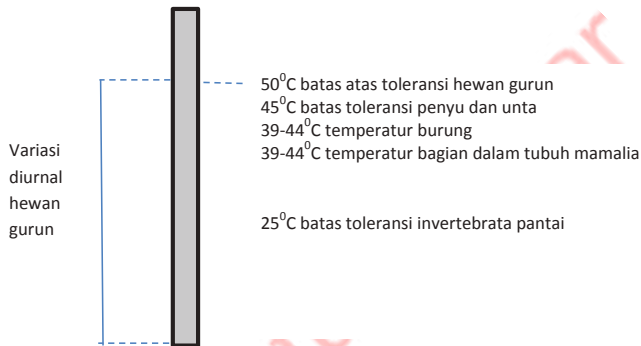
BAB

TERMOREGULASI

Pada Bab I ini pembelajar diharapkan mampu memahami tentang pengertian termoregulasi, panas metabolisme dan suhu tubuh, peranan termoregulasi, pusat kontrol termoregulasi, temperatur tubuh hewan poikilothermis, homeothermis, heterothermis dan adaptasi hewan terhadap suhu ekstrem.

Habitat atau tempat hidup hewan terbagi tiga yaitu akuatis, terestrial, dan aerial. Hewan yang hidup di habitat terestrial memiliki masalah yang akut terhadap temperatur, karena adanya radiasi panas matahari yang dapat mencapai lebih dari batas letal. Udara memiliki panas spesifik dan dapat mengalami peningkatan atau kehilangan panas secara cepat. Setelah matahari terbenam, panas akan menurun karena panas dari lingkungan hilang sehingga mungkin mencapai batas temperatur rendah yang bersifat letal. Di gurun, suhu akan melebihi batas toleransi biologis dan pasir akan mencapai suhu 70°C, sedangkan suhu udara berkisar 50°C. Di daerah tropis dan subtropis, suhu dapat mencapai di bawah titik beku (-65°C sampai -50°C). Hewan aerial seperti burung memiliki suatu batas toleransi termal yang lebih tinggi (35-42°C) berkenaan dengan laju metabolismenya. Berdasarkan akutnya efek temperatur pada hewan terestrial, maka diperlukan suatu sistem untuk mengatasi masalah tersebut, yaitu termoregulasi. Termoregulasi adalah kemampuan hewan untuk meregulasi atau mempertahankan temperatur tubuhnya. Termoregulasi berperan sangat vital dalam menjaga homeostasis tubuh agar enzim, hormon dan lainnya bekerja sebagaimana mestinya sehingga fisiologi berjalan normal.

Hewan yang tinggal di habitat akuatis tidak mengalami masalah dengan efek termal akut seperti yang dialami oleh hewan terestrial. Air memiliki panas yang spesifik dan dapat mengalami penurunan atau peningkatan secara lamban, sehingga hanya memiliki efek yang kecil terhadap perubahan temperatur. Air memiliki konduktivitas panas yang rendah dan akan mengalami pemanasan secara perlahan. Oleh sebab itu, hewan akuatis menjaga suhu tubuhnya mendekati suhu lingkungan.



GAMBAR 1.1. Kisaran temperatur dari berbagai hewan (Rastogi, 2007: 204).

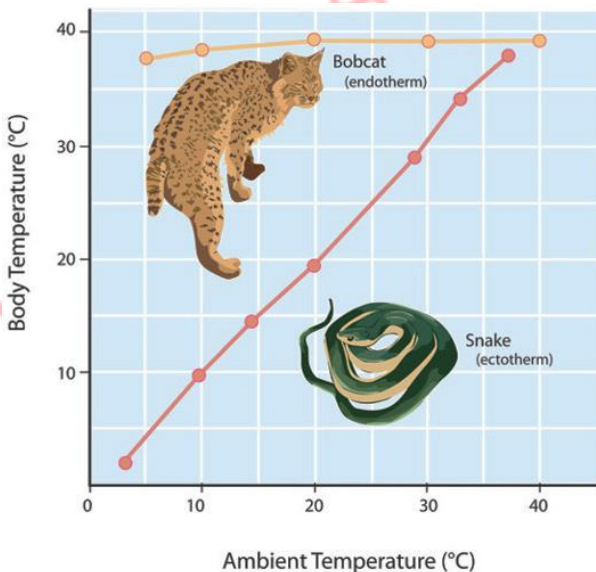
A. NOMENKLATUR TERMOREGULASI

Berdasarkan temperatur tubuhnya, hewan diklasifikasikan menjadi dua yaitu homeotermis dan poikilotermis (Rastogi, 2007: 205). Hewan yang dapat menjaga suhu tubuhnya pada kondisi yang relatif konstan ketika suhu eksternal berubah dalam kisaran yang luas disebut dengan homeotermis. Contoh hewan homeotermis adalah aves dan mamalia (Ivanov, 2006: 24). Adapun hewan-hewan yang suhu tubuhnya mengalami perubahan mengikuti suhu eksternal disebut poikilotermis. Kelompok poikilotermis meliputi invertebrata dan hewan akuatis seperti ikan dan amfibi, reptil (Kearney, Shine, & Porter, 2009: 1).

Beberapa hewan memiliki laju konduksi termal yang tinggi dan laju produksi panas yang rendah. Hewan tersebut memperoleh panas dari lingkungan dan akan meregulasi temperatur tu-



buhnya berdasarkan produksi panas dari dalam tubuh. Hewan tersebut dikenal dengan ektotermis dan meliputi sebagian besar spesies hewan. Hewan eksotermis sangat tergantung kepada panas lingkungan untuk meningkatkan suhu tubuhnya. Berkebalikan dengan itu, sebagian kecil hewan menghasilkan panas yang cukup dari metabolisme oksidatifnya dan menjaga temperatur tubuhnya pada level yang konstan sehingga panas tubuhnya tergantung kepada produksi internalnya sendiri. Kelompok ini disebut endotermis yang meliputi homeotermis seperti burung dan mamalia. Terdapat kategori yang lainnya dari hewan yang tidak mempertahankan suhu tubuhnya pada kondisi konstan seperti prototeria, akan tetapi selama beraktivitas hewan tersebut memperlihatkan regulasi endotermis. Kelompok ini dikenal dengan heterotermis atau disebut juga sebagai endotermis fakultatif karena hanya mampu meregulasi temperatur fisiologisnya pada waktu tertentu saja (Rastogi, 2007: 205).

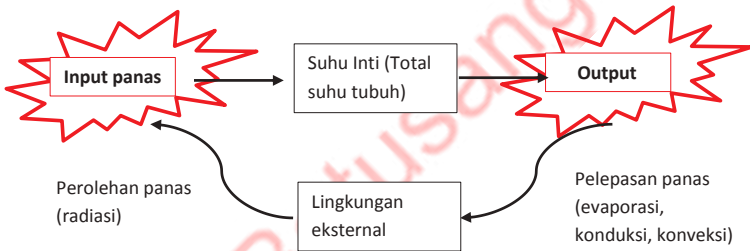


GAMBAR 1.2. respons hewan endoterm dan ektoterm (Akin, 2011: 7; Randall, D, Burggren, French, 1997: 683).



B. PANAS METABOLIK DAN SUHU TUBUH

Suhu tubuh hewan terdiri dari dua komponen yaitu suhu inti tubuh dan suhu perifer tubuh. Suhu inti tubuh mencerminkan total keseluruhan panas dalam tubuh. Suhu inti tubuh diukur dari suhu trunkus dan kepala, sedangkan suhu perifer tubuh diukur dari suhu ekstrimitas. Suhu inti tubuh cenderung lebih stabil dan dalam kondisi lingkungan moderat, sedangkan suhu perifer lebih rendah 2-4°C dibandingkan dengan suhu inti tubuh. Termoregulasi bekerja dengan menjaga suhu inti tubuh dalam rentang 1-2°C untuk menjaga sel berfungsi dengan normal. Panas diproduksi dan dihilangkan dari tubuh supaya tubuh tetap berada dalam keadaan normotermia agar fisiologi berjalan normal.



GAMBAR 1.3. Panas metabolik dan suhu tubuh.

Panas dihasilkan oleh semua aktivitas metabolisme tubuh, dan dari lingkungan eksternal. Hewan endotermik memproduksi panas dalam jumlah besar di inti dari tubuh. Jaringan hewan endoterm memiliki substansial kepadatan mitokondria yang lebih tinggi dan aktivitas enzim mitokondria yang lebih tinggi daripada hewan ektoterm berukuran serupa, yang mencerminkan kemampuan hewan ini untuk menghasilkan panas metabolik. Pada burung dan mamalia pada saat istirahat, organ dada dan perut (usus, hati, ginjal, jantung, paru-paru, dan lain-lain) memproduksi hingga tiga perempat panas metabolik, sedangkan ketika aktif, dengan laju metabolisme mungkin meningkat 10 kali lipat terutama otot yang menghasilkan panas ekstra. Karena itu, suhu inti hewan bervariasi, tergantung



aktivitas hewan tersebut. Seperti unta, yang memiliki variasi tubuh yang spektakuler setiap hari sebagai bagian dari strategi termal mereka. Suhu inti sebagian besar burung dan mamalia juga sedikit berbeda secara periodisitas diurnal sesuai dengan siklus cahaya. Spesies diurnal lebih tinggi pada siang hari, dan spesies nokturnal lebih tinggi pada malam hari, dengan perbedaan rata-rata hingga 2°C . Bahkan ketika isyarat cahaya dihilangkan efek diurnal tetap ada, dengan sedikit berbeda secara periodisitas, yang menunjukkan irama endogen dari produksi panas. Komplikasi jangka panjang lebih lanjut muncul sehubungan dengan siklus estrus pada mamalia, di mana betina mungkin $0,5-1^{\circ}\text{C}$ lebih tinggi saat ovulasi.

Hubungan temperatur tubuh hewan dengan lingkungannya tergantung kepada kandungan air dalam tubuh hewan tersebut. Hewan-hewan terestrial memiliki lingkungan yang kompleks sehingga sangat sulit untuk mengukur termal lingkungan secara akurat. Hewan terestrial sebaliknya dihadapkan dengan masalah termoregulasi yang lebih besar. Seluruh produksi panas tubuh akan hilang keluar tubuh melalui konduksi, konveksi, radiasi, dan evaporasi.

Mamalia memiliki sistem piranti termoregulasi fisiologis yang efisien untuk menjaga suhu tubuhnya. Jika suhu lingkungan meningkatkan suhu tubuh, maka suhu tubuh tidak akan dibiarkan untuk meningkat. Mekanismenya akan berlangsung melalui evaporasi air melalui permukaan tubuh. Evaporasi akan menurunkan temperatur tubuh. Kulit dan sistem respirasi hewan memiliki signifikansi termoregulasi yang sangat besar.

C. SUHU TUBUH PADA POIKILOTERMIS

Suhu tubuh hewan-hewan kelompok poikiloterm tergantung kepada suhu lingkungan, sehingga sering juga disebut dengan hewan ektoterm. Apabila suhu lingkungan tinggi, maka suhu tubuhnya akan meningkat dan apabila suhu lingkungan rendah, maka suhu tubuhnya juga akan menjadi rendah, sehubungan dengan itu, tidak akan terlalu besar memerlukan energi untuk termoregulasinya karena laju metabolismenya juga rendah dan sedikit atau tanpa adanya produksi panas. Suhu tubuh akan meningkat karena efek



meningkatnya suhu lingkungan, yang akan membuat laju metabolisme dipercepat. Dengan kata lain, tidak ada laju metabolisme yang tetap pada poikilotermis atau akan berubah-ubah sesuai suhu lingkungan.

Hewan poikilotermis meregulasi suhu tubuhnya hanya melalui mekanisme fisika melalui tiga hal. *Pertama*, adanya insulasi yang sedikit. Insulasi yang sedikit memungkinkan kehilangan panas yang lebih cepat dan dapat mencegah akumulasi panas yang tersimpan dalam tubuh. *Kedua*, memiliki suhu inti tubuh lebih rendah dari pada suhu lingkungannya. *Ketiga*, pada kondisi suhu lingkungan yang tinggi, panas tubuh akan dikurangi melalui evaporasi, sedangkan pada suhu lingkungan yang rendah, tidak terjadi proses regulasi spesifik untuk memproduksi panas (Rastogi, 2007: 208).

Pada invertebrata akuatik seperti larva *Chironomidae* yang hidup pada sumber air panas dapat mentoleransi temperatur hingga 50°C, sedangkan spesies-spesies insekta lainnya dapat bertahan pada suhu di bawah titik beku air dalam periode yang relatif lebih panjang. Hewan invertebrata akuatis dapat mentoleransi kisaran fluktuasi suhu yang lebih luas dibandingkan dengan vertebrata.

Vertebrata akuatik seperti ikan, suhu tubuhnya dipertahankan untuk tetap sama dengan suhu lingkungan. Ikan memiliki laju metabolisme sangat rendah sehingga laju pertukaran panas juga menjadi rendah. Saat ikan berenang, sejumlah panas dihasilkan dari adanya aktivitas muskular yang dapat meningkatkan temperatur tubuh secara temporer, namun secepatnya akan kembali sama dengan suhu lingkungannya. Hal ini disebabkan panas tubuh yang dihasilkan dari aktivitas muskular tersebut segera ditransfer ke dalam darah dan dibawa ke insang yang kemudian segera berhubungan dengan air. Insang selain berperan sebagai organ respirasi yang efisien juga terlibat dalam menjaga kestabilan suhu tubuh. Mekanisme *counter-current* dan pembuluh darah yang berinding tipis memfasilitasi pertukaran panas antara air dan tubuh ikan sehingga suhu tubuh akan tetap sama dengan suhu air. Namun, pengecualian untuk ikan tuna yang berukuran besar dan perenang cepat, di mana suhu otot aksialnya lebih tinggi 15°C dari pada suhu lingkungannya. Panas yang dihasilkan dari aktivitas musku-



lar tersebut diregulasi melalui mekanisme *counter-current* pada kisaran yang terbatas dan kehilangan panas dikurangi dengan cara ini (Carey and Gibson, 1983: 333).

Hewan-hewan poikilotermis terestrial menjaga suhu tubuhnya agar hampir sama dengan suhu lingkungan. Namun, permasalahan hewan ini adalah adanya fluktuasi suhu lingkungan yang lebih besar dan lebih beragam, tergantung habitat yang didiaminya. Hewan yang hidup di gurun mengalami variasi suhu harian yang sangat ekstrem, di mana siang hari sangat panas, sedangkan malam hari sangat dingin. Kisaran suhu siang dan malam 10°C sampai dengan 45°C. Pada siang hari di musim panas, suhu lingkungan bisa mencapai 50°C. Hewan yang hidup di daerah Arktika juga dihadapkan dengan permasalahan yang sama, di mana terjadi variasi temperatur dari 20-60°C (Rastogi, 2007: 208).

Di darat, hewan menyerap panas radiasi dengan mudah dan melepaskan panas dengan kecepatan yang sama. Ini karena udara adalah penghantar panas yang buruk. Poikilotermik kehilangan panas dengan mudah melalui penguapan air dari permukaan tubuhnya.

Hewan invertebrata terestrial merupakan kelompok hewan yang memiliki daya adaptasi maksimum terhadap suhu lingkungannya. Kelompok hewan tersebut adalah artropoda dan insekta, di mana kedua kelompok hewan ini memperlihatkan aktivitas aktif di lingkungan yang panasnya cukup ekstrem. Suhu tubuh insekta dapat bervariasi tergantung suhu lingkungan. Hal ini disebabkan karena tiga hal penting yaitu adanya kehilangan panas melalui evaporasi, absorpsi panas radiasi dan produksi panas metabolisme (Rastogi, 2007: 209).

1. Kehilangan panas melalui evaporasi. Umumnya insekta dapat mempertahankan suhu tubuhnya 3-5°C lebih rendah dari pada suhu lingkungan. Hal ini menyebabkan kehilangan panas dari tubuh karena evaporasi. Air tubuh umumnya akan hilang dari sistem trakea melalui bukaan spirakel. Pada saat udara kering, kehilangan air tubuh yang banyak akan menyebabkan dehidrasi hingga kematian. Kutikula insekta bersifat imper-



meabel terhadap air karena adanya lapisan lilin di dalamnya. Bagaimanapun, jika suhu tubuh melebihi 40°C, maka lapisan lilin akan mencair dan menyebabkan kutikula bersifat permeabel terhadap air sehingga berisiko terjadinya dehidrasi.

2. Absorpsi panas radiasi. Insekta menyerap panas dari matahari dan akan meningkatkan temperatur tubuhnya. Jumlah panas yang diserap oleh insekta tergantung kepada pigmentasi, luas area permukaan tubuh, dan orientasi tubuh terhadap matahari. Insekta yang berwarna hitam menyerap lebih banyak panas dari pada yang berwarna lebih cerah. Orientasi tubuh terhadap cahaya matahari adalah parameter yang penting. *Schistocerca* (belalang gurun) aktif pada suhu 17-20°C dan orientasi tubuhnya tegak lurus terhadap matahari sehingga memperoleh cahaya matahari yang maksimal.
3. Produksi panas dari metabolisme. Produksi panas pada insekta meningkat selama aktivitas terbang. Pada suhu rendah, otot untuk terbang akan inaktif sehingga aktivitas terbang tidak dapat dilakukan sama sekali. Sebagian besar insekta memanasakan tubuhnya dengan menggerakkan sayapnya melakukan aktivitas terbang. Periode pemanasan tersebut berlangsung lebih lama pada suhu rendah. Pada *Vanessa* misalnya, diperlukan pemanasan sekitar 6 menit pada suhu 11°C, 1.5 menit pada suhu 23°C, 18 sekon pada suhu 34°C dan bahkan tidak perlu pemanasan pada suhu 37°C. Pada serangga sosial seperti lebah dan rayap, panas dari metabolisme tubuh sangat penting untuk regulasi temperatur dalam koloninya. Temperatur ideal bagi larva pada lebah madu adalah 34.5-35°C (Simpson, 2007: 172). Panas yang berlebihan pada musim panas akan menciptakan situasi yang sulit bagi larva yang kemudian akan ditanggulangi oleh pekerja dengan menyemprotkan air di dalam sarangnya. Adapun, ketika suhu rendah memicu lebah untuk berkumpul bersama sehingga suhu sarang sedikit meningkat di atas suhu udara.

Hewan vertebrata terestrial poikilotermis memiliki perubahan suhu tubuh yang spesifik sehubungan dengan lingkungannya.



Pada amfibi misalnya, kulitnya tidak efektif untuk regulasi fisiologis, namun memberikan perlindungan dalam kondisi ekstrem. Pada lingkungan yang kering dan panas, air akan hilang dari kulit melalui evaporasi. Ketika berada di darat, kulit yang basah berfungsi seperti termometer gelembung basah dan evaporasi yang konstan dari air pada kulit akan menjaga suhu tubuh berada di bawah suhu lingkungan.

Umumnya amfibi sangat sensitif terhadap suhu tinggi, sehingga daya adaptasinya lebih rendah dibandingkan dengan reptil, burung dan mamalia. Amfibi tidak dapat melawan suhu tinggi melalui regulasi fisiologis. Akan tetapi, hewan tersebut meregulasi temperatur tubuhnya melalui perubahan perilaku dan aklimatisasi termal.

D. SUHU TUBUH PADA HOMEOTERMIS

Kelompok vertebrata terestrial pertama yang menunjukkan gejala adanya usaha awal dari mekanisme termoregulasi adalah reptil. Adapun burung dan mamalia secara independen memiliki piranti-piranti yang efisien untuk menjaga suhu tubuh. Panas tubuh dihasilkan dan dipertahankan pada kondisi lingkungan yang dingin, sedangkan panas akan direduksi pada kondisi lingkungan bersuhu tinggi. Pertukaran panas antara tubuh dan lingkungan di-regulasi melalui pusat termoregulasi di hipotalamus yang berfungsi seperti termostat. Regulasi suhu tubuh hewan vertebrata terestrial dilakukan dengan cara fisika dan kimia (Rastogi, 2007: 210). Regulasi fisika dengan cara memproduksi panas dan menghilangkan panas secara cepat dan lancar dan regulasi kimia dengan cara memproduksi panas dengan cara mempercepat laju metabolisme tubuh ketika kebutuhan panas tubuh meningkat. Kelompok hewan homeotermis sering juga disebut dengan hewan endoterm, karena panas tubuhnya diperoleh melalui aktivitas metabolisme tubuh.

Burung biasanya memiliki suhu inti tubuh yang lebih tinggi dari pada mamalia. Meskipun demikian, kisaran suhu pada spesies gurun dan nongurun berada dalam rentang yang sama. Batas atas letal untuk spesies burung di gurun sama dengan yang tidak hidup



di gurun yang memperlihatkan siklus suhu tubuh diurnal yang cukup jelas dengan variasi yang sempit yaitu 2-3°C. Aktivitas muskular menyebabkan terjadinya peningkatan suhu tubuh secara temporer. Pada lingkungan yang panas, burung lebih banyak kehilangan air melalui respirasi. Pada suhu lingkungan yang lebih tinggi misalnya suhu 34°C dan 40°C, menyebabkan kehilangan air sekurangnya empat kali. Hal ini dikenal dengan istilah pendinginan evaporatif.

Selain regulasi panas melalui proses pendinginan evaporatif, burung juga memiliki piranti lainnya seperti adanya sayap, bulu, jengger, dan kaki. Sayap akan dikepakkan menjauhi tubuh sehingga tubuh terekspos dengan lingkungan, aliran darah akan ditingkatkan ke kaki dan jengger atau pial yang akan meningkatkan konduktansi termal. Selain itu juga, ada mekanisme tingkah laku yang berhubungan dengan regulasi suhu, seperti berpindah ke area yang lebih ternaung pada siang hari sehingga mengurangi penambahan panas tubuhnya. Burung dapat juga terbang ditinggikan untuk melepaskan diri dari panas pada tempat yang rendah. Burung-burung di urinal tetap beraktivitas dalam batas minimum pada kondisi musim panas yang bersuhu tinggi untuk mengurangi produksi panas metabolismenya.

Regulasi suhu pada mamalia biasanya berhubungan dengan adaptasi morfologi dan ekologi. Mamalia secara kontinu melepaskan panas ke lingkungannya melalui mekanisme transfer panas. Proses termoregulasi tersebut berkenaan dengan kontrol laju pelepasan panas ke lingkungan, dan peningkatan produksi panas.

Mamalia yang hidup di daerah dingin akan mempertahankan suhu tubuhnya untuk lebih tinggi dari suhu lingkungan. Selama musim dingin yang intens, suhu tubuh mamalia akan relatif tetap konstan. Hal ini disebabkan oleh adanya (a) efisiensi insulasi tubuh dengan adanya rambut tebal dan lemak di bawah kulit; dan (b) efektifnya kerja pengontrol vasomotor serta mekanisme pertukaran panas *counter-current* dalam sistem peredaran; serta (c) menurunnya sensitivitas terhadap suhu pada reseptor di bagian perifer.

Pada mamalia gurun misalnya, apabila suhu lingkungan memacu peningkatan suhu tubuh, maka menimbulkan permasalahan



akut dan bisa menyebabkan kematian. Namun karena dilengkapi dengan piranti-piranti khusus, maka panas yang diperoleh diregulasi sedemikian rupa melalui mekanisme fisiologis tertentu sehingga tidak berdampak buruk pada hewan gurun. Saat pertukaran panas berlangsung pada arah yang berlawanan, maka pendinginan tubuh akan dilakukan melalui evaporasi.

Hewan-hewan gurun dihadapkan kepada perubahan siklus suhu diurnal yang ekstrem, di mana siang suhunya sangat panas, sedangkan malam suhunya sangat dingin. Hewan gurun tidak secara terus-menerus menghadapi stres panas. Hal inilah yang membuat hewan gurun dapat bertahan melawan kondisi iklim yang ekstrim melalui perubahan perilaku. Permasalahan termoregulasi pada hewan gurun terdiri atas tiga kategori (Rastogi, 2007: 216):

- a. Relaksasi batas-batas termal selama kontrol homeostatik dipertahankan.
- b. Piranti termoregulasi melalui perubahan perilaku.
- c. Struktur khusus dan adaptasi fungsional berkembang.

Tikus kangguru merupakan mamalia kecil gurun yang bersifat nokturnal. Hewan ini tidak mampu bertahan pada suhu tinggi selama siang hari, sehingga dia akan menghabiskan siang yang panas di dalam lubang-lubang di bawah tanah yang cukup lembab. Setelah matahari terbenam di mana suhu mulai menurun, hewan tersebut keluar dari lubangnya. Dalam hal ini, hewan kecil menghindari pendinginan evaporatif.

Unta juga termasuk hewan gurun yang memperlihatkan mekanisme adaptasi fisiologis spesifik sehingga dapat bertahan dengan baik pada kondisi gurun yang panas. Unta dapat berjalan pada jarak yang jauh dengan tanpa meminum air selama sehari-hari. Unta tidak memiliki tempat khusus untuk menyimpan air di dalam tubuhnya. Hewan ini dapat mentolerir suhu lingkungan yang sangat tinggi. Jika unta tidak memperoleh tempat untuk minum, suhu dalam tubuhnya selama siang hari akan meningkat menjadi 40°C, tetapi jika ia berhasil memperoleh air untuk minum, maka suhu dalam tubuh sekitar 34°C. Variasi pada suhu dalam tubuh ber-



tujuan untuk mempertahankan kandungan air dengan menyimpan panas selama siang hari.

Diperkirakan pada unta yang memiliki berat sekitar 500 kg, peningkatan suhu inti tubuh 6°C akan membantu menyimpan 2500 kkal. Di samping mekanisme termoregulasi tersebut, rambut tebal unta juga berperan sebagai barier yang efektif dalam mentransfer panas. Sebagaimana telah disebutkan di sebelumnya, bahwa unta tidak memiliki tempat khusus untuk menyimpan air dan ia akan menghindari evaporasi air melalui mekanisme variasi diurnal dari suhu inti tubuhnya. Namun, kehilangan air akan terjadi melalui urin dan respirasi. Unta dapat bertahan dalam kondisi dehidrasi hingga 25-30% selama perjalanan panjang melintasi gurun dan menghindari stres panas. Jika air tersedia, unta akan dapat memulihkan dehidrasi tubuhnya dengan meminum air dalam jumlah yang banyak dalam waktu yang singkat (Schmidt-Nielsen, 1980: 260).

Burung memiliki daya adaptasi terhadap suhu tinggi lebih baik dari pada mamalia. Burung memiliki suhu tubuh berkisar $39-45^{\circ}\text{C}$. Jika suhu lingkungan lebih tinggi dari pada suhu tubuh, burung akan melepaskan panas melalui mekanisme fisika seperti konduksi, konveksi, dan radiasi. Kendati burung memiliki suhu tubuh yang tinggi, ia tidak akan berkeringat. Bulu yang tebal berfungsi sebagai insulator dan meminimilasi kehilangan air. Air akan hilang melalui sistem respirasi ketika burung tersebut bernapas dengan cepat. Hal inilah yang menjadikan burung dapat bertahan di kisaran suhu yang panas.

Apabila kelembaban udara tinggi, burung akan kehilangan sekitar setengah dari panas tubuhnya melalui evaporasi. Pada kelembaban sedang, suhu tubuh burung meningkat dan menghasilkan hipertermia dan akan menyebabkan kehilangan panas dari tubuh secara pasif. Pada kondisi hipertermia, burung mengalami pelepasan panas, sedangkan pada unta hipertermia akan menyebabkan penyimpanan panas. Pada lingkungan dengan kelembaban sangat rendah, suhu tubuh burung dijaga untuk tetap berada di bawah suhu lingkungan.



1. Regulasi Panas Secara Fisika

a. Pada Kondisi Hipertermia (Kelebihan Panas)

Jika suhu tubuh lebih tinggi dari lingkungan, maka tubuh akan melepaskan panas ke lingkungan. Untuk mengkompensasi kehilangan panas tersebut, homeotermis memproduksi panas dengan cara meningkatkan laju metabolismenya. Berdasarkan hukum Newton tentang pendinginan, perubahan panas dalam tubuh perunit waktu adalah proporsional terhadap perbedaan antara suhu tubuhnya dan suhu lingkungan. Persamaan matematisnya sebagai berikut:

$$dH/dt = C (TB-TA),$$

di mana: C : konduktansi termal

TB: suhu tubuh

TA: suhu lingkungan.

Panas hilang dari tubuh melalui kulit, paru-paru, dan ekskresi. Homeotermis melepaskan panas melalui konduksi, konveksi dan evaporasi. Konduktansi termal tubuh sangat penting karena akumulasi panas dalam tubuh hewan akan menghasilkan efek kematian karena terjadi hipertermia atau kelebihan panas.

Contoh kondisi hipertermia telah diteliti pada anjing laut *Callorhinus ursinus* yang hidup di daerah arktik. Perbedaan antara suhu di dalam tubuh anjing laut dengan suhu di lingkungan eksternal mencapai 30°C. Hal ini diatasi dengan adanya insulasi yang tebal dan tahan air yang terdapat di bagian sub-*cutaneus*. Subkutan ini banyak mengandung lemak. Ketika ia berada di dalam air, sejumlah besar panas dihasilkan sehubungan dengan aktivitas berenang yang akan segera dilepaskan ke air melalui pendayung yang lebar dan banyak pembuluh darah. Ketika di darat, pendayung tersebut akan menahan agar panas tidak lepas dari tubuh. Akan terjadi masalah kematian bagi hewan tersebut jika suhu air meningkat di atas 12°C.

Selama hipertermia, aliran darah dan dilatasi pembuluh darah yang dikontrol oleh saraf simpatik menuju kulit ditingkatkan agar banyak panas yang bisa dilepaskan lewat kulit. Proses penghilangan panas pada kondisi hipertermia melalui:



1. Terjadinya relaksasi aktivitas saraf yang bertanggung jawab dalam vasokonstriksi.
2. Terjadinya peningkatan aktivitas serabut-serabut vasodilator simpatik sehingga meningkatkan aliran darah dan dilatasi pembuluh darah, khususnya pembuluh darah pada permukaan kulit.
3. Terjadinya pelepasan senyawa kimia (*bradikinin*) dari kelenjar keringat sehingga panas tubuh keluar bersama keringat.

b. Pada Kondisi Hipotermia (Kekurangan Panas)

Insulasi dan aliran darah merupakan faktor penentu banyaknya panas yang hilang melalui kulit. Aliran darah di kulit berperan vital dalam regulasi kehilangan panas. Pada kondisi hipotermia (keadaan suhu di dalam tubuh rendah dibandingkan suhu lingkungan) aliran darah menuju kulit sangat terbatas dalam meminimalisir kehilangan panas. Konsekuensinya, suhu di permukaan kulit akan menurun drastis.

Kulit hewan homeotermis dilengkapi dengan struktur seperti bulu, rambut tebal, atau rambut-rambut halus yang berfungsi sebagai insulator. Adanya struktur insulasi ini dan sistem saraf simpatik akan meningkatkan efektivitas regulasi suhu tubuh. Bulu-bulu atau rambut pada kulit berperan sebagai barier bagi kehilangan panas karena udara terperangkap dalam bulu-bulu tersebut.

2. Regulasi Panas Secara Kimia

Seluruh panas tubuh pada kelompok hewan homeotermis berasal dari oksidasi bahan makanan. Setiap jaringan berkontribusi dalam produksi panas, walaupun diketahui bahwa otot lurik memiliki kontribusi yang paling besar. Mekanisme produksi panas melibatkan dua proses kimiawi (Willmer, P, Stone, G, Johnston, 2005: 204) yaitu:

- a. Termogenesis *shivering* yaitu melalui aktivitas muskular. Pada lingkungan yang dingin, hewan homeotermis meningkatkan aktivitas muskular sehingga produksi panas meningkat. Hal ini diketahui bahwa pada suhu dingin, tubuh menggigil (*shi-*



ving) yang pada hakikatnya adalah meningkatkan aktivitas muskular. Dengan cara seperti ini, produksi panas mencapai 2 hingga 5 kali dari level basal. Jika aktivitas bergerak dilakukan, gigitan tersebut berkurang atau bahkan hilang. Hal ini disebabkan karena adanya produksi panas yang lebih tinggi, dan hal ini tentunya meningkatkan laju kehilangan panas juga. Namun, panas tambahan yang dihasilkan dari gerakan tubuh tidak signifikan.

- b. Termogenesis *nonshivering*. Produksi panas pada kebanyakan mamalia, akan meningkat tanpa melibatkan aktivitas muskular. Hal ini dapat diketahui dari tetapnya level panas tubuh meskipun pada fase istirahat atau puasa. Termogenesis *nonshivering* berperan dalam aklimatisasi mamalia terhadap suhu dingin. Aktivitas bergerak seperti melakukan olahraga tidak akan memberikan efek terhadap termogenesis *nonshivering*.

Termogenesis *nonshivering* melibatkan beberapa perubahan dari metabolisme intermediet yang mungkin disebabkan oleh adanya aksi hormon kalorigenik atau lemak coklat (*brown fat*). Aksi hormon kalorigenik dapat diamati dari eksperimen pada tikus-tikus yang telah diaklimatisasi pada suhu dingin. Hasilnya menunjukkan bahwa tikus-tikus tersebut dapat menggunakan dan mensintesis lebih banyak glukosa sebagai konsekuensi dari regulasi hormonal. Injeksi *norepinefrin* terhadap tikus yang telah diaklimatisasi pada suhu dingin tersebut memperlihatkan adanya aksi kalorigenik dengan meningkatnya suhu tubuh dan konsumsi oksigen.

Mamalia yang masih muda seperti primata dan rodent, memiliki jaringan lemak coklat yang terlihat banyak pada pembuluh dan juga multilokus. Jaringan ini diketahui sangat berkembang pada mamalia yang berhibernasi. Lemak coklat ini terletak di sekitar leher, dada, dan sebagian besar pembuluh darah. Selama periode suhu rendah yang panjang, deposit lemak coklat akan meningkat. Lemak coklat ini memperoleh suplai darah yang banyak dan memiliki konsumsi oksigen yang lebih tinggi dari pada jaringan lainnya. Panas yang dihasilkan oleh lemak coklat akan ditransportasikan ke otak dan kepala melalui sirkulasi darah.



E. TEMPERATUR TUBUH PADA HETEROTERMIS

Heterotermis adalah kelompok hewan yang mampu meregulasi suhu tubuhnya secara endoterm dan sekaligus juga dapat meregulasi suhu tubuhnya secara ektoterm. Contoh hewan mamalia yang termasuk ke dalam kelompok heterotermis adalah kelas *Prototheria* dan *Metatheria* (seperti *Echidna*, *Ornithorhynchus*, Armadillo, dan Opossum). Kelompok hewan ini memiliki suhu tubuh yang rendah dari suhu lingkungannya dan memperlihatkan kisaran yang luas dari fluktuasi suhu tubuh dan metabolismenya. Ada beberapa bagian tubuh seperti kaki, ekor, kuping yang memiliki insulasi yang lebih sedikit dibandingkan dengan bagian lainnya dan temperatur pada bagian tersebut lebih rendah dari pada temperatur di dalam tubuh. Pada suhu lingkungan 35°C, *Echidna* memiliki suhu tubuh 34°C, namun jika suhu jika suhu lingkungan turun, maka suhu tubuh *Echidna* juga akan turun. Suhu tubuh hewan endotermis pada umumnya memiliki variasi diurnal.

Suhu inti tubuh burung camar laut hering berkisar antara 38-41°C, tetapi suhu beberapa bagian perifernya berkisar antara 6°C-13°C. Burung ini mampu berjalan di atas es yang bersuhu -30 °C, tetapi jika burung camar tersebut diaklimatisasikan dengan suhu laboratorium yang lebih hangat dan kemudian dibiarkan berjalan di atas es, maka kakinya akan membeku. Pada beberapa burung, variasi diurnal berkorelasi dengan aktivitas selama siang hari daripada dengan aktivitas malam harinya.

F. PUSAT KONTROL TERMOREGULASI

Sistem saraf merupakan pusat untuk mengontrol termoregulasi pada hewan endotermis. Aktivitas muskular (*shivering*) akan meningkatkan produksi panas yang mekanisme kerjanya di bawah kontrol saraf motorik. Variasi jumlah darah yang mengalir melalui kulit dan pengeluaran keringat merupakan bentuk usaha tubuh untuk menjaga agar suhu tubuh normal di bawah kontrol sistem saraf simpatik.

Pusat kontrol termoregulasi hewan endotermis terletak di hipotalamus (Randall, D, Burggren, French, 1997: 700), yang terin-



tegrasi dengan saraf sensoris yang masuk melalui reseptor suhu. Ada dua macam termoreseptor, yaitu termoreseptor perifer yang terletak pada seluruh permukaan tubuh dan pada bagian-bagian tertentu saluran pencernaan, dan termoreseptor pusat yang terletak di tengah-tengah tubuh.

Pusat termoregulasi pada hipotalamus dapat distimulasi dengan stimulus listrik atau panas. Bagian anterior hipotalamus berfungsi sebagai pusat yang disebut pusat kehilangan panas (termotaksik) dan bagian posteriornya adalah pusat produksi panas. Dua bagian dari hipotalamus ini secara anatomis saling berhubungan dalam merespons kondisi hipertermia dan hipotermia. Hipertermia memfasilitasi pengaktifan pusat kehilangan panas sedangkan hipotermia akan memfasilitasi pengaktifan pusat produksi panas. Pusat termoregulasi ini dapat diaktivasi oleh reseptor termal yang ada pada kulit dan oleh reseptor pusat yang ada dalam inti tubuh melalui perubahan suhu di dalam darah.

Pada hipotalamus telah diketahui adanya tiga tipe sel yang sensitif terhadap suhu (Rastogi, 2007: 214), yaitu:

- a. Reseptor panas, di mana diketahui adanya sel-sel yang meningkatkan aktivitasnya ketika suhu hipotalamus meningkat tetapi suhu kulit tidak memengaruhinya.
- b. Reseptor dingin, di mana diketahui adanya sel-sel yang meningkatkan aktivitasnya jika suhu hipotalamus menurun dan tetap tidak terpengaruh oleh suhu di kulit.
- c. Reseptor campuran, di mana adanya sel-sel yang memperlihatkan respons terhadap peningkatan suhu kulit, sekaligus meningkatkan aktivitasnya jika hipotalamus menjadi panas.

Pada kulit terdapat reseptor panas teretak lebih dalam di kulit dan reseptor dingin yang terletak di bagian superfisial dan biasanya lebih banyak. Reseptor tersebut berupa saraf yang telanjang. Apabila suhu lingkungan meningkat, suhu kulit juga akan meningkat sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan aktivitas pada reseptor panas secara mendadak (2-3 detik) dan selanjutnya kembali normal. Jika dihubungkan dengan stimulus panas, reseptor panas akan menurunkan frekuensi muatannya. Reseptor dingin



mengalami perubahan muatan dengan frekuensi yang lebih tinggi ketika diberikan stimulus dingin hingga terjadi perubahan suhu.

G. ADAPTASI HEWAN ENDOTERM TERHADAP SUHU EKSTREM

1. Adaptasi Terhadap Suhu Dingin

Pada suhu dingin, reseptor-reseptor akan membangkitkan respons refleks untuk mempertahankan atau memproduksi panas. Stimulasi reseptor dingin menyebabkan terjadinya konstruksi pembuluh darah yang mengalir kulit untuk menurunkan pelepasan panas. Suhu yang dingin mungkin juga menyebabkan berdirinya rambut-rambut, bulu, dan peningkatan aktivitas muskular. Suhu darah diturunkan sebagai konsekuensi mulai beroperasinya pusat kontrol termoregulasi yang kemudian diikuti dengan gigitan (*shivering*). Menggigit meningkatkan laju metabolisme yang selanjutnya menghasilkan lebih banyak panas. Diduga bahwa korteks adrenal distimulasi oleh pendedahan terhadap dingin sehingga menghasilkan *noradrenalin*. Peningkatan respons metabolisme berhubungan dengan kombinasi aksi kalorinerjik adrenalin dan kelenjar tiroid.

Agar kebutuhan energi tercukupi, endotermis mengonsumsi lebih banyak makanan pada iklim yang dingin. Meskipun demikian, suplai makanan yang banyak tidak selalu dapat menjamin kebutuhan energi, sehingga terdapat pola-pola adaptasi khusus seperti hibernasi.

Hibernasi atau dikenal juga dengan dormansi musim dingin merupakan suatu fenomena di mana suhu tubuh turun drastis pada level yang rendah selama musim dingin. Hibernasi ini adalah pola adaptasi hipotermia yang umumnya ditemukan pada hewan mamalia kecil seperti rodentia, insektivora, dan kelelawar (Randall, D, Burggren, French, 1997: 704). Hibernasi memperlihatkan sejumlah perubahan fisiologis (Rastogi, 2007: 218), yang meliputi:

- a. Suhu inti tubuh turun 1-2°C di bawah suhu lingkungan.
- b. Konsumsi oksigen menurun sebesar 5% dari laju rata-rata metabolisme basal.



- c. Laju pernapasan menurun dan terkadang terhenti dalam beberapa waktu.
- d. Laju detak jantung turun, sekitar 5-6 kali per menit, namun tetapi tekanan darah tetap memadai.
- e. Tubuh sangat lamban (*torpor*) atau bahkan hampir tidur.
- f. Kadangkala hewan dapat bangkit dari kondisi *torpor* secara spontan dan dapat menciptakan suhu tubuh yang lebih tinggi dari hewan endotermis dengan cara meningkatkan produksi panas.

Respons-respons adaptif sebagai tekanan ekologis dan fisiologis seperti yang telah dijelaskan sebelumnya ditemukan pada berbagai tipe hipotermia. Burung dan mamalia berukuran kecil selalu menjaga suhu tubuhnya untuk lebih tinggi saat beraktivitas. Saat periode inaktif (malam) suhu tubuh dan konsumsi oksigen hewan ini akan turun pada level yang rendah, karena memiliki habitat makanan yang terbatas dan bersifat makan siang hari dan inaktif pada malam hari (*torpoditas*). Di daerah yang memiliki suhu rendah, mamalia kecil akan memperpanjang periode hibernasinya sedangkan sebaliknya dengan hewan mamalia yang memiliki *torpoditas* harian.

Sebelum hibernasi dimulai, hewan akan menyimpan lemak dalam jumlah besar. Hibernasi dimulai dari fase lemah dan diikuti dengan periode dormansi. Selama periode dormansi, hewan bangun sejenak. Hewan yang berhibernasi terjaga dari tidur musim dinginnya beberapa kali dan periode bangun tersebut dapat berlangsung selama beberapa jam hingga beberapa hari. Periode ini dimanfaatkan untuk mengeliminasi sisa-sisa metabolisme dan terkadang mengonsumsi makanan yang sebelumnya telah disimpan dalam tempat berhibernasinya tersebut. Penyebab bangun sejenak dari hibernasi tersebut berhubungan dengan termogenesis *shivering* dan *nonshivering* yang menghasilkan lonjakan produksi panas dan konsumsi oksigen.

2. Adaptasi Terhadap Suhu Panas

Umumnya hewan merespons periode kering atau suhu yang



tinggi dengan berestivasi untuk menghindari tekanan klimatik yang panas. Estivasi adalah suatu adaptasi hewan dengan cara istirahat dalam waktu lama pada musim panas. *Citellus* (bajing tanah) berhibernasi selama musim dingin dan akan berestivasi ketika musim kering yang cukup lama. Beberapa endotermis misalnya rodensial, insektivora, dan marsupialia juga berestivasi.

H. AKLIMATISASI TERMAL

Aklimatisasi termal merupakan istilah untuk perubahan suhu yang terjadi di alam, sedangkan aklimasi digunakan untuk istilah untuk perubahan suhu yang dikondisikan pada laboratorium. Perubahan iklim (suhu) selalu berasosiasi dengan perubahan laju metabolisme hewan. Laju metabolisme hewan akan meningkat pada kenaikan beberapa derajat suhu, dan sebaliknya menurun pada suhu rendah. Jika hewan dipelihara pada lingkungan yang baru yang berbeda dari habitat aslinya, kemungkinan hewan tersebut akan menunjukkan perubahan-perubahan spesifik untuk bisa bertahan hidup atau bahkan mengalami kematian.

Beberapa poikilotermis misalnya, akan memperlihatkan peningkatan laju metabolismenya secara tiba-tiba, ketika suhu eksternal meningkat dan pada kondisi dingin juga akan memperlihatkan penurunan yang tiba-tiba. Perubahan laju metabolisme menggambarakan kompensasi dari konsekuensi aklimatisasi. Ketika hewan tersebut kembali ke kondisi suhu normalnya, laju reaksi tidak akan kembali ke level awal, tetapi menjadi lebih tinggi atau lebih rendah, sesuai dengan arah aklimisasinya.

Amfibi dapat mentolerir suhu tinggi sebagai konsekuensi penting dari aklimisasinya. Reptilia juga memperlihatkan mekanisme termoregulasi fisiologis pada suhu tinggi. Kelompok reptilia terestrial dapat mengatur suhu tubuhnya dengan cara melakukan seleksi habitat. Kelompok hewan tersebut (amfibi dan reptil) memperlihatkan lebih banyak adaptasi perilaku. Burung dan mamalia memperlihatkan kemampuan fisiologis dalam mekanisme termoregulasi antisipasi.



Kadal yang dipelihara di laboratorium pada kondisi suhu yang konstan akan memiliki suhu tubuh sama dengan suhu lingkungan sehingga berperilaku sebagai poikilotermis. Namun kadal yang hidup di habitat alaminya akan memperlihatkan berbagai mekanisme perilaku termoregulasi. Banyak jenis ular dan kadal berpindah ke tempat yang panas jika suhu udara lebih rendah daripada suhu tubuhnya sehingga suhu tubuh akan lebih meningkat ketika terkena panas. Jika suhu tubuh meningkat, maka hewan-hewan tersebut akan bernaung dan akan menurunkan suhu tubuhnya.

Mekanisme fisiologis yang terlibat dalam mekanisme regulasi suhu pada reptil masih merupakan tahap perkembangan awal dari adaptasi hewan vertebrata terhadap suhu. Insulasi yang kurang di kulit akan menyebabkan cepatnya kehilangan panas atau peningkatan suhu. Laju pemanasan dan pendinginan dikendalikan oleh kontrol kardiovaskular. Selama makan, laju detak jantung lebih cepat dari pada saat suhu dingin. Laju pertukaran panas antara tubuh reptilia dan lingkungannya tergantung kepada volume darah yang mengalir per unit waktu di dalam tubuh dan di permukaan tubuh. Pada dasarnya, sirkulasi akan lebih cepat saat panas dan lebih lambat saat dingin. *Amblyrhynchus cristatus* (Iguana laut Galapagos) menjaga suhu tubuhnya sekitar 37°C melalui regulasi tingkah laku.

1. RINGKASAN

1. Termoregulasi adalah kemampuan hewan untuk meregulasi atau mempertahankan temperatur tubuhnya.
2. Suhu tubuh hewan terdiri dari dua komponen yaitu suhu inti tubuh dan suhu perifer tubuh.
3. Kehilangan panas tubuh hewan melalui, konveksi, konduksi, radisi, dan evaporasi. Perolehan panas tubuh melalui metabolisme tubuh dan radiasi dari lingkungan.
4. Organ yang terlibat dalam termoregulasi meliputi sistem respirasi, kulit, dan sistem ekskresi.
5. Hewan poikilotermis meregulasi suhu tubuhnya hanya melalui mekanisme fisika melalui tiga hal. *Pertama*, adanya



insulasi yang sedikit. Insulasi yang sedikit memungkinkan kehilangan panas yang lebih cepat dan dapat mencegah akumulasi panas yang tersimpan dalam tubuh. *Kedua*, memiliki suhu inti tubuh lebih rendah dari pada suhu lingkungannya. *Ketiga*, pada kondisi suhu lingkungan yang tinggi, panas tubuh akan dikurangi melalui evaporasi, sedangkan pada suhu lingkungan yang rendah, tidak terjadi proses regulasi spesifik untuk memproduksi panas

6. Hewan homeotermis (endotermis) meregulasi suhu tubuhnya secara fisika dan kimia. Termoregulasi secara fisika melalui evaporasi, insulasi berupa bulu yang tebal dan jaringan lemak. Termoregulasi secara kimia meliputi *shivering* dan *nonshivering*.
7. Heterotermis adalah kelompok hewan yang mampu meregulasi suhu tubuhnya secara endoterm dan sekaligus juga dapat meregulasi suhu tubuhnya secara ektoterm.
8. Pusat kontrol termoregulasi pada hewan endoterm adalah hipotalamus.
9. Hewan endoterm beradaptasi pada suhu dingin adalah melalui hibernasi dan pada suhu panas melalui estivasi.
10. Aklimatisasi pada hewan tertentu akan memengaruhi suhu basal tubuhnya ketika hewan tersebut di tempatkan kembali ke habitat aslinya.

J. LATIHAN

1. Jelaskan pengertian dari termoregulasi, suhu inti tubuh, suhu perifer, homeotermis, poikilotermis, heterotermis, endotermis dan ektotermis, torpor, hipertermia, hipotermia, aklimatisasi, aklimasi, adaptasi, estivasi dan hibernasi!
2. Berikan contoh hewan poikiloterm akuatik dan teresterial dan bagaimana kedua hewan tersebut meregulasi suhu tubuhnya!
3. Berikan dua contoh hewan endoterm dan bagaimana kedua hewan tersebut meregulasi suhu tubuhnya!
4. Bagaimana regulasi suhu tubuh hewan endotermis pada suhu dingin?



5. Bagaimana regulasi suhu tubuh hewan endotermis pada suhu panas?
6. Jelaskan proses fisiologi hewan yang berhibernasi!

K. REFERENSI

- Akin, J. A. (2011). Homeostatic Processes for Thermoregulation. *Nature Education Knowledge*, 3(10), 7.
- Carey, FG and Gibson, Q. (1983). Heat and oxigen exchange in the rete mirabile of the bluefin tuna, *Thunnus thynnus*. *Comp Biochem. Physiol*, 74A(2), 333–342.
- Ivanov, K. (2006). The development of the concepts of homeothermy and thermoregulation. *Journal of Thermal Biology*, 31, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2005.12.005>
- Kearney, M., Shine, R., & Porter, W. P. (2009). The potential for behavioral thermoregulation to buffer “cold-blooded” animals against climate warming. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (pp. 1–7).
- Randall, D, Burggren, French, K. (1997). *Eckert Animal Physiology: Mechanism and Adaptation*. New York: W. H. Freeman and Company.
- Rastogi, S. (2007). *Essentials of Animal Physiology* (Fourth Edi). New Delhi: New Age International (P) Ltd.
- Schmidt-Nielsen, K. (1980). *Animal Physiology: Adaptation and environment* (Second Edi). USA: Cambridge University Press.
- Simpson, S. (2007). *Advances in Insect Physiology*. New York: Elsevier Ltd.
- Willmer, P, Stone, G, Johnston, I. (2005). *Environmental Physiology of Animals* (Second Edi). USA: Blackwell Publishing company BLACKWELL.



IAIN Batusangkar

II

BAB

OSMOREGULASI

Pada Bab II ini pembelajar diharapkan mampu memahami tentang pengertian osmoregulasi, peranan osmoregulasi, prinsip dasar osmoregulasi, osmoregulator dan osmokonformer, organ osmoregulasi, respons osmotik hewan air laut, air payau dan air tawar serta hewan terestrial, mekanisme osmoregulasi (mamalia).

Bagian paling besar penyusun tubuh hewan adalah air yaitu mencapai 60-95% dari berat badan. Air di dalam tubuh hewan berada di berbagai kompartemen tubuh seperti air yang berada di dalam sel (cairan intraseluler) dan air yang berada di luar sel (cairan ekstraseluler). Cairan ekstraseluler terdistribusi di berbagai kompartemen seperti plasma darah dan cairan serebrospinal. Di dalam cairan tersebut terlarut berbagai substansi meliputi ion dan *nutrient*. Keberadaan kadar air dan substansi yang terlarut di dalam cairan tubuh merupakan hal yang penting yang harus dipertahankan oleh hewan agar fisiologi tubuh berjalan normal.

Adanya metabolisme tubuh akan memengaruhi keberadaan cairan tubuh hewan sehingga perlu pengaturan tersendiri agar cairan tersebut kadarnya tetap. Begitu juga dengan faktor lingkungan luar yang sering berubah secara tiba-tiba, khususnya pada hewan, menyebabkan hewan memerlukan regulasi bagaimana agar cairan tubuhnya tetap konstan. Ada hewan yang mampu mempertahankan cairan tubuhnya agar tetap konstan dan ada pula hewan yang tidak mampu mempertahankannya. Bagaimana prinsip pengaturan cairan tubuh, organ yang terlibat, proses pengaturannya pada hewan air laut, payau, tawar dan terestrial? Hal inilah yang akan dijelaskan pajang lebar pada pembahasan Bab 1 ini.

A. PENGERTIAN OSMOREGULASI

Osmoregulasi adalah suatu proses pengaturan konsentrasi air dan substansi terlarut lainnya oleh sel atau organisme hidup. Proses osmoregulasi diperlukan karena adanya perbedaan konsentrasi cairan sel atau tubuh dengan lingkungan di sekitarnya. Osmoregulasi sangat terkait erat dengan sistem ekskresi, karena sistem tersebut terlibat langsung dalam pengaturan kadar air dan substansi terlarut di dalam tubuh, sehingga keseimbangan tetap terpelihara demi kelangsungan fungsi-fungsi normal fisiologis. Volume dan komposisi larutan di dalam cairan tubuh dikontrol secara tepat oleh organ ekskresi dengan membuang atau mempertahankan kadarnya sesuai kebutuhan tubuh. Pada hewan akuatis, kulit dan saluran pencernaan menjadi organ yang penting bagi pengaturan garam-garam dan air.

B. PERANAN OSMOREGULASI

Osmoregulasi memiliki peranan sangat vital bagi hewan. Peranan tersebut adalah:

1. Mengatur jumlah air yang terkandung di dalam cairan tubuh sehingga tekanan osmotik tetap stabil.
2. Menjaga dan mengatur kestabilan kadar zat-zat terlarut dalam cairan tubuh seperti ion Na, K, Mg, Ca, Fe, H, Cl, I dan PO_4 . Ion-ion ini sangat vital dalam metabolisme seperti kerja enzim, sintesis protein, pigmen respirasi, permiabilitas otot, aktivitas listrik saraf dan kontraksi otot.
3. Mengatur dan menjaga kestabilan pH cairan tubuh.

C. PRINSIP DASAR OSMOREGULASI

Ada beberapa hal yang mendasari osmoregulasi, yaitu potensial kimia air, tekanan osmosis, partisi ion ekstra seluler dan intra-seluler, dan transpor zat melintasi membran (Edwards & Marshall, 2013: 5). Potensial kimia atau energi bebas molar parsial merupakan perubahan suatu sistem jika satu mol zat ditambahkan ke dalamnya. Potensial kimia dapat juga diartikan sebagai suatu ukuran



dari kecenderungan terlepas dari suatu komponen. Jika potensial kimia dari suatu komponen di dalam setiap fase tidak sama, maka komponen tersebut cenderung berpindah fase, di mana komponen yang memiliki potensial kimia yang tinggi berpindah ke komponen yang memiliki potensial kimia yang lebih rendah. Jika potensial kimianya sama di dalam kedua fase, maka kecenderungan terjadinya perpindahan dari satu fase ke fase lainnya tidak ada. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa potensial kimia air dalam cairan sel atau tubuh menjadi penentu dalam osmoregulasi. Jika potensial kimia air lebih tinggi pada suatu kompartemen, maka air akan berpindah ke kompartemen yang memiliki potensial kimia air lebih rendah. Potensial kimia air ini sangat tergantung kepada suhu, tekanan dan komposisi atau komponen zat terlarut (Larsen, Deaton, Onken, Donnell, & Grosell, 2014: 406).

Tekanan osmosis atau tekanan osmotik adalah tekanan yang dibutuhkan partikel zat pelarut agar tidak berpindah ke larutan yang memiliki konsentrasi zat terlarut yang tinggi. Proses osmosis terjadi apabila kedua larutan yang dipisahkan oleh membran *semipermeabel* memiliki tekanan osmotik yang berbeda. Pelarut (air) akan berpindah ke dalam larutan yang memiliki konsentrasi zat terlarut yang tinggi. Dengan kata lain, air akan berpindah dari larutan yang mengandung air banyak (konsentrasi zat terlarut rendah) ke larutan yang mengandung sedikit air (konsentrasi zat terlarut tinggi).

Partisi ion pada kompartemen ekstraseluler dan intraseluler berkaitan kelarutan ion-ion dalam cairan sel. Pada larutan yang encer, ion-ion akan bergerak bebas tanpa berinteraksi dengan sesamanya sehingga konsentrasi massa dari suatu ion sama dengan aktivitasnya. Adapun cairan yang kental membuat ion-ion zat terlarut saling berinteraksi termasuk dengan ion air, dan tidak bergerak bebas sehingga aktivitas ion berbeda. Partisi ion inilah yang akan menyebabkan perbedaan jumlah ion yang terlarut atau pelarut yang bisa berpindah.

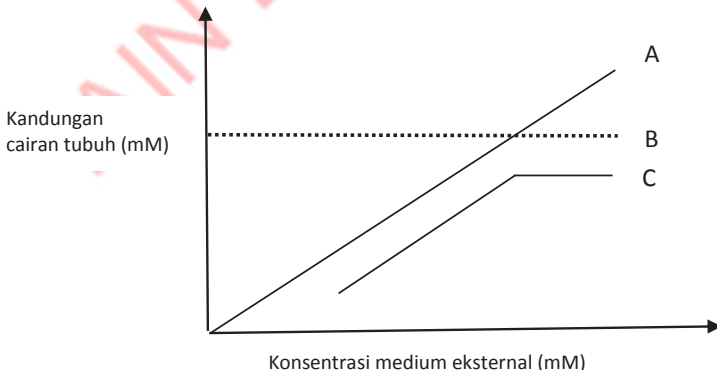
Transportasi zat melintasi membran berkaitan dengan arah perpindahan zat dari satu kompartemen ke kompartemen yang lainnya. Pada difusi, jika ada perbedaan konsentrasi, maka zat terlarut



yang tidak bermuatan akan berpindah dari kompartemen yang memiliki konsentrasi yang lebih tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah. Transpor aktif terjadi ketika fluks dipasangkan dengan proses eksergonik di membran plasma, yang memungkinkan adanya hidrolisis ATP (transpor aktif primer) atau pasif fluks ion lain (transpor aktif sekunder) yang diangkut baik dalam arah yang sama (*cotransport*) atau dalam arah yang berlawanan (*counter transport*).

D. OSMOREGULATOR DAN OSMOKONFORMER

Secara umum, hewan dibagi menjadi dua kategori besar dalam hal respons mereka terhadap stres osmotik yaitu osmoregulator, hewan yang mampu mempertahankan osmolaritas internalnya ketika berbeda dari lingkungan eksternal, dan osmokonformer yaitu hewan yang mengubah konsentrasi osmotik cairannya untuk berkonformasi dengan medium eksternalnya. Umumnya vertebrata adalah osmoregulator ketat, karena mereka mampu mempertahankan ionik dan keseimbangan osmotik dalam batas yang sempit; meskipun *hagfish*, kelompok basal vertebrata, adalah pengecualian penting (Sardella, Baker, and Brauner, 2009: 271). Sebaliknya, invertebrata biasanya dikategorikan sebagai osmokonformers ketat, karena banyak dari mereka tampaknya berada da-

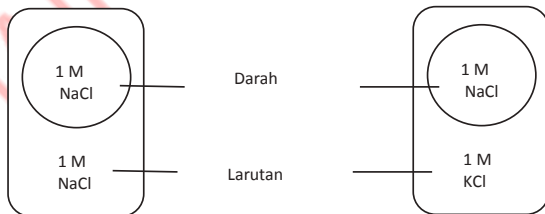


GAMBAR 2.1. Tipe organisme dalam hubungannya dengan konsentrasi cairan tubuh dan cairan eksternal. Spesies A adalah osmokonformer, Spesies B adalah osmoregulator, dan Spesies C adalah keduanya.



lam keseimbangan osmotik dengan air laut pada kisaran salinitas sempit. Namun, ada banyak pengecualian termasuk *tardigrade* laut *Halobiotus crispae* serta beberapa anggota *Crustacea* (Halberg, 2012: 12). Hewan yang digambarkan sebagai osmokonformer sebenarnya mempertahankan sedikit perbedaan antara lingkungan internal dan eksternal. Sebagai contoh adalah kepiting laut yang tetap mempertahankan konsentrasi garam dalam tubuhnya untuk tetap tinggi setelah dipindahkan ke air payau yang lebih rendah kadar garamnya.

Hewan air tawar memiliki cairan tubuh yang secara osmotik lebih pekat daripada medium eksternal, sehingga disebut sebagai kelompok hiperosmotik. Dengan demikian, konsekuensinya maka air dengan mudah memasuki jaringan ikan tersebut, dan akan memengaruhi zat terlarut dalam cairan tubuhnya. Namun, karena adanya osmoregulasi, maka pemasukan air ke dalam jaringan bisa diminimalisir sehingga fisiologi tetap berjalan normal. Jika hewan tersebut memiliki konsentrasi osmotik lebih rendah daripada medium eksternalnya, seperti pada kelompok ikan teleostei di laut, maka disebut sebagai hiposmotik. Konsekuensinya air akan keluar dari jaringan tubuh ikan teleostei, namun dengan adanya osmoregulasi, maka hal tersebut bisa diatasi. Jika dua sistem misalnya antara cairan tubuh dengan medium eksternalnya memiliki konsentrasi osmotik yang sama maka disebut sebagai isosmotik.



GAMBAR 2.2. Ilustrasi isosmotik. Konsentrasi larutan di luar dan di dalam sel adalah sama tetapi jenis ion tidak sama. Dalam hal ini, di dalam sel ada ion Na^+ , di luar ada ion K^+ . Jika membran sel bersifat selektif *permeabel* terhadap ion K^+ maka ion akan masuk ke dalam sel dan menyebabkan cairan intraseluler bersifat hiperosmotik terhadap larutan di dalam tabung sehingga akan terjadi osmosis air ke dalam sel dan sel akan membesar hingga akhirnya pecah.



Istilah hipo, hiper, dan isosmotik berbeda dengan tonisitas. Istilah hipo, hiper, dan isosmotik bukan mencerminkan komposisi larutan atau sifat fisika kimia larutan. Contohnya, larutan 1 M KCl bersifat isosmotik dengan 1 M larutan NaCl karena keduanya memiliki jumlah partikel terlarut yang sama. Adapun tonisitas mengacu kepada respons sel ketika di tempatkan pada larutan yang berbeda. Misalnya, ketika sel hewan di tempatkan di dalam aquades, kadar air dalam sel akan meningkat secara cepat dan akhirnya akan pecah. Aquades bersifat hipotonik terhadap cairan dalam sel. Jika sel hewan di tempatkan dalam larutan garam pekat, sel-sel akan kehilangan air secara cepat dan akan mengerut. Larutan garam yang pekat tersebut bersifat hipertonik terhadap cairan dalam sel. Jika sel diletakkan di larutan di mana sel kemudian tidak mengalami perubahan apa-apa, maka larutan tersebut bersifat isotonik terhadap cairan dalam sel.



GAMBAR 2.3. Ilustrasi larutan isotonik, hipotonik, dan hipertonik. Isotonik apabila konsentrasi larutan di luar dan di dalam sel adalah sama. Jenis dan jumlah ion juga sama.

Kelompok hewan osmokonformer akan mengalami peningkatan konsentrasi osmotik cairan tubuh apabila osmotik cairan eksternalnya meningkat, begitu sebaliknya. Jika hewan mengalami peningkatan perubahan konsentrasi cairan tubuh dalam rentang yang luas disebut eurihalin. Adapun kelompok osmoregulator disebut stenohalin karena umumnya tidak terlalu kuat untuk menghadapi perubahan osmotik eksternal sehingga rentang toleransinya tidak terlalu luas terhadap dinamika osmotik cairan eksternal.



Kelompok osmoregulator terbagi dua, yaitu kelompok *hipoosmotik* regulator dan *hiperosmotik* regulator. Jika hewan mampu mempertahankan konsentrasi cairan tubuh lebih rendah daripada lingkungan eksternalnya maka dikelompokkan ke dalam *hipoosmotik* regulator. Contohnya adalah beberapa spesies *crustacea*. Jika hewan mampu mempertahankan konsentrasi cairan dalam tubuh lebih tinggi daripada di lingkungan eksternal digolongkan ke dalam *hiperosmotik* regulator. Contohnya adalah kepiting. Adapun semua hewan terestrial adalah osmoregulator yang dapat juga bersifat eurihalin atau stenohalin.

E. ORGAN OSMOREGULASI

Organ osmoregulator adalah organ khusus yang terlibat dalam mempertahankan ionik dan homeostasis osmotik. Organ spesifik yang memediasi proses ini dapat bervariasi di antara berbagai kelompok hewan. Namun, dasar molekuler dan mekanisme spesifik zat terlarut dan transportasi air menunjukkan pola yang sangat konvergen/homolog di berbagai jenis sel epitel hewan.

1. Insang

Insang ikan adalah organ utama untuk regulasi osmotik dan ionik, regulasi asam-basa, dan pembuangan limbah nitrogen, serta praga utama untuk pertukaran gas. Insang pada ikan lamprey air tawar, elasmobranchiata, dan teleostei adalah organ utama untuk menyerap ion dari lingkungan encer, sedangkan insang pada lamprey laut dan ikan teleostei laut adalah organ utama sekresi garam (Evans, Piermarini, & Choe, 2005: 120).

2. Ginjal dan Kantung Kemih

Ginjal lamprey dan *elasmobranchiata* semuanya memiliki glomerulus nefron, yang juga berlaku pada ikan air tawar dan spesies teleostei eurihalin. Pada teleostei laut, glomerulus ginjal jumlahnya sedikit atau pada banyak kasus, kekurangan glomeruli. Pada ikan air tawar, filtrasi glomerulus dan laju aliran urin tinggi, karena jumlahnya berlebihan membuat urin encer sehingga perlu menge-



luarkan air berlebih yang diperoleh melalui osmosis insang dan meminimalkan hilangnya ion dalam urin. Pada beberapa ikan air tawar, kandung kemih berperan meningkatkan reabsorpsi ion urin. Epitelnya memiliki permeabilitas osmotik yang rendah, sehingga memastikan urin yang sangat hipotonik (Marshall & Grosell, 2006: 181). Sebaliknya, ginjal dari spesies laut kekurangan glomeruli sehingga menghasilkan jumlah urin yang sangat sedikit, dengan peran utama osmoregulasi adalah ekskresi kelebihan ion divalen (terutama Mg^{2+} · SO_4^{2-}) yang diserap oleh usus dari air laut yang terserap melalui makanan.

Unit fungsional ginjal vertebrata adalah nefron, yang terdiri dari unit filtrasi dan tubulus ginjal. Proses penyaringan yang terjadi di unit filtrasi (kapsul glomerulus dan Bowman) adalah bersifat 'Pasif' yaitu sepenuhnya digerakkan oleh tekanan hidrostatis yang dihasilkan oleh jantung, sedangkan proses reabsorpsi dan sekresi berlangsung karena adanya spesialisasi epitel tubulus ginjal (Schmidt-Nielsen, 1980: 344). Transporter utama pada membran ginjal adalah Na/K-ATPase. Dengan sifat ginjal seperti ini, maka ginjal vertebrata dapat menghasilkan cairan urin yang encer, isosmotik ataupun urin pekat, tergantung kondisi cairan tubuh. Hal inilah yang telah menjadi faktor dominan dalam memungkinkan vertebrata menembus ke semua jenis habitat di bumi.

Kandung kemih merupakan organ utama untuk reabsorpsi NaCl tetapi epitelnya memiliki permeabilitas osmotik yang tinggi dan penyerapan NaCl memfasilitasi reabsorpsi air (Loretz & Bern, 1980: R417).

Pada invertebrata seperti serangga memiliki tabung malphigi yang analog dengan fungsional dari ginjal vertebrata, tetapi merupakan sistem sekresi-reabsorpsi yang menghasilkan urin yang secara fundamental berbeda dari sistem filtrasi-reabsorpsi hewan vertebrata (Beyenbach & Piermarini, 2011: 387). Dengan tidak adanya pembuluh darah (yaitu sistem peredaran darah tertutup), maka hemolimfa serangga diedarkan pada tekanan yang tidak mencukupi untuk penyaringan, dan tubulus malphigi membentuk urin (primer) dan urin primer yang disekresikan ke rektum.



Pembentukan urin primer umumnya dimulai pada segmen distal (ujung tanpa ujung) dari tubulus malphigi, dan pada dasarnya isoosmotik (terutama terdiri dari KCl dan NaCl) ke *hemolymph*. Reabsorpsi air, ion, dan metabolit selanjutnya di dalam proporsi yang mempertahankan homeostasis ekstraseluler (suatu proses yang analog dengan vertebrata) berlangsung di struktur hilir yaitu tubulus proksimal, *hindgut* dan rektum. Komposisi urin akhir disesuaikan dalam rektum dan mungkin sangat hipo atau *hyperosmotic* tergantung pada spesies dan status fisiologisnya (Reynolds & Bellward, 1989: 33).

3. Saluran Pencernaan

Anatomi saluran pencernaan sangat bervariasi tergantung spesies hewan dan berkaitan dengan makanan dan cara memperolehnya. Meskipun demikian, pada ikan ataupun hewan lainnya, saluran pencernaan memiliki peran penting dalam osmoregulasi karena pencernaan bergantung pada sekresi dan penyerapan elektrolit (Karasov dan Hume, 1997). Ikan laut juga minum air dan menggunakan saluran pencernaan sebagai organ osmoregulasi utama untuk menyerap air untuk mengimbangi kerugian osmotik. Proses ini dimulai dengan desalinisasi esofagus dan regulasi sfingter jantung. Sfingter jantung biasanya mengatur perjalanan makanan ke dalam lambung dari kerongkongan dan mengatur sfingter pilorik bagian chyme ke dalam usus. Proses penyerapan dan sekresi usus berlangsung dan menghasilkan keluaran berupa cairan dubur. Secara khusus, posterior usus mengeluarkan HCO_3^- , yang mengendapkan karbonat Mg^{2+} dan Ca^{2+} di lumen usus dan dengan demikian mengurangi osmolalitas *chyme*. Lebih lanjut pengambilan air kemudian dimungkinkan (Marshall & Grosell, 2006: 182).

4. Kelenjar Rektum pada Elasmobranchiata

Kelenjar rektum *elasmobranch* laut mengeluarkan cairan atau urin yang sangat terkonsentrasi (NaCl hingga 1,0 M). Sekresi ini mengalir melalui sebuah saluran yang mengarah ke dalam usus,



distal ke katup spiral. Tubulus sekretoris terdiri dari banyak ionosit yang memiliki membran basolateral yang sangat diperluas dan memiliki penampilan yang mirip dengan sel-sel yang terkait dengan organ *saltsecreting vertebrata* lainnya di reptil laut dan burung (Burger, 1965: 192).

5. Kulit, Membran Operkular, dan Kantung Yolk

Beberapa ikan memiliki kulit yang sangat vaskularisasi yang mengandung banyak ionosit dengan kemampuan transportasi ion (Leblanc, Wood, Fudge, & Wright, 2010: 84). Pada ikan gobi, diperkirakan 10-20% dari total transpor ion dilakukan melintasi permukaan kulit. Membran *opercular killifish* (*Fundulus heteroclitus*) dan nila (*Oreochromis mossambicus*) banyak digunakan sebagai model untuk mempelajari transportasi dan regulasi ion (Marshall *et al.*, 1997: 23).

Membran kantung kuning telur sebelum menetas berfungsi sebagai permukaan ionoregulator tunggal. Banyaknya ionosit yang terdiferensiasi menjadi sistem model informatif untuk sekresi ion pada *seabass* (*Dicentrarchus labrax*) (Sucre', E, Charmantier-Daures, M, Grousset and, E Cucchi-Mouillot, 2011: 27) dan penyerapan ion pada *zebrafish* (Kumai, & Perry, 2011: R1517). Membran *yolk-sac* sangat membantu dalam menyelesaikan regulasi mekanisme penyerapan air tawar, kerja $H^+ / ATPase$ dan transportasi amonium melalui Rhcg1 (Kumai, & Perry, 2011: R15125).

F. RESPONS OSMOTIK HEWAN

Respons osmotik merupakan bentuk respons atau tanggapan hewan dalam menjaga kestabilan osmotik cairan tubuhnya ketika terjadi gangguan atau perubahan lingkungan. Respons osmotik hewan terkait erat dengan lingkungan tempat hewan tersebut hidup. Respons osmotik hewan menggambarkan bagaimana hewan meregulasi osmotik cairan tubuhnya agar fisiologi berjalan normal. Oleh karena itu, respons osmotik berbeda pada hewan yang hidup di air laut, air tawar, air payau, dan hewan terestrial.



1. Regulasi Osmotik Hewan Laut

a. Invertebrata

Invertebrata laut pada umumnya termasuk ke dalam kelompok osmokonformer (Rastogi, 2007: 170; Schmidt-Nielsen, 1980: 306). Jika tidak ada penambahan dan pengurangan kandungan air cairan tubuhnya, maka konsentrasi osmotik cairan tubuh invertebrata laut sama dengan air laut, sehingga kondisinya berada dalam kesetimbangan. Walaupun demikian, pada dasarnya keseimbangan ion tidak pernah terjadi, sehingga jika terjadi sedikit saja perbedaan komposisi ion antara tubuh dan air laut, maka gradien konsentrasi terbentuk. Apabila gradien konsentrasi terbentuk, maka keseimbangan osmotik terganggu dan dapat memengaruhi aspek-aspek fisiologis tubuh. Contohnya, jika ion dalam tubuh hewan lebih rendah daripada di air laut, maka akan menciptakan kondisi hiperosmotik cairan tubuh terhadap air laut dan akhirnya akan meningkatkan osmotik air. Komposisi cairan tubuh dari beberapa invertebrata laut dan kandungan dalam air laut itu sendiri disajikan pada Tabel 2.1.

TABEL 2.1. Konsentrasi beberapa ion utama (dalam milimol/kg air laut) di air laut dan di dalam cairan tubuh hewan-hewan invertebrata

	Ion						Protein (g liter ⁻¹)
	Na	Mg	Ca	K	Cl	SO ₄	
Air laut	478,3	54,5	10,5	10,1	558,4	28,8	-
Jellyfish (<i>Aurelia</i>)	474	53,0	10,0	10,7	580	15,8	0,7
Polychaeta (<i>Aphrodite</i>)	476	54,6	10,6	10,5	557	26,5	0,2
Sea Urchin (<i>Echinus</i>)	474	53,5	10,6	10,1	557	28,7	0,3
Mussel (<i>Mytilus</i>)	474	52,6	11,9	12,0	553	28,9	1,6
Squid (<i>Loligo</i>)	456	55,4	10,6	22,1	478	81	150
Isopod (<i>Ligia</i>)	556	20,2	34,9	13,3	629	4,0	-
Crab (<i>Maia</i>)	488	44,1	13,6	12,4	554	14,5	-
Shore crab (<i>Carcinus</i>)	531	19,5	13,3	12,3	557	16,5	60
Norwgia lobster (<i>Nephrops</i>)	541	9,3	11,9	7,8	552	19,8	33

Sumber: (Schmidt-Nielsen, 1980: 306)



Secara umum, konsentrasi osmotik ion-ion tidak berbeda secara signifikan terhadap air laut. Akan tetapi ada beberapa pengecualian, yaitu ion SO_4^{2-} . Hal ini berarti bahwa konsentrasi SO_4^{2-} tersebut membutuhkan regulasi fisiologis. Regulasi fisiologis harus secara aktif disekresikan atau diabsorpsi. Pada ubur-ubur (*Aurelia*), SO_4^{2-} diekskresikan untuk menurunkan kepekatan cairan tubuhnya dan dengan demikian membuat daya apungnya juga akan meningkat. Ion SO_4^{2-} merupakan ion yang cukup berat sehingga pengurangannya dari dalam tubuh akan menurunkan berat hewan sekaligus meningkatkan daya apung (Schmidt-Nielsen, 1980: 291). Adapun kelompok invertebrata laut lainnya seperti *Ligia* dan *Maia* tetap mempertahankan konsentrasi ion Ca dan K tetap tinggi dalam cairan tubuhnya dan mempertahankan agar ion PO_4 tetap rendah.

Proses peningkatan atau pengurangan ion-ion yang tidak memerlukan regulasi dapat terjadi melalui permukaan tubuh dan insang, melalui penelanan makanan dan produksi zat sisa (urin). Beberapa invertebrata seperti *Octopus*, konsentrasi cairan tubuhnya tetap dijaga dalam kondisi hiperosmotik (lebih pekat) daripada air laut, sedangkan *brine shrimp* (*Artemia*) dan beberapa *crustacea* lainnya cenderung mempertahankan agar konsentrasi cairan tubuhnya dalam keadaan hiposmotik (lebih encer) (Schmidt-Nielsen, 1980: 296). Hal ini merupakan pengecualian dari pola umum osmoregulasi invertebrata air laut.

b. Vertebrata

Vertebrata laut memiliki pola osmoregulasi tersendiri. Vertebrata air laut dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu osmotik dan ionik konformer dan osmotik dan ionik regulator (Evans *et al.*, 2005: 120). Contoh kelompok osmotik dan ionik konformer yaitu hagfish (*Myxine*) (Sardella, BA, Baker, DW, Brauner, 2009: 721). *Myxine* merupakan vertebrata primitif dari kelompok *cyclostoma* yang memiliki pola osmoregulasi sama dengan hewan invertebrata air laut. Pola osmotik dan ionik konformer dari *Myxine* ini menjadi salah satu bukti bahwa secara fisiologis hewan vertebrata berasal dari laut.



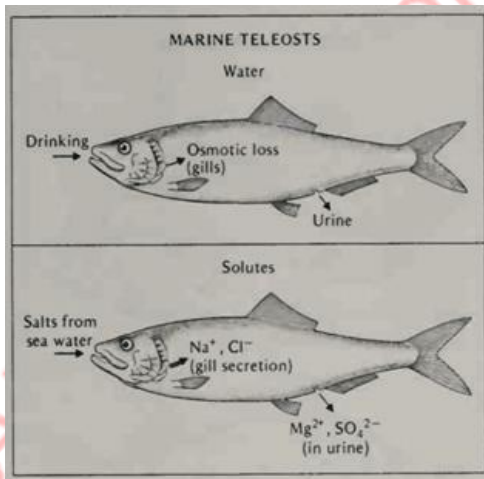
Contoh vertebrata laut yang termasuk kelompok osmotik dan ionik regulator adalah *elasmobranchiata* (ikan bertulang rawan). Pada hewan kelompok ini, konsentrasi plasmanya sepertiga dari konsentrasi air laut. Hal ini tentu menimbulkan permasalahan serius berupa (1) kehilangan air dari dalam tubuhnya dan (2) terjadinya peningkatan kadar ion. Untuk meminimalisir kehilangan air tubuh, hewan ini memasukkan larutan urea dan *trimetilamin oksida* (TMAO) ke dalam plasma selnya agar keseimbangan osmotik terjadi.

Kehilangan air diminimalisir dengan cara mengupayakan tercapainya keseimbangan osmotik melalui penambahan larutan ke dalam plasma. Larutan yang ditambahkan tersebut adalah urea dan *trimetilamin oksida* (TMAO) (Edwards & Marshall, 2013: 18). Penambahan urea dan TMAO ke dalam plasma dalam rangka mencapai kesetimbangan osmotik tersebut pada akhirnya menjadikan tubuh hewan bersifat hiperosmotik terhadap air laut. Akibatnya, hewan ini akan mengalami peningkatan kadar air, khususnya melalui permukaan tubuh dan insang, yang memiliki struktur yang sangat ideal untuk tempat terjadinya pertukaran air dan ion secara efektif. Mekanisme osmoregulasi ini sangat menguntungkan *elasmobranchiata* karena kelebihan air digunakan untuk memproduksi urin dan mengeluarkan produk sisa misalnya kelebihan ion-ion yang masuk melalui difusi ke dalam tubuh lewat insang. Dengan kata lain, dengan adanya penambahan air dalam tubuh membuat hewan tersebut tidak perlu lagi meminum air laut agar tubuh tidak kekurangan air. Dengan cara ini juga sekaligus hewan ini tidak akan menelan garam-garam yang terlarut di air dalam jumlah yang besar. Adanya penambahan urea dalam jumlah yang banyak pada *elasmobranchiata* ini menimbulkan permasalahan baru yaitu menyebabkan terjadinya denaturasi dan menonaktifkan protein-protein plasma. Namun, permasalahan ini teratasi dengan adanya kerja enzim spesifik dan protein yang tidak dapat berfungsi secara tepat tanpa adanya urea.

Terjadinya peningkatan ion plasma pada *elasmobranchiata* disebabkan masuknya ion-ion yang ada dia air laut ke dalam tubuh



hewan, akibat komposisi dan konsentrasi ion plasma yang berbeda dengan air laut, sehingga menimbulkan adanya gradien konsentrasi. Gradien konsentrasi memicu ion untuk bergerak ke dalam tubuh hewan dari air laut. Contohnya, adanya influks ion Na^+ dalam jumlah sangat besar lewat insang. Namun permasalahan ini diatasi dengan adanya kelenjar rektal yang berperan penting dalam ekskresi kelebihan ion Na^+ ini. Kelenjar rektal merupakan kelenjar spesifik yang bermuara ke rektum dan menyekresikan cairan yang kaya akan ion NaCl . Influks osmotik yang rendah dari air ke dalam tubuh hewan tersebut memicu produksi urin yang merupakan jalur lain untuk mengurangi kelebihan NaCl . Kelenjar rektal ini mirip fungsinya dengan insang pada ikan teleostei.



GAMBAR 2.4. Regulasi osmotik dan ion pada ikan teleostei air laut (Schmidt-Nielsen, 1980: 303).

Pada ikan air laut yang bertulang sejati (teleostei), terdapat juga permasalahan yang sama seperti yang dihadapi oleh *elasmobranchiata* di mana konsentrasi plasmanya lebih rendah dari pada air laut. Kehilangan air, khususnya melalui insang, akan dikompensasikan melalui mekanisme meminum air laut dalam jumlah yang banyak (sekitar 50-200 ml/kg bb/hari). Hal ini akan mengatasi



satu permasalahan akan tetapi akan menimbulkan permasalahan lainnya yaitu terjadinya peningkatan kadar garam di dalam tubuh. Oleh karena itu, hewan harus mengatasinya dengan mengekskresikan NaCl dalam jumlah yang banyak. Karena ginjal pada teleostei tidak mampu menghasilkan urin yang pekat, maka harus ada organ lain yang mampu mengekskresikan sejumlah besar NaCl tersebut. Organ tersebut adalah insang.

Pada insang teleostei air laut memiliki sel-sel khusus yang dikenal dengan sel klorida. Sel klorida ini berfungsi dalam transpor aktif NaCl dari plasma ke air laut. Ion Cl⁻ akan dikeluarkan secara aktif dari darah ke sel-sel klorida, dan bersamaan dengan terjadinya difusi pasif ion Na⁺. Terjadinya transpor ini menyebabkan Cl⁻ bergerak secara pasif keluar dari insang menuju air laut.

2. Regulasi Osmotik pada Hewan Air Payau

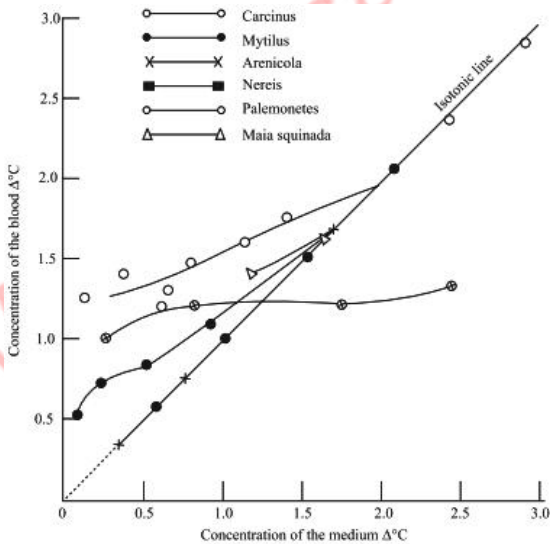
Air payau adalah air yang memiliki konsentrasi garam 1.5%-90% dari air laut murni (air laut encer). Air payau terbatas pada daerah-daerah pantai seperti estuaria atau lahan gambut tepi laut di mana air laut dan air sungai bercampur. Hewan air laut tidak dapat bertahan hidup pada keenceran di bawah batas atas dari konsentrasi air payau.

Hewan laut yang hidup di perairan dangkal yang berdekatan dengan pantai dan di dekat estuaria secara konstan mengalami perubahan-perubahan konsentrasi air. Hewan laut yang tidak dapat menoleransi variasi konsentrasi harus melakukan modifikasi-modifikasi yang sesuai, baik modifikasi dari aspek biokimia, fisiologi dan tingkah laku agar dapat hidup pada kondisi lingkungan air yang bervariasi konsentrasinya dan sewaktu-waktu dapat berubah drastis. Hewan air laut yang hidup di lingkungan bergradien salinitas tidak ekstrem (dari air laut ke air tawar) memberikan kesempatan bagi berlangsungnya adaptasi yang gradual pula dari hewan laut tersebut. Dengan kata lain, hewan air laut dapat hidup pada lingkungan air payau apabila ia dihadapkan pada gradien salinitas yang tidak ekstrem dan secara bertahap. Fauna laut yang hidup di antara rentang salinitas air payau terdiri atas tiga tipe (Rastogi, 2007: 172) yaitu:



- Hewan laut yang toleran terhadap salinitas rendah akan berada di bagian di mana salinitasnya adalah batas atas dari salinitas air payau. Contohnya adalah *Caricinus maenas* (kepiting pantai) dan *Mytilus edulis* (remis).
- Hewan air tawar yang toleran terhadap salinitas sedang akan berada di bagian di mana salinitasnya adalah batas bawah dari salinitas air payau.
- Hewan-hewan air payau sejati yang tidak ditemukan baik di air laut maupun di air tawar kendati hewan tersebut dapat bertahan hidup di dalamnya. Contohnya adalah *Palaeomonetes varians* dan *Nereis diversicolor*.

Jumlah spesies air laut akan menurun dengan gradien salinitas karena hewan laut bersifat isoosmotik pada kondisi 100% air laut dan semua hewan tersebut tidak dapat menjaga kesetimbangan osmotik tubuhnya pada salinitas yang lebih rendah dari air payau.



GAMBAR 2.5. Grafik yang memperlihatkan bahwa hewan air payau dapat mentoleransi perubahan konsentrasi medium eksternalnya. Konsentrasi darah dari hewan-hewan tersebut bervariasi secara langsung dengan perubahan konsentrasi medium eksternalnya (Rastogi, 2007: 173).



Gambar 2.5. menjelaskan bahwa hewan-hewan tersebut berkonformasi dengan fluktuasi salinitas yang terjadi di lingkungan eksternalnya. Hewan-hewan merespons perubahan konsentrasi medium eksternal dengan mengubah konsentrasi cairan tubuh pada level yang sesuai agar fisiologi tubuh normal. *Arenicola* (*Annelida*) dan *Mytilus* (*Lamellibranchiata*) pada gambar tersebut tergolong spesies isoosmotik, yang tidak memiliki kemampuan untuk mengatur konsentrasi darah mereka terhadap perubahan konsentrasi medium. Namun, penurunan konsentrasi darah selaras dengan konsentrasi eksternal menimbulkan masalah pengaturan antara darah dan sel-sel tubuh pada umumnya. Pada hewan-hewan ini darah bersifat *hyposmotic* terhadap sel. Karenanya regulasi osmotik dan ionik dibatasi antara sel dan darah.

Carcinus (*Decapoda*) memiliki kemampuan untuk mengatur konsentrasi darah mereka untuk mempertahankannya pada tingkat hiperosmotik, meskipun terjadi perubahan besar dalam konsentrasi air payau. *Carcinus* dan *Maia* menunjukkan adanya hubungan antara variasi konsentrasi medium dan cairan tubuh. Hewan ini mampu melakukan osmoregulasi apabila ada di muara (estuari), namun jika darah bersifat isoosmotik terhadap media air lautnya, hewan ini tidak bisa melakukan osmoregulasi. Pada *Nereis*, kemampuan untuk regulasi osmotik kurang dari *Carcinus* tetapi hewan tersebut mampu hidup bahkan di air laut yang kadar salinitasnya 5 persen karena dapat mentolerir efek osmotik dari salinitas rendah dengan secara tepat dapat mengurangi konsentrasi darah ke tingkat yang setara dengan 30 persen air laut.

Konsentrasi darah udang air payau, yaitu *Palaeomonetes* agak berbeda dari hewan laut yang hidup di perairan payau. *Palaeomonetes* mempertahankan konsentrasi darahnya yang sesuai dengan 50-70 persen air laut, bahkan ketika konsentrasi rentang menengah di mana saja antara 5 dan 110 persen air laut. Tampaknya ia juga dapat bertahan hidup dalam konsentrasi di bawah 5 persen air laut, tetapi di bawah 0,5 persen air laut akan mati. Pada grafik diketahui bahwa *Carcinus*, *Mytilus*, *Arenicola*, dan *Nereis* dalam batas tertentu cenderung bertindak sejalan dengan rendahnya



konsentrasi medium dengan mengurangi konsentrasi cairan tubuh mereka serendah mungkin, sehingga mengurangi kerja aktif yang diperlukan untuk mempertahankan regulasi ionik dan osmotik. Ini adalah pola umum untuk semua hewan air laut yang menembus ke dalam air tawar; dan, pada kenyataannya, semua spesies air tawar memiliki konsentrasi darah lebih rendah dari kerabat terdekat mereka.

Seluruh artropoda air payau menjaga konsentrasi darahnya lebih tinggi daripada konsentrasi mediumnya. Oleh karenanya air cenderung untuk masuk ke tubuh melalui proses osmosis dan ion-ion cenderung keluar melalui difusi. Untuk menjaga kondisi hiperosmotik kondisi darahnya, air yang masuk akan kembali ke medium dan ion yang keluar akan ditransportasikan secara aktif untuk kembali ke darah. Air dikeluarkan dari darah khususnya sebagai urin dan sebagian sebagai air ekstra renal.

Carcinus kurang permeabel terhadap garam dan air jika dibandingkan dengan hewan-hewan seperti *Cancer* dan *Hyas*. Urin yang dihasilkan oleh *Carcinus* bersifat isoosmotik terhadap darah tetapi hiperosmotik terhadap medium eksternal. Diperkirakan dengan kondisi tersebut, garam akan hilang bersamaan dengan eliminasi air. Studi pelacakan terhadap senyawa-senyawa dalam tubuh telah membuktikan bahwa kehilangan garam juga terjadi melalui ekskresi eksternal air. Organ antennari pada *crustacea* diketahui memiliki peran utama pada regulasi ion daripada regulasi osmotik. Cairan yang dihasilkan oleh organ antennari mengandung magnesium yang tinggi dibandingkan dengan cairan di luar tubuh. Magnesium selanjutnya akan diekskresikan melalui lubang ekskretoris. Selanjutnya, kehilangan garam akan dikompensasi melalui transpor aktif garam melalui insang.

3. Regulasi Osmotik Pada Hewan Air Tawar

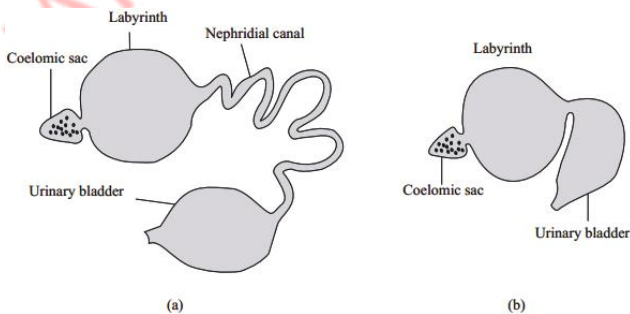
Hewan-hewan air tawar memiliki cairan tubuh bersifat hiperosmotik terhadap medium eksternalnya. Kelompok ini memiliki permasalahan osmotik sama dengan yang dihadapi oleh hewan air payau, akan tetapi pada skala yang lebih ekstrem. Hewan air



tawar mengembangkan mekanisme-mekanisme osmoregulasi baik terhadap osmotik maupun ionik dengan efektivitas yang lebih baik dari pada hewan air payau.

Permeabilitas permukaan tubuh hewan air tawar lebih rendah dari pada hewan air payau. Namun, moluska air tawar memiliki permeabilitas permukaan tubuh yang lebih tinggi sehingga air dapat masuk lebih mudah ke dalam tubuhnya. Influks air ke dalam tubuh dikurangi dengan semaksimal mungkin agar konsentrasi darah dari moluska lebih rendah daripada kebanyakan hewan air tawar lainnya, agar tidak membahayakan sistem fisiologis.

Masuknya air ke dalam tubuh akan mereduksi konsentrasi darah. Untuk menstabilkan konsentrasi darah tersebut, baik air maupun garam harus dikeluarkan dari darah. Hewan air tawar mempertahankan kandungan garam dengan memproduksi urin yang lebih encer dari pada darah. Pada beberapa hewan kadar urin bersifat isoosmotik terhadap darah. Kendati kehilangan garam melalui urin diminimalisir, laju kehilangannya akan terus berlangsung. Pembentukan urin yang sangat encer adalah salah satu cara di mana tubuh mengurangi kelebihan air. Pada udang, dalam 24 jam dapat menghasilkan urin sebanyak 4% dari berat tubuhnya. Produksi urin sangat esensial bagi regulasi osmotik dan ionik dan fungsi tersebut dilakukan oleh kelenjar antennari. Kelenjar tersebut memiliki kantung koelomik, labirin, kanal nephridial dan kantung kemih. Pembentukan urin terjadi melalui filtrasi di kantung koelomik.



GAMBAR 2.6. Kelenjar antennari. (a) udang air tawar *Astacus*, dan (b) udang laut *Homarus* (Rastogi, 2007: 175)



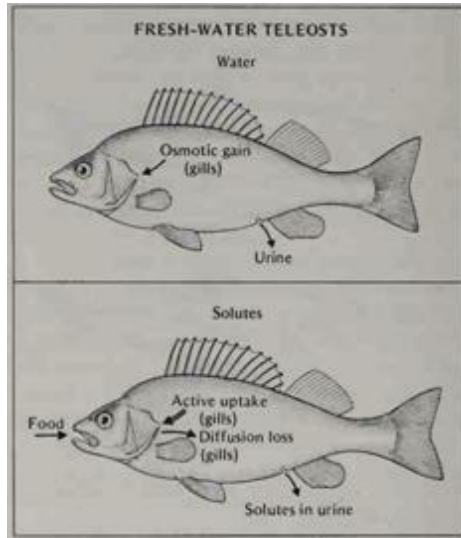
Astacus memiliki saluran nephridial yang panjang yang tentunya akan meningkatkan luas area totalnya, sehingga suplai darah ke kelenjar antennari lebih banyak pada hewan air tawar daripada hewan air laut. Ukuran dan jumlah pembuluh darah yang mengalir ke kelenjar antennari juga lebih besar pada udang air tawar dari pada udang air laut. Saluran nephridial yang lebih panjang ini berfungsi untuk mengabsorpsi klorida dan menyekresikan air. Udang air tawar (*Astacus*) mengkompensasi kehilangan air dan garam dengan cara melakukan pengambilan substansi melalui insang secara kontinu meskipun konsentrasi substansi-substansi tersebut lebih rendah di luar tubuh. Selain itu juga, dilakukan melalui makanan sehingga kebutuhan substansi yang dibutuhkan dapat terpenuhi secara optimal. Adanya gradien yang rendah antara konsentrasi darah dan medium air tawar di luar tubuh *Astacus*, menyebabkan diperlukannya kerja minimum bagi berlangsungnya transpor aktif dari substansi-substansi yang diregulasi sehingga dapat menghemat energi.

Pada larva serangga air tawar, regulasi osmotik dan ionik dilakukan oleh area spesifik pada saluran pencernaan. Pada *Aedes aegypti* terdapat papila anal dan papila rektal yang dindingnya berperan dalam mempertahankan kadar garam dalam tubuh.

Ikan teleostei air tawar dan belut *lampreys* memiliki kondisi osmotik dan mekanisme regulasi yang sama dengan invertebrata. Baik lamprey maupun teleostei memiliki darah yang hiperosmotik. Konsentrasi darah pada spesies-spesies air tawar dijaga pada level yang konstan. Dengan kondisi konsentrasi darah yang hiperosmotik, air cenderung untuk masuk ke dalam tubuh melalui permukaan tubuh, insang, dan epitelium mulut. Permeabilitas kulit lamprey lebih tinggi dari pada teleostei. Lamprey memiliki kulit yang licin sedangkan teleostei ditutupi sisik. Sisik sangat berpengaruh dalam menurunkan laju difusi air. Lamprey memperoleh air melalui kulit, sedangkan ikan teleostei lebih banyak melalui insang. Selama 24 jam ikan teleostei dapat mengambil air sekitar 30% dari berat tubuhnya dan disekresikan dalam jumlah banyak melalui urin. Seluruh garam yang ada di dalam urin akan direabsorpsi sehingga



konsentrasi urin 0.04 molar yang bersifat hipoosmotik terhadap darah. Garam yang diperoleh melalui makanan lebih sedikit dari pada garam yang dibuang keluar tubuh. Garam yang keluar tubuh tersebut dikompensasi dengan pengambilan secara aktif melalui insang. Dengan demikian, ikan air tawar tidak meminum air untuk mengimbangi kehilangan air dan garam.



GAMBAR 2.6. Regulasi osmotik dan ion pada ikan teleostei air tawar (Schmidt-Nielsen, 1980: 303).

4. Regulasi Osmotik Hewan Terrestrial

Keuntungan dari aspek fisiologis pada hewan yang hidup di lingkungan terrestrial adalah tersedianya akses oksigen yang mudah, namun ancaman terbesarnya adalah terjadinya dehidrasi (kehilangan air tubuh). Secara evolusi hanya dua filum hewan yang berhasil menginvasi lingkungan terrestrial yaitu artropoda dan vertebrata. Selain itu, juga ada beberapa moluska. Dengan kata lain, faktor pembatas kehidupan hewan di darat adalah adanya dehidrasi, kecuali pada beberapa hewan yang memang hidup pada lingkungan terrestrial yang lembab.



Pada era *devonian*, insekta, *archnida*, tetrapoda dan beberapa hewan lainnya telah ditemukan. Setelah era *devonian*, selanjutnya ditemukan pada habitat terestrial tersebut kelompok gastropoda operkulat, isopoda dan kepiting. Tampaknya hewan bermigrasi dari habitat air ke habitat terestrial khususnya pada tempat-tempat yang basah atau dekat sumber-sumber air. Setelah itu baru ditemukan hewan yang bermigrasi ke daerah *arid* dan semi *arid*. Lingkungan atau daerah *arid* dan semi *arid* memunculkan permasalahan dehidrasi dan kematian cepat pada hewan, meskipun sistem pernapasan di udara telah membantu mendapatkan oksigen langsung dari udara bebas dengan mudah. Namun, jika bernapas di udara yang kering juga akan berisiko terjadinya kehilangan air (desikasi). Air dalam tubuh hewan yang esensial untuk menjaga volume sel dan berfungsi sebagai medium tempat proses-proses seluler berlangsung secara terus-menerus, akan menguap melalui organ pernapasan dan permukaan tubuh. Air juga akan hilang melalui urin.

Jadi dapat dikatakan bahwa adanya adaptasi morfologi, fisiologi dan tingkah laku hewan terestrial merupakan suatu bagian dari proses untuk mengatasi dan melawan kehilangan air dan garam dari dalam tubuh dan menjamin aktivitas yang kontinu di lingkungan daratan tersebut. Pada mamalia, kulitnya kurang terketinasi dibandingkan dengan kulit reptil, namun laju kehilangan air dari tubuh mamalia sama rendahnya dengan reptil. Meskipun kehilangan air melalui kulit lebih rendah, namun total kehilangan air pada mamalia misalnya pada tikus akan lebih tinggi dari pada reptil. Kehilangan air paling besar pada mamalia adalah melalui organ respirasi. Kehilangan air pada mamalia tersebut berhubungan dengan laju metabolismenya dan suhu tubuhnya yang lebih tinggi. Air tubuh hewan vertebrata terestrial hilang secara difusi melalui kulit, melalui difusi paru-paru, urin dan feses, sedangkan air diperoleh hewan vertebrata terestrial melalui difusi melalui kulit, minum air, metabolisme air dan makanan yang dimakan.

Laju metabolisme yang tinggi akan meningkatkan laju kehilangan air (Rastogi, 2007: 176). Laju metabolisme hewan homeo-termis lebih tinggi daripada reptilia. Jika metabolisme tinggi, maka frekuensi pernapasan dipercepat sehingga memperbesar kehilang-



an air melalui paru-paru. Laju metabolisme per unit massa tubuh berhubungan dengan ukuran tubuh hewan tersebut. Hewan-hewan kecil akan memiliki laju kehilangan air lebih tinggi dari pada hewan besar.

Mamalia kehilangan air melalui respirasi meskipun hewan tersebut menghirup udara yang jenuh pada suhu lingkungan sekitarnya (Rastogi, 2007: 176). Hal ini dapat terjadi ketika suhu tubuh mamalia lebih tinggi dari pada suhu lingkungannya. Udara yang dikeluarkan oleh hewan tersebut akan memiliki suhu yang lebih tinggi dari pada suhu lingkungannya. Pada suhu yang lebih tinggi, udara mengandung banyak uap air. Mamalia dapat mengalami stroke panas jika terdedah pada suhu yang lebih tinggi. Jika suhu tubuhnya meningkat 4-5°C di atas normal, keringat dari tubuhnya akan menguap dan akan menurunkan suhu tubuh agar lebih dingin. Meskipun penurunan suhu ini berguna sebagai termoregulasi tetapi kehilangan air melalui proses tersebut menyebabkan peningkatan viskositas (kekentalan) darah. Peningkatan viskositas darah menurunkan kecepatan sirkulasi darah. Sehubungan dengan penurunan kecepatan sirkulasi tersebut, maka darah tidak dapat menghilangkan panas dari tubuh secara total. Sehingga suhu tubuh akan tetap naik dan jika terjadi kehilangan air sekitar 10% dari tubuhnya akan menyebabkan kematian.

TABEL 2.2. Evaporasi air dari permukaan tubuh beberapa hewan terrestrial pada temperatur ruangan (mikrogram evaporasi air per jam per 1 cm² permukaan tubuh, pada tekanan 1 mmHg (0,13 kPa) (Schmidt-Nielsen, 1980: 310).

Hewan	Evaporasi air
Cacing tanah	400
Katak	300
Salamader	600
Garden snail (aktif)	870
Garden snail (inaktif)	39
Manusia (tanpa penghangat)	48
Tikus	46
Iguana	10
Mealworm	6



(1) Cacing Tanah

Cacing tanah yang di tempatkan di udara kering dengan cepat hilang berat badannya akibat terjadinya penguapan air tubuh. Tingkat kehilangan air pada cacing tanah cukup tinggi, dan pada udara kering cacing tanah akan segera mati. Jika sebagian cacing dehidrasi di tempatkan dalam tabung berbentuk U, ditutup dengan air tetapi dengan mulut dan anus di atas permukaan air, maka air akan diserap oleh cacing. Kulit cacing sangat permeabel terhadap air dan diketahui bahwa cacing tanah berperilaku mirip dengan hewan air tawar. Ketika di tempatkan pada larutan garam dengan berbagai konsentrasi, cairan tubuhnya tetap hipertonic terhadap medium. Urin, bagaimanapun, tetap hipotonik terhadap cairan tubuh, dan juga dalam hal ini cacing tanah juga mirip dengan hewan air tawar. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa dari aspek osmotik cairan tubuhnya, cacing tanah lebih mirip kepada hewan air tawar dibandingkan dengan hewan terestrial.

(2) Katak

Katak memiliki kulit yang lembab dan dingin. Tingkat penguapan dari kulit katak mirip dengan cacing tanah dan perbedaan dua kali lipat antara katak dan salamander. Kulit amfibi tampaknya tidak menghadirkan penghalang yang signifikan terhadap terjadinya penguapan. Karenanya, amfibi dewasa yang hidup di lingkungan terestrial biasanya hidup di dekat air dan di habitat lembab di mana penguapan rendah.

Ketika katak berada dalam air, mereka berperilaku osmotik seperti hewan air tawar biasa. Mengetahui bahwa amfibi berkulit lembab dan hidup di tempat lembab membuatnya terlihat sebagai sebuah paradoks karena ada sebagian katak yang berhasil hidup di gurun. Beberapa spesies katak yaitu *Chiroleptes* ditemukan di dataran kering Australia. Pada musim kering katak ini tetap berdiam dalam tanah pada kedalaman beberapa meter. Karena reproduksi terjadi di dalam air, mereka dapat berkembang biak hanya setelah hujan, yang memberikan pasokan air berlimpah tetapi sementara. Ketika hujan, mereka bertelur dan telurnya berkembang dengan kecepatan luar biasa menjadi kecebong yang bermetamorfosis



sebelum kolam mengering. Ketika katak memasuki estivasi lagi, kandung kemih mereka diisi dengan urin encer, yang sangat penting dalam menjaga keseimbangan air mereka. Beberapa spesies katak dapat menyimpan air sebanyak 30% dari berat badan kotor mereka. Urinnya sangat encer dan memiliki konsentrasi osmotik yang sesuai dengan kurang dari 0,1% NaCl. Urin ini adalah cadangan air utama dan secara bertahap habis selama estivasi (Schmidt-Nielsen, 1980: 311).

(3) Siput

Siput dan siput berkulit lembab mengalami penguapan yang tinggi dari permukaan tubuhnya. Siput telanjang beraktivitas tergantung kepada kelembaban habitat mereka, dan mereka aktif sebagian besar setelah hujan dan pada malam hari ketika kelembaban relatif tinggi. Jika kelembaban habitat rendah, mereka akan masuk dan tetap berdiam mikrohabitat di kelembabannya tinggi. Sebaliknya, siput yang memiliki cangkang yang kedap air. Adanya lendir yang menutupi siput menjadi penghalang untuk terjadi penguapan, tetapi ini sulit dipahami. Ketika lendir siput dikeluarkan dari tubuh hewan, air menguap dari lendir yang terisolasi pada tingkat yang sama dengan penguapan pada permukaan air bebas, sehingga lendir akhirnya menjadi kering. Jika permukaan tubuh siput yang terlindung disentuh sedikit saja, maka lendir segar dikeluarkan dari kelenjar lendir di kulit dan laju penguapan akan meningkat.

(4) Artropoda

Artropoda adalah hewan terestrial yang paling sukses menginvasi daratan. Hewan tersebut terdiri dari serangga, krustasea, dan beberapa hewan lainnya yang dikarakterisasi dengan adanya *exoskeleton* yang bersendi dan kaku. Sejauh ini, serangga adalah hewan yang paling banyak dalam hal jumlah spesies, hampir 1 juta berbeda spesies telah ditemukan. Insekta dan *arachnida* (laba-laba, kutu, tungau, *scorpion*, dan lain-lain) adalah kelompok utama artropoda yang sangat beradaptasi dengan kehidupan di darat dan bernafas di udara. Hanya sejumlah kecil saja yang menghuni air tawar, dan hampir tidak ada ditemukan di laut pada



kedua kelas ini. Dua kelas artropoda terestrial lainnya adalah kaki seribu (*Diplopoda*) dan kelabang (*Chilopoda*). Sebaliknya, sebagian besar Crustacea adalah penghuni akuatik, seperti halnya *Xiphosura*, yang diwakili oleh fosil hidup, kepiting tapal kuda (*Limulus*).

(5) Crustacea

Meskipun sebagian besar krustasea merupakan hewan akuatik, namun termasuk beberapa dekapoda (kepiting dan udang karang), adalah hewan terestrial, bahkan sampai-sampai tenggelam jika terus terendam dalam air. Namun demikian sebagian besar terbatas pada habitat yang lembab dan di sekitar air. Di sisi lain, beberapa isopoda, *notably sowbugs* (atau *pil-bug*) dan kutu kayu, sepenuhnya adalah hewan terestrial, dan beberapa di antaranya bahkan hidup di gurun yang panas dan kering.

Kepiting biasa ditemukan di zona intertidal, dan di tropis banyak hidup secara permanen di atas tanda pasang. Namun, mereka bergantung pada habitat yang lembab, dan sering kali memiliki liang di mana genangan air tetap di dasar. Pada spesies yang lebih terestrial, di mana keberadaan air relatif tidak ada, kepiting kembali ke air untuk pemijahan. Kepiting semiterestrial dan terestrial umumnya osmoregulator yang sangat bagus. Bergantung pada kondisi dan kebutuhan, mereka biasanya dapat melakukan hiperregulasi dan hiporegulasi secara efektif. Aspek yang menarik dari beberapa kepiting darat (*Caros diosoma* dan *Gecarcinus*) adalah kemampuannya untuk mengambil air dari pasir basah atau substratum yang lembab, bahkan tanpa adanya air bebas dalam jumlah yang terlihat. Dengan cara ini mereka dapat bertahan hidup selama berbulan-bulan tanpa akses langsung ke air (Schmidt-Nielsen; 1980: 313).

Kepiting hantu (*Ocypode quadrata*), sering berkeliaran di pantai berpasir, dan sering membutuhkan perendaman dalam air laut. Demikian pula, kepiting biola yang terkenal (*Uca*), yang ditemukan di sepanjang pantai laut tropis dan masuk ke daerah beriklim sedang, menggali lubang yang dalam di dekat pantai atau di atas tanda pasang yang tinggi, tetapi bergantung pada seringnya ia kembali ke air.



Isopoda terestrial yang umum dikenal sebagai *pil bug*, *sow-bugs*, atau kutu kayu sebagian besar ditemukan di habitat lembab, jauh dari paparan cahaya. Mereka tetap tersembunyi di siang hari dan bergerak di malam hari ketika kelembaban relatif lebih tinggi. Krustasea ini sepenuhnya bebas dari air bebas untuk reproduksi dan karenanya benar-benar terestrial.

Meskipun kutu kayu sebagian besar hidup di habitat mikro dengan kelembaban tinggi, mereka terkadang terpapar udara yang lebih kering. Kemudian mereka kehilangan air karena penguapan, dan air tubuh yang hilang ini harus diganti. Biasanya, kutu kayu memakan bahan tanaman yang membusuk yang lembab, yang mungkin merupakan sumber air normal mereka. Bagaimanapun, beberapa isopoda dapat mengambil air secara bebas dengan minum air dan juga melalui anus. Ketika disimpan pada lempengan berpori lembab, mereka bahkan dapat menyerap air dari permukaan ini lembab ini.

Jika dibandingkan dengan serangga, kutikula isopod relatif dapat menyerap air. Alasan utama untuk perbedaan ini tampaknya karena bagian kutikula ditutupi oleh lapisan lilin yang tipis, yang sangat mengurangi kehilangan air; semua upaya penelitian, menunjukkan bahwa lapisan lilin pada isopoda tidak berhasil ditemukan. Hal ini mungkin tampak aneh, jika menemukan krustasea darat di padang pasir, tetapi kutu kayu, *Hemilepistus*, cukup umum ditemukan di daerah gurun. Hewan-hewan ini masih bernapas dengan insang, dan mereka bertahan hidup dengan menggali lubang vertikal sekitar 30 cm, di mana mereka di sana menghabiskan bagian hari yang panas. Pengukuran suhu dan kelembaban menunjukkan bahwa persembunyian mereka tetap jauh lebih dingin daripada permukaan gurun, dan yang paling penting, kelembaban relatif tinggi, sekitar 95%. Kutikula *Hemilepistus* adalah kurang permeabel terhadap air dibandingkan kutu kayu lainnya, tetapi adaptasi utama hewan itu terhadap kehidupan di padang pasir tampaknya menjadi masalah perilaku.

(6) Insecta dan Arachnida

Insecta dan *arachnida* tidak diragukan lagi sebagai hewan pa-



ling sukses menginvasi daratan. Mereka hidup di hampir setiap habitat yang ada di darat dan di air tawar. Hanya daerah kutub dan lautan yang tampaknya relatif bebas dari mereka. Kekeringan, gurun, dan tidak adanya air bebas tampaknya tidak menjadi penghalang bagi hewan-hewan ini. Kumbang tepung misalnya, menyelesaikan siklus hidupnya dari telur hingga dewasa dalam tepung kering, hidup, tumbuh, dan berkembang hampir tanpa air bebas di dalamnya. Namun demikian, sebagai serangga dewasa mengandung lebih dari dua pertiga air, hewan-hewan ini harus memiliki kapasitas luar biasa untuk menahan air dan mengurangi kehilangan. Karena ada banyak kesamaan antara serangga dan *arachnida*, kedua kelas ini akan dibahas bersama.

Masalah menjaga keseimbangan air tubuh harus berhasil bagaimanapun situasi dan caranya agar tetap bias hidup. Mungkin ada kelebihan air atau kekurangan air, dan karena itu mekanisme fisiologis harus mampu mengatasi kedua situasi ini. Misalnya, serangga air tawar dapat menelan air dalam jumlah besar bersama makanannya dan juga terkena aliran air osmotik. Air yang berlebih harus dihilangkan. Sebaliknya, serangga terestrial yang hidup di habitat kering memiliki asupan air yang sangat terbatas, dan semua kehilangan harus dikurangi sedemikian rupa sehingga jumlah air dalam jangka panjang tidak melebihi total perolehan. Setiap organisme dapat mentoleransi variasi tertentu dalam kadar airnya, dan beberapa lebih toleran dari pada lainnya.

Jika kadar air tubuh serangga itu 75%, maka jika serangga kehilangan setengah dari seluruh air di tubuhnya itu, membuat tubuhnya itu akan mengandung 60% air. Pengurangan kadar air dari 75% menjadi 60% tampaknya tidak berlebihan, meskipun pada kenyataannya setengah dari seluruh air tubuh serangga sudah hilang (Harrison, Woods and Roberts, 2012: 103). Jika serangga dalam contoh di atas beratnya 100 mg, dan pada awalnya mengandung 75 mg air dan setelah dehidrasi 37,5 mg air, maka terlihat bahwa separuh air tubuhnya sudah hilang.

Air hilang melalui organ pernapasan serangga dan permukaan tubuh. Organ pernapasan terdiri dari dari tabung yang dilapisi dengan kitin, dan banyak cabang yang relatif permeabel terhadap



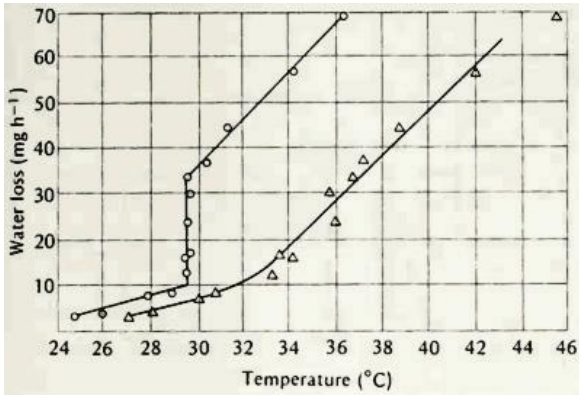
air. Namun demikian, untuk serangga, kehilangan air dari sistem respirasi adalah yang paling utama. Permukaan tubuh serangga secara umum tertutupi oleh kutikula keras, dan kering namun tidak sepenuhnya kedap air. Ada perbedaan besar dalam penguapan antara spesies yang biasanya hidup di lingkungan yang lembab dan yang lainnya yang hidup di lingkungan yang benar-benar kering. Penguapan air tubuh dari larva akuatik dari lalat rawa, di udara, sama besarnya dengan evaporasi dari hewan berkulit lembab. Ini berarti bahwa kutikula pada dasarnya adalah tidak menjadi penghalang untuk penguapan. Di sisi lain, pada serangga yang hidup di habitat yang sangat kering, permeabilitas kutikula bisa lebih rendah daripada hewan lain yang kita ketahui informasinya.

Kutikula serangga adalah organ yang sangat kompleks, yang terdiri dari beberapa lapisan. Kitin yang keras itu sendiri tidak terlalu kedap air. Adanya resistensi terhadap penguapan berada dalam lapisan lilin yang tipis. Jika lapisan ini tergores oleh abrasif (misalnya partikel alumina) penguapan meningkat pesat dan serangga yang dapat hidup dalam bahan yang sangat kering, seperti biji-bijian yang disimpan, mati karena dehidrasi. Konsep abrasif ini telah digunakan sebagai insektisida nontoksik pada gandum yang nantinya dapat dipisahkan dari gandum dengan relatif mudah karena perbedaan kepadatan. Tidak hanya partikel yang tajam, tetapi juga bahan seperti debu tanah liat kering juga memiliki efek yang serupa, mungkin karena mereka juga mengganggu pengaturan struktur lapisan lilin.

Penguapan dari kutikula serangga meningkat dengan kenaikan suhu. Peningkatannya jauh lebih besar daripada peningkatan tekanan uap air dan tampaknya terkait dengan perubahan fisik pada lapisan lilin. Jika permeabilitas diplot terhadap suhu permukaan tubuh serangga, daripada suhu udara, titik transisi yang tajam dapat diamati dalam penguapan. Titik transisi ini berbeda dari spesies ke spesies. Lilin permukaan telah diisolasi dan karakteristik fisiknya menunjukkan titik transisi pada suhu yang sama dengan transisi yang diamati pada kehilangan air. Serangga juga mengalami kehilangan air melalui tinja dan urin. Urinnya dibentuk oleh tubulus malphigi, yang terbuka ke bagian posterior usus. Urin cair,



serta bahan tinja dari usus, masuk ke rektum, tempat reabsorpsi air terjadi.



GAMBAR 2.7. Kehilangan air tubuh pada kecoak meningkat seiring peningkatan suhu lingkungan (Schmidt-Nielsen, 1980: 317).

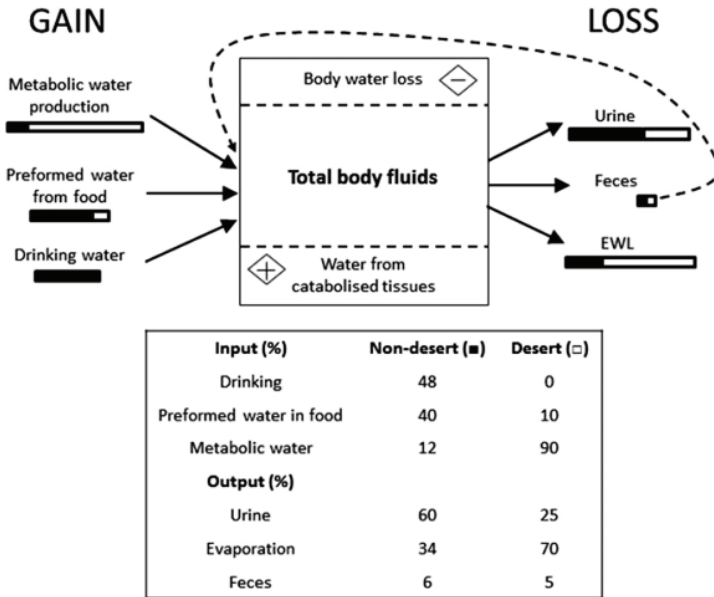
(7) Tikus Kangguru dan Unta

Iklim gurun yang panas dan kering tidak ideal untuk kehidupan yang nyaman dan akan menyebabkan stroke panas. Tetapi hewan-hewan tertentu seperti tikus kangguru, unta dan keledai telah menjajah gurun dengan mengembangkan adaptasi fisiologis dan perilaku yang cocok untuk iklim gurun.

Pada Gambar 2.8, terlihat bahwa air paling banyak diperoleh oleh tikus kangguru dari metabolisme air tubuh, meskipun juga diperoleh dari air yang berasal dari makanan. Adapun air paling banyak hilang melalui evaporasi. Sebaliknya pada nongurun, air banyak diperoleh dari air yang diminum dan air yang dikandung oleh makanan, dan air paling banyak hilang melalui urin dan evaporasi.

Iklim yang kering dan panas seperti di gurun bukan merupakan tempat hidup yang nyaman bagi hewan akan karena akan menyebabkan stroke panas. Akan tetapi hewan-hewan tertentu seperti tikus kangguru, unta dan keledai dapat bertahan hidup digurun dengan mengembangkan adaptasi fisiologis dan tingkah laku





GAMBAR 2.8. Diagram perbandingan pemasukan dan kehilangan air pada hewan gurun (tikus kangguru) dan hewan non-padang pasir berikut (Donald & Panabecker, 2015: 193).

yang sesuai dengan kondisi tersebut. Tikus kangguru (*Dipodomys*) yang sangat teradaptasi dengan gurun telah mengembangkan mekanisme spesifik untuk mempertahankan air di dalam tubuhnya. Kehilangan air akan dikurangi dengan mekanisme penurunan evaporasi air melalui kulit dan paru-paru, menghasilkan urin yang pekat dan menghasilkan feces yang sangat kering (Rastogi, 2007: 176). Tikus kangguru juga tidak memiliki kelenjar keringat untuk mengurangi kehilangan air melalui kulit. Dengan kelenjar ini, mekanisme pendinginan tubuh tidak efisien tetapi tubuh mengembangkan toleransi terhadap suhu tinggi mencapai 41°C atau sekitar 6°C lebih tinggi dari pada suhu normal tubuhnya. Namun demikian, suhu lingkungan yang terlalu tinggi dihindari oleh tikus kangguru dengan tetap tinggal di tempat-tempat yang lebih lembab dan dingin (di dalam lubang tanah selama siang hari), dan



aktif mencari makanan pada malam hari (nokturnal), ketika suhu lingkungan turun mencapai batas yang aman.

Sebagian besar kehilangan air secara evaporatif pada tikus kangguru adalah melalui udara pernapasan Gambar 2.7. Pada udara yang kering, laju kehilangan air melalui udara pernapasan hewan tersebut akan mencapai 70% dari total kehilangan air yang terjadi (Donald & Pannabecker, 2015: 193). Tetapi pada kelembaban relatif 80% di dalam lubangnya, laju kehilangan air melalui udara pernapasan hanya sekitar 40% dari total kehilangan air yang terjadi. Pada kelembaban 10%, kehilangan air melalui respirasi dikompensasi oleh air metabolik yang dihasilkan.

Hewan mamalia menghasilkan urin yang bersifat hiperosmotik, di mana pada beberapa mamalia kepekatannya mencapai 20%, sedangkan pada manusia hanya sekitar 8%. Pada tikus kangguru, ekskresi nitrogennya melalui urin dapat ditingkatkan dengan tanpa kehilangan air yang berlebihan. Air yang terkandung dalam feses hewan tersebut juga diabsorpsi pada ujung posterior usus sehingga yang tersisa hanya feses yang kering. Mekanisme ini berperan sangat penting dalam mengurangi kehilangan air melalui defekasi.

Unta adalah mamalia terestrial yang unik, yang dapat beradaptasi terhadap lingkungan gurun yang kering. Unta kehilangan air tubuhnya melalui evaporasi pada kulit dan paru-paru, urin dan feses. Namun, hewan ini memiliki mekanisme spesifik untuk meminimalisir kehilangan air melalui organ-organ tersebut. Pada musim musim dingin unta mendapatkan air yang cukup untuk kebutuhannya dari memakan rerumputan dan tumbuhan sukulen. Unta dapat bertahan hidup tanpa meminum air selama dua bulan dan tanpa terjadinya dehidrasi, akan tetapi berat badannya akan menurun seiring dengan kehilangan air melalui paru-paru dan kulit serta urin. Penurunan berat badannya akan sebanding dengan banyaknya air yang hilang dari tubuh. Jika bertemu dengan sumber air, unta akan meminum sebanyak-banyaknya dalam waktu relatif lama dan akan memulihkan berat badannya dalam 10 menit.



Ketika unta hanya memperoleh air dari rumput-rumputan yang dimakannya, maka metabolisme air menjadi solusi dalam menjaga kesetimbangan air tubuh. Metabolisme air dihasilkan melalui oksidasi bahan makanan dan jumlah air yang hilang melalui udara pernapasan lebih sedikit. Bahan makanan memberikan kontribusi air yang berbeda-beda tergantung jenis makanannya, dan jumlah air yang dihasilkan melalui oksidasi tergantung kepada kandungan hidrogennya. 1 gram lemak akan menghasilkan 0.60 gram air, sedangkan 1 gram protein akan menghasilkan 0.3 gram air. Unta juga memperoleh air melalui oksidasi lemak di bagian punuknya. Unta dengan lemak 100 pound dapat menghasilkan 110 pound air atau setara dengan 13 galon air. Akan tetapi, produksi air yang diperoleh dari oksidasi tersebut lebih sedikit dari pada jumlah air yang hilang melalui evaporasi paru-paru.

Selama musim panas di gurun dengan suhu mencapai 65°C atau lebih, suhu tubuh unta juga akan meningkat. Ketika unta tidak dapat mentoleransi perubahan suhu tubuhnya, maka tubuh akan berkeringat agar suhu tubuh kembali turun. Kondisi ini jika proses ini berlangsung terus-menerus, maka akan terjadi stroke panas dan berakibat kematian. Unta mengalami dehidrasi yang sangat lambat karena jumlah urin yang dikeluarkannya sangat sedikit dan karena terjadi reduksi sejumlah keringat pada kulit.

Kehilangan air pada unta tidak menyebabkan pengurangan volume darah yang signifikan. Jika terjadi kehilangan air sebanyak 50 liter dari tubuhnya, maka darahnya hanya akan berkurang sekitar 1 liter. Unta juga memiliki ginjal yang sangat efisien dalam bekerja. Ketika unta memakan bahan makanan yang kering, produksi urin akan menurun secara drastis, hanya sekitar 500 ml/ hari. Ginjalnya dapat meminimalisir pengeluaran urea melalui urin meskipun bahan makanannya banyak mengandung protein akan tetapi bagaimana mekanisme tersebut berlangsung belum diketahui secara pasti.

(8) Hewan yang Memperoleh Makanan dari Laut

Kelompok hewan terestrial lainnya adalah hewan-hewan yang memperoleh makanan dari laut. Hewan-hewan tersebut meng-



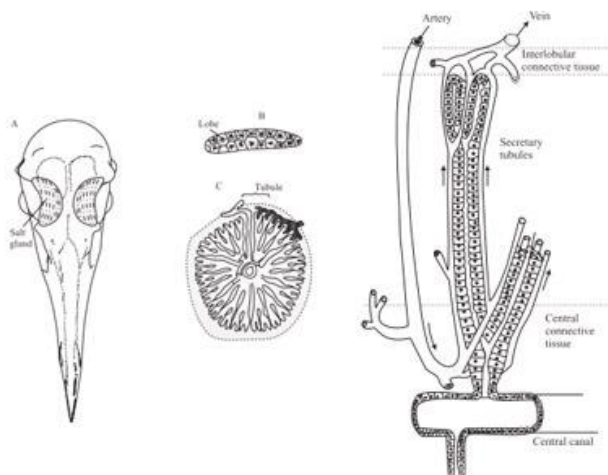
konsumsi garam dalam kadar yang lebih tinggi dari pada hewan terestrial biasa karena sangat mungkin meminum air laut atau mengonsumsi hewan-hewan laut yang isosmotik. Hewan-hewan terestrial tidak dapat mentoleransi kadar garam yang tinggi. Kadar garam dalam cairan tubuh dibatasi pada level sekitar 1% atau kurang dari sepertiga kadar garam dalam air laut dan jika terjadi kelebihan maka harus dikeluarkan dengan berbagai mekanisme. Reptil, burung, dan mamalia yang memperoleh makanan dari laut memiliki efisiensi yang tinggi untuk mengurangi kadar garam dalam tubuhnya.

Reptil dan burung laut tidak meminum air laut secara langsung, ginjalnya kurang efisien dari pada ginjal manusia dalam regulasi kelebihan garam. Burung dan reptil laut memiliki organ khusus yang disebut dengan kelenjar garam yang lebih efisien dalam mengeliminasi garam-garam dari pada ginjal. Jika burung laut diberikan air laut yang setara dengan sepuluh kali berat badannya, hampir seluruh kandungan garam dari air laut tersebut akan diekskresikan dalam tiga jam. Kelenjar garam bertanggung jawab dalam menetralkan sekitar 90% garam dalam tubuh dengan sedikit saja kehilangan air. 10% garam yang tersisa akan dibuang melalui ginjal dengan diikuti oleh kehilangan air dalam jumlah relatif besar (Rastogi, 2007: 178).

Sel-sel dalam tubula kelenjar garam memiliki mekanisme fisiologis untuk memompa ion klorida dan sodium dari larutan garam yang lebih encer di darah menuju lumen kelenjar yang memiliki kadar garam lebih pekat. Mitokondria dari sel-sel tubula tersebut terlibat aktif dalam transpor ion melawan gradien konsentrasi ini. Kelenjar garam berbeda dengan ginjal pada mamalia terutama dalam hal struktur dan fungsionalnya. Secara struktural, kelenjar garam lebih sederhana dari pada ginjal dan komposisi substansi yang diekskresikan hanya berupa sodium, klorida, dan air tanpa ion potasium (K). Kelenjar garam juga dapat mengambil garam dari dalam darah secara cepat dan dalam jumlah yang lebih besar daripada ginjal. Kerja kelenjar garam hanya berlangsung pada kondisi di mana kadar garam dalam darah tinggi, sedangkan ginjal bekerja secara kontinu. Kerja kelenjar garam tergantung kepada



kadar garam dalam darah di mana jika kadar garam tinggi, maka beberapa pusat sensor di otak akan merespons dan mengirimkan impuls melalui sistem saraf ke kelenjar dengan mekanisme spesifik sehingga kerja kelenjar garam akan lebih aktif.



GAMBAR 2.9. Kelenjar garam (sebelah kiri) dan struktur mikro dari tubula di dalam kelenjar garam pada burung laut yang di kelilingi oleh kapiler-kapiler darah (Rastogi, 2007: 180-189).

Kelenjar garam juga ditemukan pada reptil laut misalnya pada penyu. Kelenjar garam pada penyu terletak di belakang bola mata dan mengeluarkan sekresi garam melalui saluran yang langsung bermuara ke mata. Ketika penyu mendarat ke pantai, sekresi garam lewat mata dapat diamati dengan sangat jelas. Proses ini sangat penting untuk mengurangi kadar garam dari dalam tubuhnya. Berdasarkan komposisinya, air mata penyu sangat mirip dengan sekret kelenjar garam pada burung laut. Studi anatomi pada buaya dan ular laut telah memperlihatkan adanya kelenjar yang berukuran besar di kepalanya yang memiliki fungsi yang sama dengan kelenjar garam.

Mamalia laut seperti anjing laut memperoleh kebutuhan airnya melalui cairan tubuh dari ikan yang dikonsumsi. Jika cairan



tubuh ikan yang dimakannya tersebut mengandung banyak garam, maka akan dieliminasi melalui ginjal. Ikan paus yang mengonsumsi plankton, gurita dan hewan laut lainnya harus mengeliminasi sejumlah besar garam dari dalam tubuhnya. Oleh karena itu, ikan paus memiliki ginjal yang lebih efektif dalam bekerja dibandingkan dengan ginjal manusia.

G. MEKANISME OSMOREGULASI HEWAN MAMALIA

Meskipun mamalia berusaha untuk mempertahankan osmolalitas cairan ekstraseluler (ECF) yang konstan, nilai-nilai yang diukur pada individu dapat berfluktuasi di sekitar set poin karena perubahan intermiten dalam tingkat asupan air dan kehilangan air (melalui penguapan atau diuresis) dan untuk variasi dalam tingkat asupan dan ekskresi Na^+ (natriuresis). Pada manusia, misalnya, 40 menit olahraga berat atau kehilangan air selama 24 jam menyebabkan osmolalitas plasma meningkat lebih dari 10 mosmol kg^{-1} . Pada individu yang mengalami dehidrasi, minum setara dengan dua gelas besar air (~ 850 ml) menurunkan osmolalitas sekitar 6 mosmol kg^{-1} dalam 30 menit (Bernard & Blanche, 1996: 2132). Secara analog, konsumsi 13 g garam meningkatkan osmolalitas plasma sekitar 5 mosmol kg^{-1} dalam 30 menit (Andersen *et al.*, 2000: R288). Meskipun gangguan osmotik yang lebih besar dari ini dapat merusak kesehatan, perubahan dalam kisaran 1-3% memainkan bagian integral dalam kontrol homeostasis cairan tubuh.

Pada tikus dan manusia, jika cairan tubuh dalam kondisi hipo-osmolaritas, maka akan terjadi penghambatan sekresi vasopresin (VP) basal. Karena reabsorpsi air di ginjal sebagian distimulasi oleh level VP saat istirahat, penghambatan VP ini menyebabkan perangsangan diuresis. Infus larutan hipo-osmotik intravena mengurangi rasa haus pada manusia yang mengalami dehidrasi. Apalagi ambang untuk osmotik yang memodulasi kehausan pada individu yang tahan air tampaknya terletak beberapa miliosmol di bawah set poin osmotik. Hipo-osmolalitas ECF juga dapat mendorong homeostasis dengan menghambat segala keinginan untuk minum yang mungkin ada pada kondisi basal (Bourque, 2008: 520).



Menariknya, aktivitas listrik basal dari hipotalamus Neurosekretoris dihambat oleh hipo-osmolalitas. Oleh karena itu, mungkin bahwa pengurangan dalam level oksitosin yang beredar di basal dapat mengurangi natriuresis dalam kondisi ini. Secara analog, penurunan pelepasan oksitosin sentral dapat meningkatkan nafsu makan garam selama hipotonisitas ECF. Apakah hipo-osmolalitas ECF secara spesifik menghambat natriuresis atau merangsang nafsu garam masih belum bisa dijelaskan secara pasti.

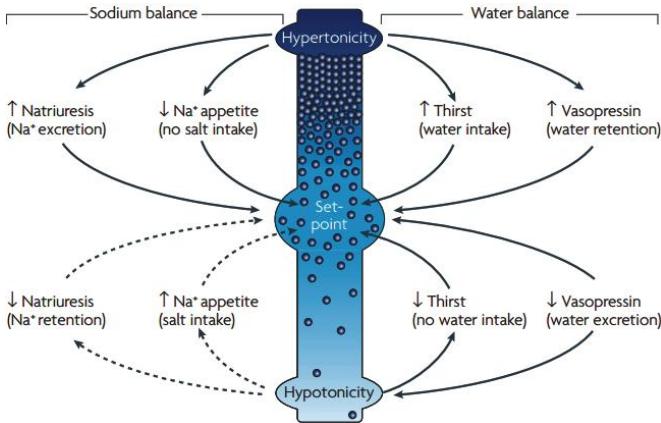
Penelitian pada mamalia, termasuk pada manusia diketahui bahwa hiperosmolalitas ECF menstimulasi sensasi haus, untuk meningkatkan asupan air, dan pelepasan vasopresin (VP, juga dikenal sebagai hormon antidiuretik), untuk meningkatkan reabsorpsi air di ginjal. Hiperosmolalitas yang dihasilkan dari infus larutan hipertonik NaCl atau non-NaCl ke dalam arteri karotis juga meningkatkan tingkat natriuresis dari ginjal pada berbagai mamalia, termasuk manusia (Emmeluth & Forssmann, 1996: F510). Pada tikus tetapi tidak pada manusia, efek ini dimediasi sebagian dengan melepaskan oksitosin ke dalam aliran darah.

Hiperosmolalitas juga menghambat nafsu makan garam pada domba dan pada tikus, di mana efeknya dimediasi sebagian oleh pelepasan oksitosin. Akhirnya, perlu dicatat bahwa peningkatan osmolalitas ECF telah terbukti menghambat keadaan terengah-engah pada hewan dan keringat akibat olahraga pada manusia. Meskipun efek ini dengan mengurangi kehilangan air melalui penguapan dalam kondisi ini, tingkat kuantitatif dampaknya terhadap osmoregulasi masih harus didefinisikan.

Adapun mekanisme osmoregulasi pada hewan mamalia adalah melalui mekanisme transduksi osmosensor. Osmoreseptor adalah berupa neuron khusus. Neuron Osmoreseptor terletak di jantung, sistem pusat yang memediasi osmosensasi dan osmoregulasi. Neuron-neuron ini harus mendeteksi perbedaan antara osmolalitas ECF dan set-poin yang ditetapkan sebelumnya, dan mereka harus menyandikan informasi ini menjadi sinyal-sinyal listrik yang dapat bertahan bahkan selama gangguan dalam waktu yang lama. Studi melibatkan rekaman elektrofisiologi, pencitraan fungsional atau



ekspresi gen awal-awal yang tergantung aktivitas seperti gen Fos telah menunjukkan bahwa banyak subset neuron di SSP bersifat osmosponsif.



GAMBAR 2.10. Mekanisme dasar osmoregulasi hewan mamalia. Perubahan osmolalitas cairan ekstraseluler (ECF) memodulasi respons homeostatis yang memengaruhi Na^+ Kondisi hipertonic dan hipotonik menyebabkan perubahan proporsional dalam asupan atau ekskresi air dan natrium untuk mempertahankan osmolalitas ECF dekat test poin yang konstan. Garis putus-putus menggambarkan potensi respons homeostatis (Bourque, 2008: 522).

H. RANGKUMAN

1. Osmoregulasi adalah suatu proses pengaturan konsentrasi air dan substansi terlarut lainnya oleh sel atau organisme hidup. Proses osmoregulasi diperlukan karena adanya perbedaan konsentrasi cairan sel atau tubuh dengan lingkungan di sekitarnya. Osmoregulasi berperan sangat vital dalam menjaga homeostasis tubuh guna menjamin keberlangsungan hidup hewan.
2. Ada beberapa hal yang mendasari berlangsungnya osmoregulasi, yaitu potensial kimia air, tekanan osmosis, partisi ion ekstra seluler dan intraseluler, dan transpor zat melintasi membran.
3. Secara umum, hewan dibagi menjadi dua kategori besar dalam hal respons mereka terhadap stres osmotik yaitu osmo-



regulator, hewan yang mampu mempertahankan osmolaritas internalnya ketika berbeda dari lingkungan eksternal, dan osmokonformer yaitu hewan yang mengubah konsentrasi osmotik cairan tubuhnya untuk berkonformasi dengan medium eksternalnya.

4. Organ osmoregulator adalah organ khusus yang terlibat dalam mempertahankan ionik dan homeostasis osmotik. Organ spesifik yang memediasi proses ini dapat bervariasi di antara berbagai kelompok hewan. Namun, dasar molekuler dan mekanisme spesifik zat terlarut dan transportasi air menunjukkan pola yang sangat konvergen/homolog di berbagai jenis sel epitel hewan. Organ tersebut adalah insang, ginjal, dan kantung kemih, saluran pencernaan dan kelenjar rektum pada *elasmobranchiata* serta kulit, membran operkular, dan kantung yolk.
5. Respons osmotik merupakan bentuk respons atau tanggapan hewan dalam menjaga kestabilan osmotik cairan tubuhnya ketika terjadi gangguan atau perubahan lingkungan. Respons osmotik hewan terkait erat dengan lingkungan tempat hewan tersebut hidup. Respons osmotik berbeda pada hewan yang hidup di air laut, air tawar, air payau dan hewan terestrial. Invertebrata laut pada umumnya termasuk ke dalam kelompok osmokonformer, sedangkan vertebrata air laut dibagi menjadi dua kelompok utama yaitu osmotik dan ionik konformer dan osmotik dan ionik regulator. Hewan air payau yang memiliki salinitas mendekati salinitas air laut memiliki karakter osmoregulasi yang mirip dengan hewan air laut. Hewan air payau yang khusus berada pada kisaran salinitas air payau (sedang) memiliki karakteristik osmoregulasi berbeda dengan hewan yang hidup pada salinitas tinggi dan hewan air payau yang hidup pada salinitas rendah mendekati air tawar memiliki karakteristik osmoregulasi mirip dengan hewan air tawar.
6. Hewan-hewan air tawar memiliki cairan tubuh bersifat hiperosmotik terhadap medium eksternalnya. Kelompok ini memiliki permasalahan osmotik sama dengan yang dihadapi oleh hewan air payau, akan tetapi pada skala yang lebih ekstrem.



7. Hewan teresterial memiliki ancaman terbesar terhadap terjadinya dehidrasi (kehilangan air tubuh). Sehingga untuk mengatasi hal ini hewan terestrial memiliki mekanisme tersendiri tergantung habitatnya.
8. Mekanisme osmoregulasi pada hewan mamalia adalah melalui mekanisme transduksi osmosensor. *Osmoreceptor* adalah berupa neuron khusus. Neuron *Osmoreceptor* terletak di jantung, sistem pusat yang memediasi osmosensasi dan osmoregulasi.

I. LATIHAN

1. Jelaskan secara prinsip perbedaan hewan osmokonformer dan osmoregulator! Berikan contoh masing-masing hewannya!
2. Jelaskan prinsip dasar osmoregulasi!
3. Jelaskan perbedaan antara osmoregulasi ikan air tawar dengan ikan air laut!
4. Jelaskan perbedaan osmoregulasi hewan air laut dan hewan terestrial!
5. Jelaskan mekanisme osmoregulasi pada mamalia!

J. REFERENSI

- Andersen, L. J., Ulrik, T., Jensen, S., Bestle, M. H., Bie, P., Juel, L., ... Gastrointestinal, P. B. (2000). Gastrointestinal osmoreceptors and renal sodium excretion in humans. *Am. J. Physiol. Regulatory Integrative Comp. Physiol*, (278), R287–R294.
- Bernard, C., & Blanche, G. (1996). Drinking-Induced Plasma Vasopressin and Norepinephrine Change in Dehydrated Human. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 81(6), 2131–2135.
- Beyenbach, K. W., & Piermarini, P. M. (2011). Transcellular and paracellular pathways of transepithelial fluid secretion in Malpighian (renal) tubules of the yellow fever mosquito *Aedes aegypti*. *Acta Physiol*, 387–407. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2010.02195.x>



- Bourque, C. W. (2008). Central mechanisms of osmosensation and systemic osmoregulation. *Nature Review/ Neuroscience*, 9, 520–531. <https://doi.org/10.1038/nrn2400>
- Burger, J. (1965). ROLES OF THE RECTAL GLAND AND THE KIDNEYS IN SALT AND WATER EXCRETION IN THE SPINY DOGFISH, 38(3), 191–196.
- Donald, J., & Pannabecker, T. L. (2015). Osmoregulation in Desert-Adapted Mammals. In P. T. Hyndman K. (Ed.), *Sodium and Water Homeostasis. Physiology in Health and Disease* (pp. 191–211). New York: Springer, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3213-9>
- Edwards, S. L., & Marshall, W. S. (2013). *PRINCIPLES AND PATTERNS OF OSMOREGULATION AND EURYHALINITY IN FISHES. Euryhaline Fishes* (Vol. 32). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396951-4.00001-3>
- Emmeluth, C., & Forssmann, W. G. (1996). Natriuresis caused by increased carotid Na + concentration after renal denervation. *Am. J. Physiol.*, (270), F510–F517.
- Evans, D. H., Piermarini, P. M., & Choe, K. P. (2005). The Multifunctional Fish Gill : Dominant Site of Gas Exchange, Osmoregulation, Acid-Base Regulation, and Excretion of Nitrogenous Waste. *Physiol Rev* 85:, (85), 97–177. <https://doi.org/10.1152/physrev.00050.2003>.
- Halberg, K. A. 2012. (2012). *Osmoregulation With Focus on Fluid and Solute Dynamics in Tardigrada Osmoregulation*. University of Copenhagen. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.cryobiol.2015.12.003>
- Harrison, JF, Woods, HA, Roberts, S. (2012). *Ecological and Environmental Physiology of Insects*. New York: Oxford University Press.
- Kumai, Y., & Perry, S. F. (2011). Ammonia excretion via Rhcg1 facilitates Na + uptake in larval zebrafish, *Danio rerio*, in acidic water Ammonia excretion via Rhcg1 facilitates Na \varnothing uptake in larval zebrafish, *Danio rerio*, in acidic water. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, (301), R1517–R1528. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00282.2011>
- Larsen, E. H., Deaton, L. E., Onken, H., Donnell, M. O., & Grosell,



- M. (2014). Osmoregulation and Excretion. *Comprehensive Physiology*, 4(April), 405–573. <https://doi.org/10.1002/cphy.c130004>
- Leblanc, D. M., Wood, C. M., Fudge, D. S., & Wright, P. A. (2010). A Fish Out of Water: Gill and Skin Remodeling Promotes Osmo- and Ionoregulation in the Mangrove Killifish *Kryptolebias marmoratus*. *Physiological and Biochemical Zoology*, 83(6), 932–949. <https://doi.org/10.1086/656307>
- Loretz, A., & Bern, H. A. (1980). Ion transport by the urinary bladder gobiid teleost, *GizziWiys mirabilis* of the. *Am. J. Physiol*, 415–423.
- Marshall, W. S., Bryson, S. E., Darling, P., Whitten, C., Patrick, M., Wilkie, M., & Wood, C. M. (1997). NaCl Transport and Ultrastructure of Opercular Epithelium From a Freshwater-Adapted Euryhaline Teleost, *Fundulus heteroclitus*. *The Journal of Experimen*, (227), 23–37.
- Marshall, W. S., & Grosell, M. (2006). Ion Osmoregulation, and Acid – Base Balance. In D. H. Evans and J. B. Claiborne (Ed.), *The Physiology of Fishes* (pp. 177–230). Boca Raton: CRC Press.
- Rastogi, S. (2007). *Essentials of Animal Physiology* (Fourth Edi). New Delhi: New Age International (P) Ltd.
- Reynolds, B. Y. S. E., & Bellward, K. (1989). WATER BALANCE IN *MANDUCA SEXTA* CATERPILLARS: WATER RECYCLING FROM THE RECTUM. *J. Exp. Biol.*, 141, 33–45.
- Sardella, BA, Baker, DW, Brauner, C. J. (2009). The effects of variable water salinity and ionic composition on the plasma status of the Pacific Hagfish (*Eptatretus stoutii*). *J Comp Physiol B*, 721–728. <https://doi.org/10.1007/s00360-009-0355-3>
- Schmidt-Nielsen, K. (1980). *Animal Physiology: Adaptation and environment* (Second Edi). USA: Cambridge University Press.
- Sucre', E, Charmantier-Daures, M, Grousset and, E Cucchi-Mouillot, P. (2011). Embryonic ionocytes in the European sea bass (*Dicentrarchus labrax*): Structure and functionality. *Develop. Growth Differ.*, (53), 26–36. <https://doi.org/10.1111/j.1440-169X.2010.01219.x>



III

BAB

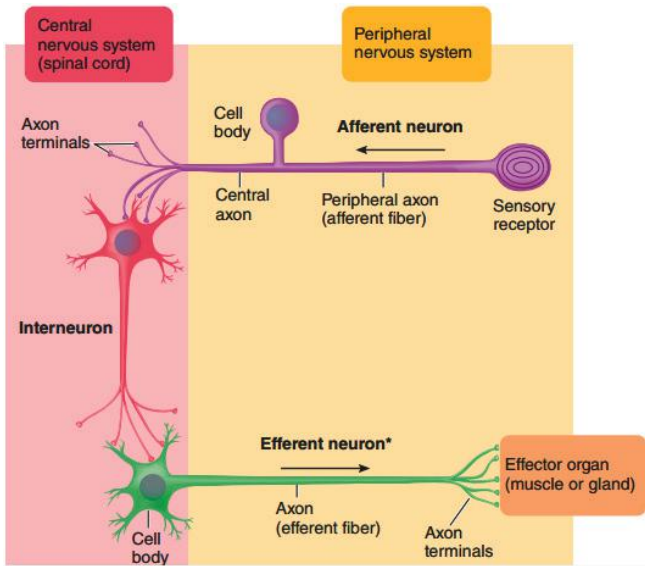
SISTEM SARAF

Pada Bab III ini pembelajar diharapkan mampu memahami tentang pengertian sistem saraf, fungsi sistem saraf, unit penyusun sistem saraf, mekanisme kerja neuron, transmisi sinapsis, organisasi sistem saraf hewan invertebrata, organisasi sistem saraf, sistem saraf vertebrata.

Aktivitas hewan tergantung pada kinerja banyak sel yang terkoordinasi secara tepat. Sel yang paling penting untuk mengoordinasikan ini adalah sel saraf, yang disebut neuron, yang mengkomunikasikan informasi menggunakan kombinasi sinyal listrik dan kimia. Membran sebagian besar neuron bersifat elektrik; yaitu, sinyal dihasilkan dan ditransmisikan sepanjang mereka tanpa terjadi penurunan potensial aksi sebagai akibat dari pergerakan partikel bermuatan (ion-ion). Sifat-sifat sinyal listrik memungkinkan neuron untuk membawa informasi dengan cepat dan akurat untuk mengoordinasikan tindakan yang melibatkan banyak bagian, atau bahkan semua bagian tubuh hewan. Semua neuron dalam tubuh organisme, bersama dengan sel-sel pendukung yang disebut sel glia (atau neuroglia), membentuk sistem saraf yang mengumpulkan dan memproses informasi, menganalisisnya, dan menghasilkan luaran secara terkoordinasi untuk mengendalikan perilaku yang kompleks.

Hewan memiliki sifat unik dalam merespons perubahan lingkungan. Informasi yang diterima oleh hewan dikoordinasikan melalui sistem saraf sehingga organisme dapat bertindak secara efektif dalam keadaan apa pun. Informasi tersebut diperoleh dalam bentuk stimulus atau rangsangan. Stimulus adalah perubahan lingkungan

yang membangkitkan respons suatu organisme. Jenis-jenis stimulus banyak dan beragam, seperti disebabkan oleh cahaya, panas, suara, suhu, tekanan, gravitasi, bahan kimia, dan lain-lain. Semua rangsangan tersebut bertanggung jawab untuk membangkitkan respons organisme dengan cara memengaruhi organ-organ reseptor dan mungkin dirasakan secara bersamaan. Mekanisme persepsi adalah mekanisme yang sangat rumit yang melibatkan sejumlah struktur sensorik dalam tubuh.



GAMBAR 3.1. Struktur lokasi fungsional tiga kelas neuron (Sherwood, L, Klандrof, H, Yancey, 2013: 159).

Beberapa informasi digunakan secara sadar oleh organisme untuk memengaruhi perilakunya. Informasi dapat dikumpulkan dan digunakan secara tidak sadar juga, seperti kontraksi otot, tekanan darah, postur tubuh, dan lain-lain. Semua informasi ini memengaruhi perilaku organisme yang melibatkan sistem saraf. Untuk memproses beragam informasi dari lingkungan hewan, sistem saraf harus berfungsi dalam tiga cara utama (Randall, D, Burggren, French, 1997: 127) (Rastogi, 2007: 311), yaitu:



1. Menerima rangsangan eksternal dan internal untuk memberikan informasi sensorik tentang dirinya dan lingkungannya sendiri,
2. Mengintegrasikan semua informasi ini sehingga interpretasi yang berarti dari data yang dimasukkan oleh organ sensorik dapat diterjemahkan, dan
3. Mengatur aktivitas intraseluler untuk menjaga koordinasi gerakan seluruh organisme, misalnya melibatkan stimulasi otot, kelenjar dan neuron yang berkaitan dengan persepsi, pembelajaran dan memori, dan lain-lain.

A. UNIT PENYUSUN SISTEM SARAF

Sistem saraf dapat dibagi menjadi: (1) sistem saraf pusat yaitu otak dan sumsum tulang belakang; (2) sistem saraf tepi yang terdiri dari saraf kranial, saraf tulang belakang (Rastogi, 2007: 128). Unit fungsional sistem saraf disebut neuron yang terdistribusi di seluruh tubuh. Mereka memiliki sejumlah besar jenis sinapsis di mana informasi dapat dikirim.

Pada organisme tingkat tinggi (seperti burung dan mamalia) memiliki sistem saraf pusat yang berkembang dengan baik (SSP) yang terdiri dari sumsum tulang belakang, batang otak, medula oblongata, otak kecil dan otak besar. Sistem perifer terdiri dari saraf yang terhubung langsung dengan otak dan pasokan ke organ perifer. Pada sistem saraf pusat, terbagi menjadi sistem saraf somatik dan sistem saraf otonom. Sistem saraf somatik dicirikan oleh adanya koneksi khusus tertentu yang disebut sinapsis yang terletak di dalam sumsum tulang belakang, sedangkan dalam sistem otonom sinapsis terletak di luar sumsum tulang belakang.

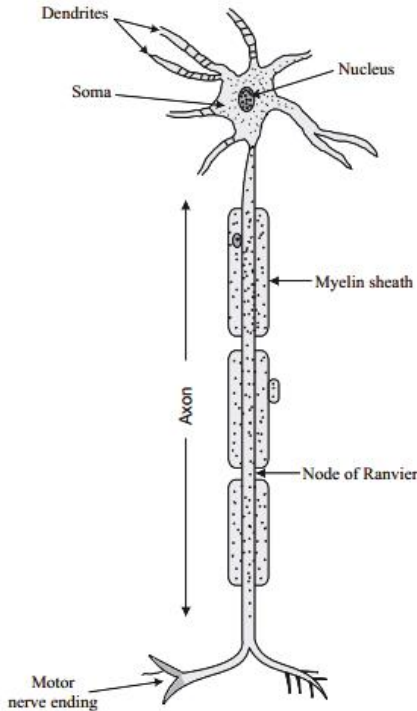
Fungsi utama dari sistem saraf pusat adalah untuk menerima impuls, untuk menimbulkan berbagai pola tanggapan, dan juga memodifikasinya. Segera setelah stimulus diberikan, respons dilakukan secara spontan. Untuk mengirimkan impuls, sistem saraf memiliki unit fungsional dasar tertentu yang telah disebutkan sebelumnya sebagai neuron.

1. Sel Saraf (Neuron)

Neuron sebagai unit fungsional dari sistem saraf bekerja me-



lalui konduksi potensial aksi yang merupakan perubahan sederhana dalam hal polaritas voltase yang tercipta antar membran neuron. Potensial aksi merepresentasikan transmisi informasi melalui sistem saraf secara keseluruhan dan sekaligus menjalankan fungsi koordinasi dan kontrol.



GAMBAR 3.2. Struktur utama dari neuron (Rastogi, 2007: 313).

Struktur mikroskopis neuron terdiri dari badan sel utama (soma), dendrit, dan akson. Dendrit merupakan pemanjangan dari soma atau badan sel neuron. Fungsinya untuk menerima informasi dari neuron-neuron lainnya dan dari reseptor sensoris, dan untuk memberikan informasi berkenaan dengan apa yang terjadi di lingkungan luar tempat hewan tersebut hidup. Informasi-informasi yang diterima oleh dendrit akan dikonversi ke dalam bentuk



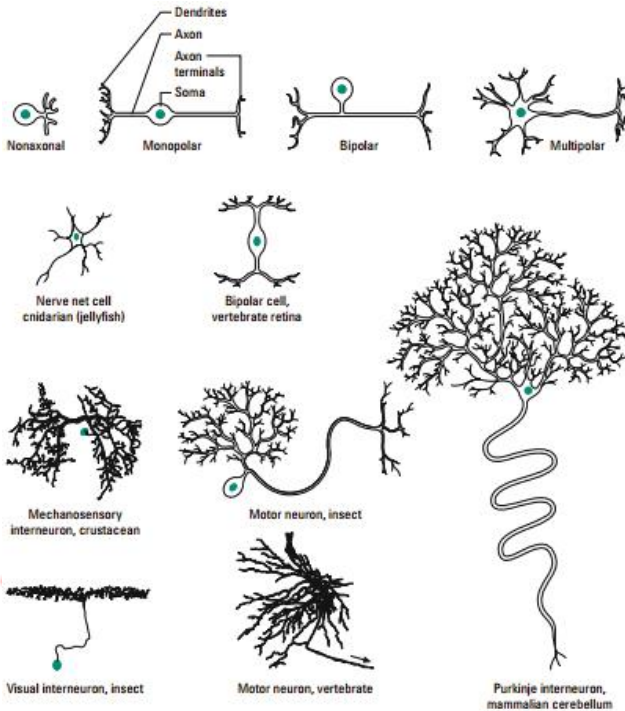
potensial membran yang ditransmisikan ke badan sel (soma). Informasi dari neuron lain biasanya ditransmisikan ke dendrit dan soma neuron, sehingga neuron dengan pohon dendritik yang luas dan kompleks biasanya menerima banyak input. Dendrit umumnya bercabang, memanjang dari soma, lokasi dan pola percabangan dendrit dapat mengungkapkan dari mana masing-masing neuron mendapatkan informasinya.

Soma memiliki semua organel sel yang umumnya ada (misalnya nukleus dan mitokondria). Di sini berbagai neurotransmitter khususnya neuropeptida disintesis dan ditransportasikan ke terminal akson yang kemudian akan dilepaskan selama proses transmisi sinaptik. Soma terutama diperlukan untuk pertumbuhan, pemeliharaan dan perbaikan. Jika akson terputus dari soma, maka akan diregenerasi. Jika soma rusak, maka akson tidak bisa diregenerasi (Randall, D, Burggren, French, 1997: 313).

Akson atau serat saraf adalah silinder berongga yang diisi oleh sitoplasma yang berbeda dalam komposisi kimianya dari fluida di sekitarnya. Akson berperan dalam pembentukan saraf. Akson adalah penjururan dari badan sel. Penghubung antara badan sel dan akson disebut *hillock akson*. Tempat tersebut sangat penting sebagai tempat asal dari potensial aksi saraf. Fungsi akson adalah untuk mentransmisikan potensial aksi yang menjalar sepanjang badan akson hingga ke terminal akson tersebut. Terminal akson berhubungan dengan berbagai struktur termasuk dendrit, badan sel, akson dari neuron lainnya, dan juga dengan jaringan nonneural 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*. Selubung tersebut bersifat diskontinu karena di beberapa tempat akan ada pembatas atau celah yang disebut dengan nodus ranvier. Fungsi mielin adalah untuk meningkatkan kecepatan transmisi potensial aksi di sepanjang akson. Dalam kondisi biasa, arah penjalaran potensial aksi hanya berlangsung satu arah yaitu dari badan sel ke terminal akson.



Neuron dapat diklasifikasikan berdasarkan jumlah tonjolan-tonjolan yang berasal dari badan selnya. Berdasarkan klasifikasi ini, terdapat tiga tipe neuron yaitu neuron multipolar, neuron bipolar, dan neuron unipolar. Neuron unipolar memiliki satu akson yang membawa impuls ke arah atau menjauh dari akson. Neuron bipolar memiliki dua proses yang timbul dari tubuh sel, dan neuron multipolar memiliki beberapa dendrit di satu ujung, akson di sisi lain.



GAMBAR 3.3. Tipe neuron beberapa hewan (Willmer, P, Stone, G, Johnston, 2005: 224).

Selain itu, neuron dapat juga diklasifikasikan ke dalam empat kelompok berdasarkan fungsinya yaitu neuron motoris (neuron eferen), neuron sensoris (neuron aferen), dan neuron penghubung



atau interneuron (*neuron internuncial*) dan neuron sekretori (Rastogi, 2007: 315). Neuron juga diklasifikasikan kepada neuron yang bermielin dan tidak bermielin. Neuron yang bermielin tertutup dalam selubung yang terdiri dari satu hingga beberapa lapisan membran yang berasal dari sel *schwann*. Membran mengandung kolesterol dan fosfolipid.

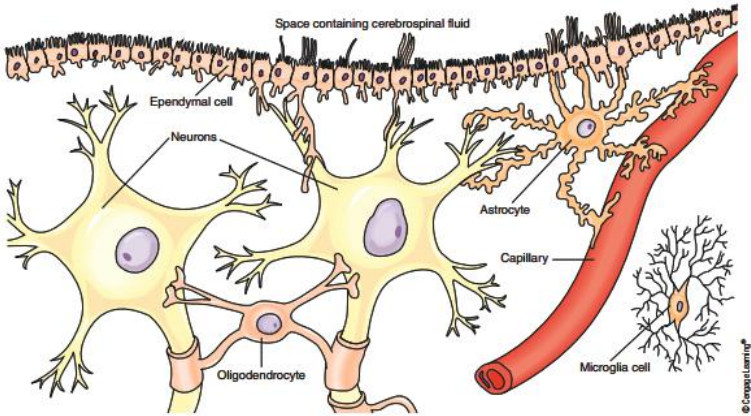
Neuron motorik yang menyampaikan informasi dari sistem saraf pusat ke organ efektor, seperti otot, kelenjar, dan lain-lain. Neuron sensorik, yang mengirimkan informasi sensorik dari bagian tubuh ke sistem saraf pusat. Neuron *internuncial* yang terletak di antara motor (eferen) dan neuron sensorik (eferen), mentransmisikan sinyal dalam beberapa arah dengan memodifikasi mereka dengan cara yang paling sesuai dengan kebutuhan hewan. Neuron sekretori adalah neuron yang dikhususkan untuk produksi hormon.

2. Sel Glia

Kelompok kedua dari sel yang ditemukan pada sistem saraf adalah sel glia (neuroglia). Jumlah sel glia sekitar 90% dari sistem saraf. Meskipun jumlahnya besar, tetapi sel glia hanya menempati separuh dari volume otak, karena sel glia ini tidak bercabang-cabang. Sel glia ini berhubungan erat dengan neuron meskipun tidak terlibat dalam mengantarkan potensial aksi saraf. Terdapat empat tipe sel glia yaitu astosit, oligodendrosit, sel endodermal, dan mikroglia.

Astrosit 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 sarung mielin akson dalam sistem saraf pusat. Sel endodermal 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 (Chambell *et al.*, 2008).





GAMBAR 3.4. Sel glia vertebrata; astrosit, oligodendrosit, mikroglia dan epin-dimal (Rizzo, 2016: 236)

Sel glia mempunyai kemampuan untuk membelah diri. Oleh karena itu, kebanyakan tumor otak berasal dari sel glia. Sel saraf tidak mempunyai kemampuan untuk membelah diri.

B. MEKANISME KERJA NEURON

Sel saraf adalah sel yang berfungsi menghantarkan rangsang-an. Pada dasarnya neuron bekerja dengan cara menghasilkan dan mengantarkan potensial aksi yang merupakan gelombang listrik (transmisi listrik) yang menjalar di neuron. Hal ini berlangsung karena kondisi listrik dari membran neuron dapat mengalami perubahan-perubahan.

Potensial membran diukur dengan menggunakan voltmeter. Besarnya potensial membran yang diukur saat sel istirahat dinamakan potensial istirahat atau membran potensial dasar (*Resting potential membran-RMP*). Besarnya potensial istirahat ini berbeda, tergantung kepada jenis selnya (-100 sampai dengan -30 mV). Tanda minus (-) menunjukkan bahwa keadaan di sisi dalam membran lebih negatif dari pada di sisi luar membran. Perbedaan potensial tersebut disebabkan oleh distribusi Na^+ dan K^+ yang tidak seimbang di kedua sisi membran sel saraf. Resting potensial membran



(RMP) dapat dipahami dengan mudah dengan menganalisis terlebih dahulu distribusi ion melintasi membran bersama dengan permeabilitas yang berbeda-beda dari membran sel neuron terhadap berbagai ion.

TABEL 3.1. Distribusi dari ion-ion utama pada akson cumi-cumi (Rastogi, 2007: 316)

Ion	Akson		Potensial equilibrium
	Konsentrasi di dalam sitoplasma (mM)	Konsentrasi di cairan ekstraseluler (mM)	
K ⁺	400	20	-75
Na ⁺	50	440	+55
Cl ⁻	52	560	-60

Dari tabel tersebut terlihat bahwa tidak ada distribusi ion yang sama di dalam dan di luar membran sel saraf (akson). Pada kondisi basal, membran sel neuron bersifat sangat permeabel terhadap ion K⁺ karena dalam kondisi basal tersebut, *channel* K⁺ di dalam membran sel terbuka dan memungkinkan ion-ion tersebut untuk masuk ke dalam sel. Membran tersebut kurang permeabel terhadap ion Na⁺, hanya sekitar seper dua puluh lima dari ion K⁺. Permeabilitas terhadap ion ditentukan oleh keberadaan saluran ion (*channel*) yang selektif di dalam membran sel (Squire *et al.*, 2008: 111). *Channel* tersebut berupa pori protein yang membentuk saluran di dalam membran yang dapat menutup dan membuka. Jika salah satu *channel* terbuka, pergerakan ion melewati membran dapat berlangsung dan juga sebaliknya jika *channel* tersebut tertutup.

Adapun mekanisme kerja saraf meliputi fase istirahat (resting potensial), depolarisasi, repolarisasi, hiperpolarisasi (Willmer, P, Stone, G, Johnston; 2005, 227) sebagai berikut:

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 pelaluan 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.

2. Fase Depolarisasi

Selama fase depolarisasi itu, potensial aksi dibangkitkan 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 120m/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 yang memicu 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.



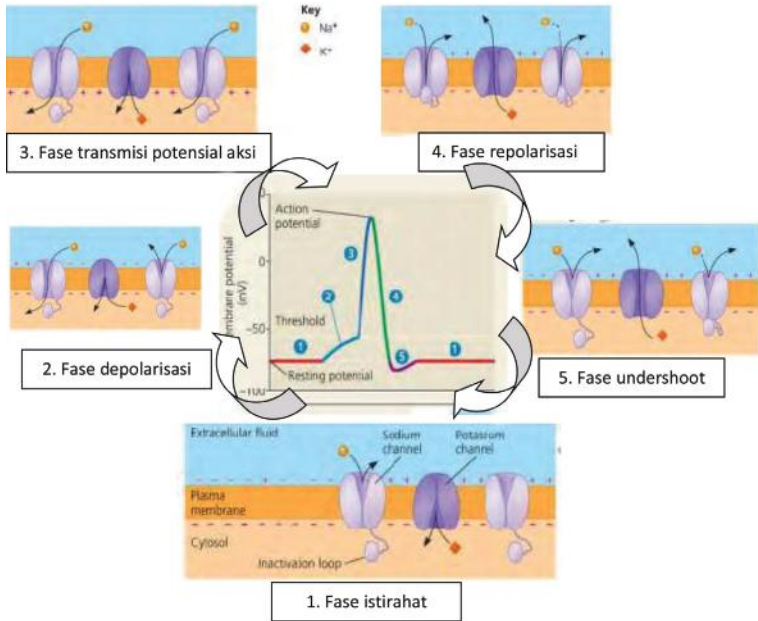
3. Rising Phase/Fase Transmisi Potensial Aksi Sepanjang Akson
Potensial aksi, yang berasal dari *hilloks akson* harus melewati terminal akson sebelum menimbulkan pengaruh terhadap neuron, otot, atau jaringan glandular lainnya. Ini juga berlangsung dengan arus lokal. Hal yang terjadi selama potensial aksi adalah bahwa muatan positif di sebelah dalam membran akson ditarik ke sisi sebalahnya 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 sebalahnya 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.

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).
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 3.5. Mekanisme kerja saraf (Chambell *et al.*, 2008)

C. SINYAL-SINYAL DALAM SISTEM SARAF

Sebagaimana diketahui bahwa potensial aksi hanya akan tercipta apabila potensial membran mencapai suatu level ambang (*threshold*) batas yang memadai. Ketika potensial membran mencapai level ambang batas, maka potensial aksi akan memiliki nilai yang konstan. Sebagai contoh, jika satu timulus sebesar 10 volt akan menimbulkan potensial aksi pada membran, maka potensial aksi yang ditimbulkan oleh 10 volt juga akan sama besarnya. Dengan demikian, untuk menimbulkan potensial aksi di neuron



berlaku hukum “*all or nothing*” atau semua atau tidak sama sekali. Potensial aksi akan muncul jika level ambang batas tercapai atau jika tidak tercapai maka tidak akan pernah tercipta potensial aksi.

Perbedaan mendasar dalam aksi neuron sebenarnya terletak pada aspek frekuensi potensial aksi yang ditimbulkan. Misalnya, stimulus berupa rasa sakit yang biasa saja akan memicu aksi potensial 10 kali per detik, sedangkan stimulus rasa sakit yang sangat hebat akan menghasilkan frekuensi aksi potensial 100 kali per detik. Artinya bahwa informasi dalam sistem saraf dikodekan berdasarkan frekuensinya. Jika satu potensial aksi memerlukan waktu selama 2-3 milisekon, maka frekuensinya berkisar 300-500 per sekon.

Laju maksimum pengantaran potensial aksi dibatasi oleh periode refraktori neuron (repolarisasi). Periode refraktori ini dapat dibagi menjadi dua komponen yaitu periode refraktori absolut dan periode refraktori relatif. Selama periode refraktori absolut, mustahil untuk dapat menggerakkan sedikit saja dari potensial aksi neuron karena pada kondisi tersebut *channel* ion Na^+ tidak aktif, sedangkan Na^+ sangat penting dalam menimbulkan potensial aksi. Adapun pada periode refraktori relatif, masih memungkinkan untuk menciptakan satu detik potensial aksi akan tetapi memerlukan stimulus yang lebih besar dari kondisi normal. Penjelasan mengenai periode refraktori relatif adalah bahwa pada akhir potensial aksi, *channel* K^+ masih terbuka dan muatan positif sedang meninggalkan sel (perlu diketahui bahwa sisi dalam neuron harus lebih bermuatan positif selama potensial aksi). Akan tetapi, selama tahap tersebut, *channel* ion dapat terbuka dan akan mendepolarisasi sel. Esensinya, harus ada peningkatan dari level ambang batas potensial membran. Respons depolarisasi lainnya (misalnya masuknya ion Na^+) dapat dilawan dengan respons hiperpolarisasi yaitu dengan hilangnya ion-ion K^+ .

D. TRANSMISI SINAPSIS

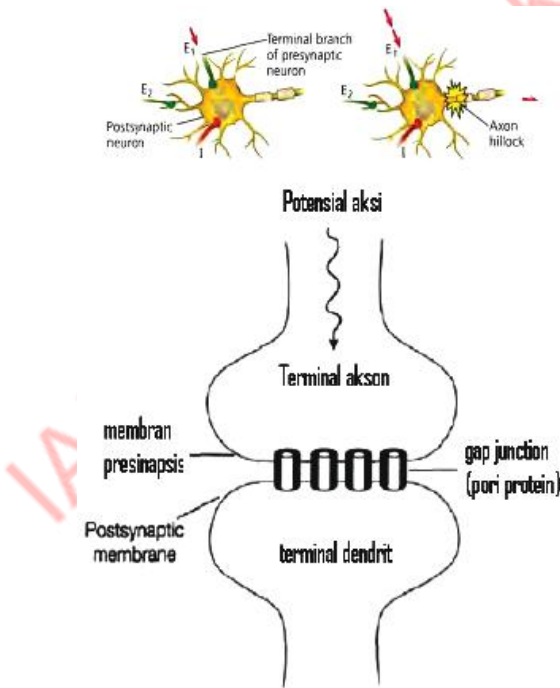
Sinapsis adalah persambungan unik yang mengontrol komunikasi antara satu neuron dan sel-sel lain. Sinapsis ditemukan antara dua neuron, antara reseptor sensoris dan neuron sensoris, antara



neuron motoris dan sel otot yang dikontrolnya, dan antara neuron dan sel kelenjar-kelenjar. Sel yang menghantarkan sinyal itu disebut sel prasinaptik dan sel yang menerima disebut *pascasinaptik*. Sinapsis terdiri atas dua jenis yaitu sinapsis listrik dan sinapsis kimiawi.

1. Transmisi Listrik Melintasi Sinapsis Listrik

Sinapsis merupakan mekanisme paling sederhana di mana potensial aksi dapat ditransfer dari satu neuron ke neuron lainnya. Pre dan post-sinapsis membran saling berdekatan satu sama lainnya membentuk kontak antar sel yang disebut dengan *gap junction*. *Gap*



GAMBAR 3.6. Sel presinaptik dan postsinaptik, *gap junction* (Chambell *et al.*, 2008). Membran pre- dan post-sinapsis saling berdekatan satu sama lain dan secara fisik dihubungkan oleh *gap junction*. Ion lewat dari membran presinapsis ke postsinapsis melalui pori protein (koneksi).

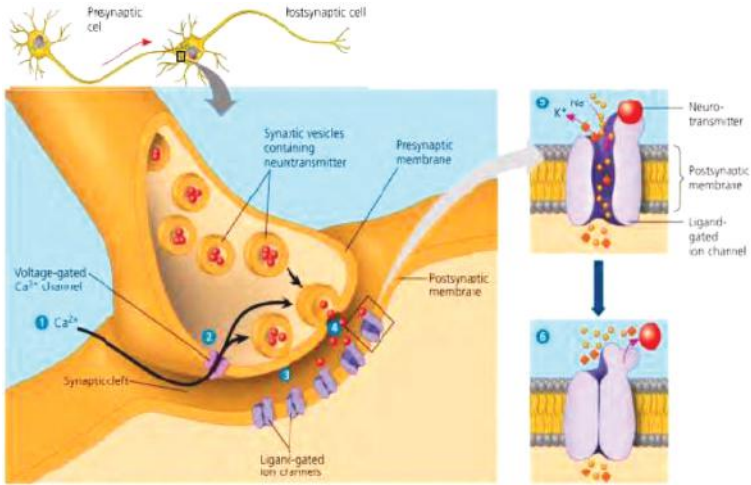


junction ini kadang disebut dengan konekson yang mengandung struktur protein yang melekatkan dua membran sel. Keberadaannya memungkinkan ion-ion untuk lewat dari neuron presinapsis ke neuron postsinapsis. *Gap junction* dapat tertutup atau terbuka, membiarkan atau menghambat potensial aksi untuk lewat dari satu neuron ke neuron lainnya. Hal ini memungkinkan sinapsis listrik membiarkan potensial membran untuk bergerak satu arah saja dari neuron presinapsis ke postsinapsis. Sinapsis bergantung kepada arus lokal. Neuron presinapsis yang kecil tidak akan dapat menstimulasi neuron postsinapsis yang lebih besar (termasuk juga terhadap sel-sel otot). Oleh karenanya, penggunaan sinapsis listrik tidak seluas penggunaan sinapsis kimiawi. Sinapsis listrik telah ditemukan pada beberapa filum invertebrata seperti anelida, arthropoda dan moluska. Selain itu juga ditemukan pada vertebrata, misalnya pada kelompok ikan.

2. Transmisi Kimiawi Melintasi Sinapsis

Depolarisasi terminal presinapsis akan menghasilkan influx ion Ca^{2+} ke dalam terminal presinaptik tersebut. Ion Ca^{2+} masuk melalui *channel* ion yang telah terbuka sebagai respons terhadap depolarisasi. *Channel* tersebut adalah *channel* yang bergerbang voltase di mana respons membukanya *channel* ditentukan oleh perubahan pada potensial membran. Efek influks Ca^{2+} mengaktivasi enzim kalsium/kalmodulin dependen kinase 1, yang menyebabkan berlangsungnya aktivitas fosforilasi terhadap substratnya. Dalam hal ini, enzim memfosforilasi sinapsin. Biasanya, sinapsin melekat pada vesikel yang mengandung substansi neurotransmitter. Ketika terfosforilasi, sinapsin terlepas dari vesikel sehingga vesikel akan berfusi dengan membran presinapsis, yaitu di titik-titik spesifik pada membran terminal akson presinapsis. Melalui proses eksositosis, neurotransmitter dilepaskan ke dalam sinapsis di mana akan terjadi difusi dan berkombinasi dengan reseptor spesifik pada membran postsinapsis.





GAMBAR 3.7. Elemen sinapsis kimiawi. Ketika potensial aksi mendepolarisasikan membran terminal sinaptik, potensial aksi itu (1) memicu aliran masuk Ca^{2+} yang (2) menyebabkan vesikula sinaptik menyatu dengan membran neuron prasinaptik. Ketika vesikula sinaptik menyatu dengan membran (3) molekul neurotransmitter dibebaskan ke dalam celah sinaptik. Molekul ini berdifusi menembus celah dan berikatan dengan reseptor saluran ion yang tertanam dalam membran post-sinaptis itu, (4) pengikatan molekul neurotransmitter dengan reseptor spesifiknya akan membuka saluran ion. Pergerakan ion yang dihasilkan mengubah voltase membran post-sinaptis, sehingga memindahkan potensial membran menuju harga ambang yang diperlukan untuk suatu potensial aksi (suatu sinapsis eksitatoris) atau menghiperpolarisasikan membran (suatu sinapsis inhibitoris). (5). Pada kasus lain, molekul neurotransmitter secara cepat dirombak oleh enzim atau diambil kembali oleh neuron lain, yang menutup saluran ion dan mengakhiri respons sinaptik (Chambell *et al.*, 2008).

Jika neurotransmitter telah berkombinasi dengan reseptornya, ia akan dapat memengaruhi potensial membran dari neuron post-sinapsis. Hal ini dapat terjadi dengan dua cara yaitu:

- (a). Reseptor membentuk kompleks *channel* ion/reseptor yang lebih besar. Dengan demikian, jika reseptor diaktivasi oleh neurotransmitter, akan memicu perubahan konformasi dari struktur *channel* ion. Selanjutnya terbukalah *channel*, sehingga



ion-ion dapat bergerak melintasi membran dan menimbulkan perubahan potensial membran.

- (b). Reseptor jika diaktivasi akan menghasilkan molekul *messenger* kedua (*second messenger*) yaitu cAMP. Molekul ini akan memengaruhi pembukaan *channel* ion dan akhirnya akan mengubah potensial membran.

TABEL 3. 2. Beberapa neurotransmitter yang ditemukan pada neuron hewan

Jenis neurotransmitter	Hewan
Asetilkolin	Cacing pipih, insekta, moluska
Dopamin	Moluska, crustacea, vertebrata
Noradrenalin (norepineprin)	Vertebrata
Serotonin	Vertebrata
Histamin	Vertebrata, crustacea
Glutamin	Crustacea, insekta, vertebrata
Aspartat	Crustacea, vertebrata
Gamma-amino butirik acid (GABA)	Vertebrata, annelida
Vassopresin (ADH)	Vertebrata

Jika suatu substansi diklasifikasikan sebagai neurotransmitter, harus memenuhi beberapa kriteria tertentu yaitu:

- Molekulnya harus disintesis di neuron tempatnya dilepaskan.
- Molekulnya harus disimpan di dalam neuron tempatnya dilepaskan.
- Stimulasi pre-sinapsis harus dihasilkan dalam pelepasan molekul tersebut.
- Pemberian molekul tersebut kepada sisi post-sinapsis harus menghasilkan respons yang sama dengan respons post-sinapsis yang distimulasi oleh pre-sinapsis.
- Agen-agen yang menghambat respons post-sinapsis yang dihasilkan oleh stimulasi presinapsis harus menghambat respons tersebut jika molekul neurotransmitter diberikan secara eksogenus.



- f. Harus ada metabolisme dan perusakan yang cepat dari molekul tersebut ketika ia dilepaskan dari terminal akson.

Setelah menstimulasi neuron post-sinapsis, neurotransmitter harus sesegera mungkin dinaktifkan. Hal ini harus dilakukan untuk mencegah stimulus yang berlebihan terhadap sel-sel. Sebagai contoh, jika suatu neuron pre-sinapsis menginervasi satu sel otot. Aktivasi yang kontinu oleh pelepasan neurotransmitter akan menghasilkan kontraksi yang terus-menerus dari sel otot tersebut. Hal ini akan berisiko secara fisiologis. Ada beberapa cara di mana neurotransmitter dihilangkan dari sinapsis, akan tetapi cara termudah adalah dengan metabolisme substansi tersebut disinapsis. Contohnya adalah asetilkolin yang dimetabolisme oleh enzim *asetilkolinesterase* menjadi asetat dan kolin. Asetat akan kembali ke sistem sirkulasi dan kolin akan ditransportasikan kembali secara aktif ke neuron pre-sinapsis untuk kemudian disintesis ulang menjadi asetilkolin. Cara lain untuk menghilangkan neurotransmitter dari sinapsis adalah dengan mentransportasikannya ke dalam sel dan menghancurkannya secara intraseluler.

E. ORGANISASI SISTEM SARAF

1. Organisasi Sistem Saraf Hewan Uniseluler

Sistem saraf dapat dideskripsikan secara sederhana sebagai suatu agregasi atau kumpulan dari neuron yang disusun dalam suatu fungsi kerja yang terkoordinasi. Pada level paling sederhana, sistem saraf hanya membutuhkan satu neuron yang memiliki fungsi sensoris dendrit dan sinapsis terminal akson dengan beberapa sel efektor tertentu (misalnya sel-sel otot). Sistem saraf memberikan kemampuan bagi hewan untuk dapat merespons perubahan-perubahan yang berlangsung baik di lingkungan internal maupun eksternal.

Sangat membingungkan untuk menyatakan bahwa hewan-hewan uniseluler memiliki sistem saraf karena yang menonjol adalah sistem sirkulasi, sistem respirasi dan ekskresi. Akan tetapi, sistem-



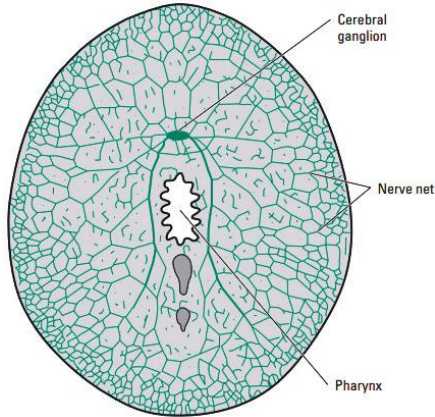
sistem tersebut membutuhkan kemampuan untuk mengontrol dan mengoordinasi semua aktivitasnya. Pada *Paramecium*, adanya silia memiliki beberapa peranan yaitu sebagai alat gerak atau lokomosi dan juga untuk memperoleh makanan di mana makanan diperangkap dengan silia dan masuk ke mulut.

Secara logika, jika hewan tersebut harus bertahan hidup, maka silianya harus dikoordinasi secara hati-hati sehingga mampu bergerak secara teratur dalam arah yang sama dan mampu menangkap makanan secara efektif. Seluruh silia aktif secara spontan tetapi satu silia yang disebut sebagai *pacemaker* melakukan gerakan dengan laju yang lebih cepat daripada silia lainnya dan silia-silia lain tersebut bergerak dengan frekuensi yang sama dengan silia *pacemaker* tersebut. *Pacemaker* mengendalikan seluruh silia karena semua silia saling berpasangan satu sama lain dalam medium air di mana dia hidup. Arah dari gerakan silia dikontrol oleh potensial membran *Paramecium*. Sebagai contoh, jika hewan tersebut bertemu dengan rintangan yang menghambat pergerakannya pada arah tertentu maka akan terjadi pergerakan ke arah lain untuk menghindari halangan tersebut. Interaksi antara rintangan dan hewan tersebut diduga sebagai hasil dari terbukanya *channel* ion Ca^{2+} yang menyebabkan terjadinya depolarisasi membran sehingga gerakan silia akan berubah arah.

2. Jaring-Jaring Saraf (*Nerve Net*)

Jaring-jaring saraf adalah contoh paling sederhana dari sistem saraf yang utuh. Sistem ini dapat ditemukan pada hewan koral, ubur-ubur dan sejenisnya (Matheson, 2002: 2). Jaring-jaring saraf merepresentasikan jaring kerja neuron-neuron di seluruh tubuh hewan. Beberapa dari jaring tersebut merepresentasikan jalur neural yang berhubungan dengan fungsi dari bagian tubuh tertentu. Jaring-jaring saraf pada bagian badan ubur-ubur berperan mengoordinasi gerakan hewan tersebut. Adapun jaring-jaring saraf di tentakel memiliki fungsi sensoris yang penting dalam mendeteksi makanan.

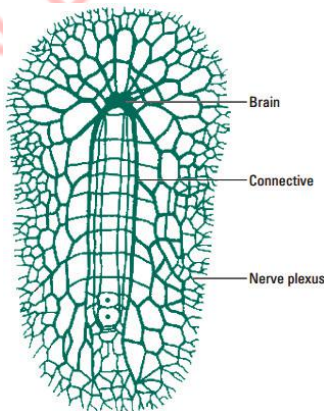




GAMBAR 3.8. Tipe jaring-jaring saraf pada jelli fish (Willmer, P, Stone, G, Johnston, 2005: 248).

3. Sistem Saraf Bilateral (Bumbung Neural)

Bumbung neural adalah jalur-jalur neuron yang bergabung bersama pada tempat di mana informasi ditransmisikan. Hewan paling sederhana yang memperlihatkan bumbung neural adalah cacing pipih. Selanjutnya terlihat perkembangan yang progresif seperti pada anelida dan insekta.

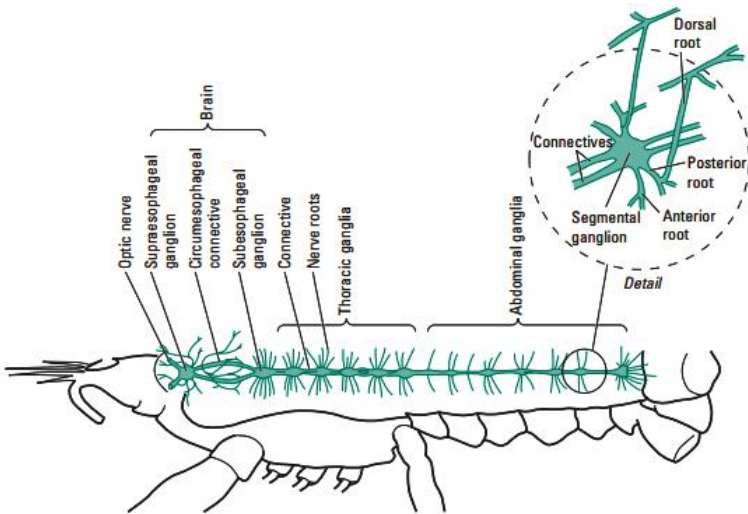


GAMBAR 3.9. Tipe saraf bilateral pada cacing pipih (Willmer, P, Stone, G, Johnston, 2005: 248)



4. Sistem Saraf Segmentasi

Beberapa takson invertebrata memiliki tubuh yang bersegmen, khususnya pada annelida dan artropoda. Jadi tidak mengherankan jika saraf pada kelas hewan ini bersegmen, yang mana pada segmen saraf tersebut terkonsentrasi ganglionnya. Pada annelida, segmen tersebut terkonsentrasi ganglion sekitar 1000. Saraf-saraf tersusun pada bagian lateral di sepanjang tubuh.

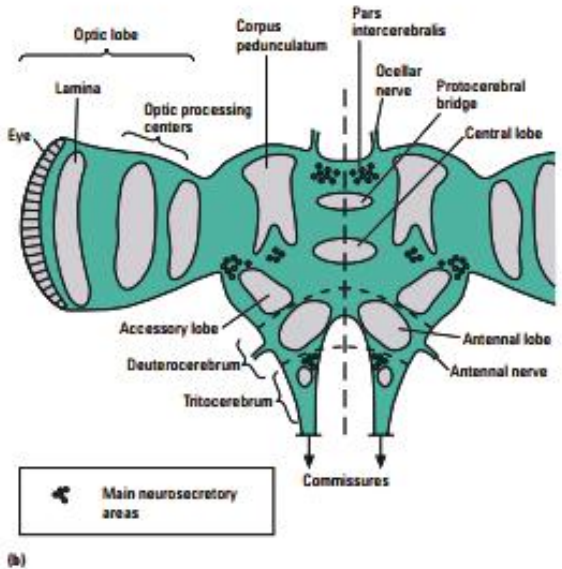
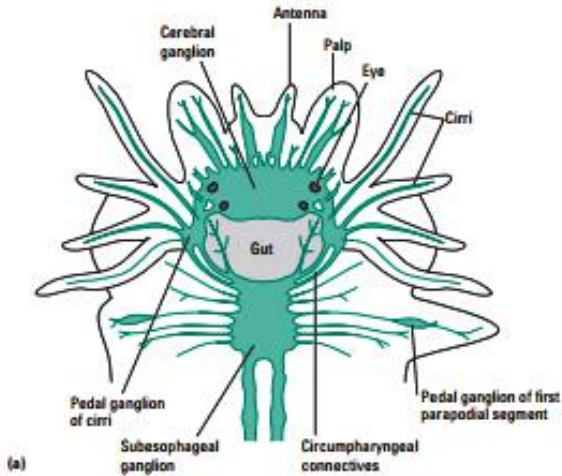


GAMBAR 3.10. Tipe saraf bersegmen pada crustaceae (Willmer, P, Stone, G, Johnston, 2005: 250).

5. Sepalisasi (*Chepalization*)

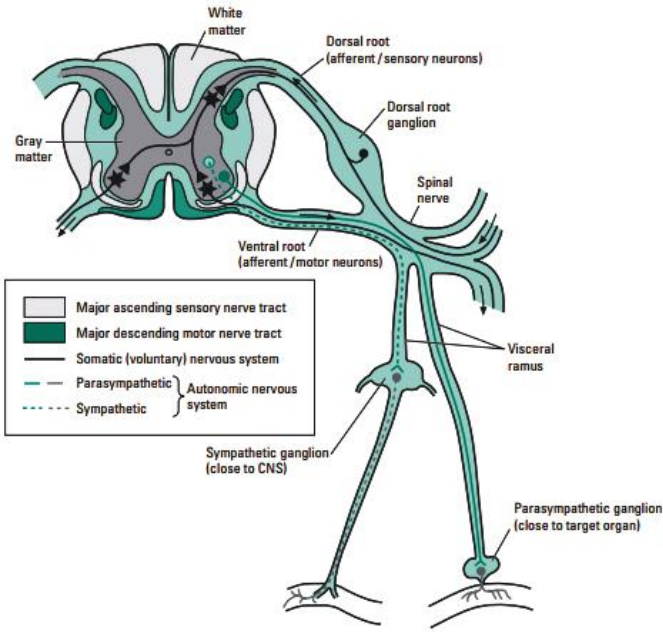
Pada hewan-hewan bersegmen (artropoda), dan beberapa hewan invertebrata yang tidak bersegmen seperti annelida juga memiliki sistem saraf sudah mulai terlihat terpusat pada bagian kepala (sepalisasi). Pada vertebrata ditemukan adanya perkembangan otak sebagai sistem saraf pusat dengan buncung neural yang berbeda-beda dalam hal kompleksitasnya antarkelas. Perkembangannya sangat teratur dari kelas *pisces*, amfibia, reptilia, aves, dan mamalia. Sistem saraf yang sudah terpusat pada otak.





GAMBAR 3.11. Tipe saraf bersegmen pada *crustaceae* (Willmer, P, Stone, G, Johnston, 2005: 251).





GAMBAR 3.12. Tipe saraf bersegmen pada *crustaceae* (Willmer, P, Stone, G, Johnston, 2005: 252)

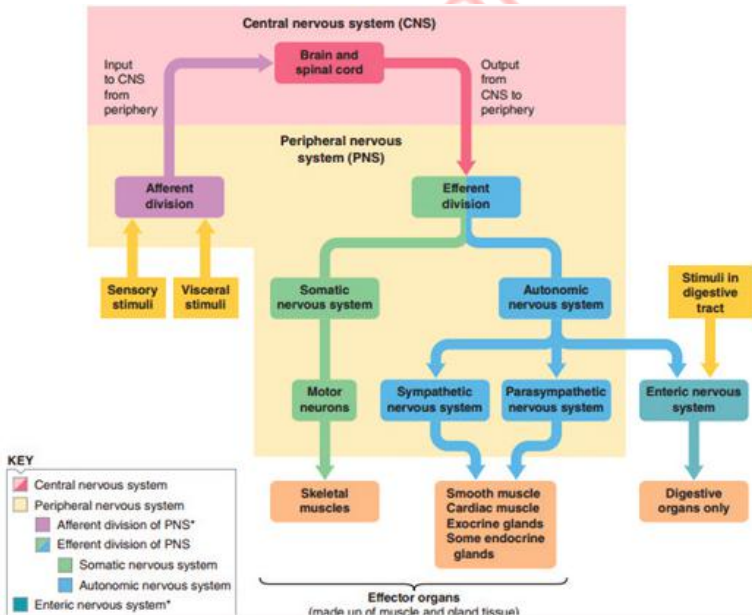
TABEL 3.3. Perbedaan sistem saraf pada artropoda dengan vertebrata

Sistem saraf artropoda	Sistem saraf vertebrata
Otak pada bagian anterior atau ganglion besar, dengan ganglion di sepanjang segmen tubuhnya yang ditautkan oleh sepasang bundelan serat ikat.	Otak anterior dengan sumsum tulang belakang memiliki percabangan segmental yang terpol.
Tali saraf adalah berada pada bagian ventral, solid, dan ganda.	Tali pusat saraf berada pada bagian dorsal, berongga, dan berkembang dari satu tabung saraf.
Ganglia adalah entitas yang terpisah dalam SSP.	Ganglia adalah kumpulan tubuh sel saraf di luar SSP.



F. SISTEM SARAF VERTEBRATA

Sistem saraf vertebrata secara struktural dan fungsional beragam. Sebagai contoh korteks serebral pada otak lumba-lumba secara struktural lebih kompleks dan merupakan prosesor informasi yang jauh lebih ampuh dibandingkan dengan korteks serebral ikan atau katak. Namun, semua sistem saraf vertebrata mempunyai beberapa kemiripan mendasar, yaitu adanya unsur pusat dan tepi yang jelas dan spesialisasi yang tinggi. Otak dan sumsum tulang belakang vertebrata menyusun Sistem Saraf Pusat (SSP). Otak menyediakan kemampuan integratif yang mendasari perilaku kompleks yang khas pada vertebrata. Sum-sum tulang belakang yang membentang sepanjang tulang belakang atau spinal, mengintegrasikan respons yang sederhana terhadap jenis stimulus tertentu dan mengirimkan informasi ke dan dari otak.



GAMBAR 3.13. Sistem saraf vertebrata



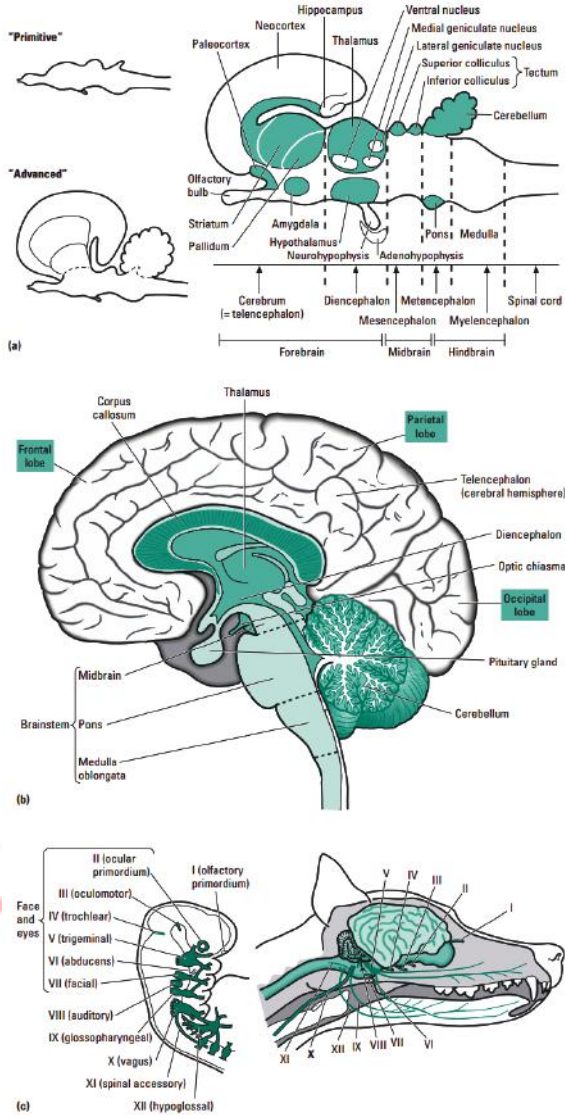
1. Saraf Pusat (Otak dan Sum-sum Tulang Belakang)

Otak vertebrata berkembang dari tiga perbesaran anterior sum-sum tulang belakang, yaitu otak depan, otak tengah, dan otak belakang. Otak depan vertebrata memiliki dua bagian, yaitu diensefalon dan telensefalon.

Diensefalon terdiri atas talamus, hipotalamus dan pituitari posterior, berfungsi sebagai pusat pengaturan. Talamus berfungsi sebagai pusat integrasi untuk input dari semua sistem sensori, sebagai “*stasiun relay*” untuk saluran informasi sensori ke serebral bagian korteks yang tepat, dan sebagai saluran informasi motor ke arah korda spinalis. Bagian depan diensefalon adalah hipotalamus, yang banyak terlibat dalam pengaturan tubuh. Hipotalamus banyak mengandung neurosekretori yang memproduksi hormon-hormon yang dibebaskan ke pituitari anterior. Fungsi hipotalamus adalah (1) mengatur suhu tubuh dalam; (2) mengontrol osmoregulasi; (3) mengontrol fungsi viseral dan reaksi emosional, misalnya ingin makan, minum, marah, nafsu seksual dan sebagainya; (4) mengontrol tingkah laku instingtif.

Telensefalon terdiri atas serebrum (belahan serebral, korteks serebral, bahan putih dan nukleus basal). Korteks serebral adalah bagian otak manusia yang paling besar dan sangat kompleks. Khususnya pada mamalia, perilaku yang canggih dan rumit sering dikaitkan dengan ukuran relatif korteks serebral dan adanya pelekukan yang meningkatkan luas permukaannya. Meskipun tebalnya kurang dari 5 mm, korteks serebral manusia mempunyai luas permukaan sekitar 0,5 m² dan menempati sekitar 80% dari total masa otak. Nukleus basal/ganglia basal merupakan pusat motoris yang bertindak sebagai saklar untuk impuls dari sistem motoris lain. Telensefalon pada ikan dan amfibi berfungsi sebagai pusat penciuman/olfaktori dan menerima input dari bulbus olfaktori. Pada reptil dan burung bagian ini berfungsi sebagai suatu lobus olfaktori. Bahan putih mempunyai badan sel saraf, dendrit dan akson yang tidak bermielin.





GAMBAR 3.14. Anatomi sistem saraf vertebrata dari sederhana sampai kompleks. (a) otak katak; (b) otak mamalia; (c) otak embrio mamal dan otak mamalia setelah dewasa.



Otak tengah atau bagian batang otak vertebrata hanya mengalami perubahan ukuran sedikit saja, tetapi dalam fungsi mengalami perubahan yang besar. Pada ikan dan amfibi berfungsi sebagai pusat pengontrol tingkah laku. Pada mamalia berfungsi dalam kontrol homeostasis, koordinasi pergerakan, penghantaran dan pengiriman informasi ke pusat otak yang lebih tinggi, yaitu medula oblongata dan pons.

Otak belakang terbagi menjadi dua yaitu pons dan medula oblongata. Medula oblongata dan pons berfungsi sebagai pusat yang mengatur beberapa fungsi viseral (otonom dan homeostasis), yang meliputi pernapasan, jantung, aktivitas pembuluh darah, penelanan, muntah dan pencernaan.

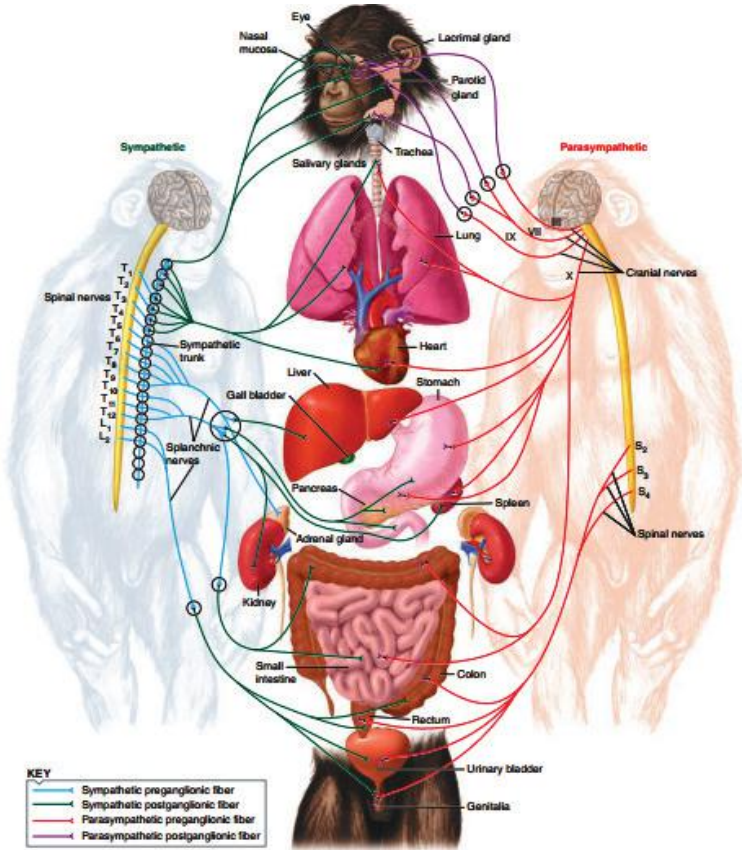
2. Saraf Tepi

Sistem saraf tepi vertebrata mempunyai beberapa komponen yang berbeda dalam hal organisasi dan fungsi. Secara struktural sistem saraf tepi vertebrata terdiri atas saraf kranial dan saraf spinal yang berpasangan. Saraf kranial berasal dari otak yang menginervasi organ kepala dan tubuh bagian atas. Saraf spinal berasal dari sum-sum tulang belakang dan menginervasi keseluruhan tubuh. Mamalia mempunyai 12 pasang saraf kranial dan 31 pasang saraf spinal. Sebagian besar saraf kranial dan semua saraf spinal mengandung neuron sensoris maupun neuron motoris; beberapa saraf kranial hanya memiliki neuron sensoris (saraf olfaktorik dan optik).

Divisi sensoris sistem saraf tepi tersusun atas neuron sensoris/eferen yang mengirimkan informasi dari reseptor sensoris ke sistem saraf pusat yang memonitor lingkungan eksternal dan internal. Divisi motoris tersusun atas neuron eferen yang mengirimkan informasi dari sistem saraf pusat ke sel efektor. Sistem saraf somatik pada divisi motoris membawa sinyal ke otot rangka terutama sebagai respons terhadap stimulus eksternal. Sistem saraf somatik sering disebut saraf sadar karena mengikuti kontrol sadar, akan tetapi sebagian besar pergerakan otot rangka sebenarnya ditentukan oleh gerak refleks yang diperantarai oleh sum-sum tulang belakang atau otak bagian bawah. Sistem saraf otonom pada divisi



motoris mengirimkan sinyal yang mengatur lingkungan internal dengan mengontrol otot polos dan otot jantung serta organ-organ sistem pencernaan, kardivaskular, ekskresi, dan endokrin. Kontrol ini umumnya di bawah kesadaran.



GAMBAR 3.15. Representasi saraf simpatik dan parasimpatik pada vertebrata (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 159).

Sistem saraf otonom terdiri atas saraf simpatetik dan parasimpatetik. Ketika kedua saraf ini menginversi organ yang sama, keduanya sering mempunyai pengaruh yang berlawanan. Umum-



nya sinyal yang dibawa melalui saraf parasimpatetik meningkatkan aktivitas, sebaliknya saraf simpatetik menurunkan aktivitas.

Sistem saraf otonom sering bekerja sama dengan saraf somatis. Sebagai contoh, apabila terjadi penurunan suhu lingkungan, maka hipotalamus akan mengirim sinyal sistem saraf otonom untuk menyempitkan pembuluh darah permukaan, yang akan mengurangi kehilangan panas; pada saat yang sama hipotalamus akan mengirim sinyal kesistem saraf somatik dan menyebabkan respons menggigil.

G. RINGKASAN

1. Sistem saraf dapat dibagi menjadi: (1) sistem saraf pusat yaitu otak dan sumsum tulang belakang; (2) sistem saraf tepi yang terdiri dari saraf kranial, saraf tulang belakang.
2. Sistem saraf dibangun oleh neuron dan sel glia.
3. Terdapat tiga tipe neuron berdasarkan tonjolan, yaitu neuron multipolar, neuron bipolar, dan neuron unipolar. Neuron dapat juga diklasifikasikan ke dalam empat kelompok berdasarkan fungsinya yaitu neuron motoris (neuron eferen), neuron sensoris (neuron aferen), dan neuron penghubung atau interneuron (neuron internunsial) dan neuron sekretori. Neuron juga diklasifikasikan kepada neuron yang bermielin dan tidak bermielin.
4. Mekanisme kerja saraf meliputi fase istirahat (resting potensial), depolarisasi, repolarisasi, hiperpolarisasi.
5. Sinapsis adalah persambungan unik yang mengontrol komunikasi antara satu neuron dan sel-sel lain. Sinapsis ada dua yaitu sinapsis listrik dan sinapsis kimia.
6. Organisasi sistem saraf terdiri dari organisasi saraf pada hewan uniseluler, sistem saraf berupa jaring-jaring saraf, bumbung neural, saraf yang bersegmen-segmen dan sistem saraf sepalisasi.
7. Sistem saraf vertebrata secara struktural dan fungsional beragam. Namun, semua sistem saraf vertebrata mempunyai beberapa kemiripan mendasar, yaitu adanya unsur pusat dan tepi yang jelas dan jelas cephalisasi yang tinggi.



H. LATIHAN

1. Jelaskan komponen penyusun sistem saraf dan masing-masing fungsinya!
2. Tuliskan klasifikasi sel saraf berdasarkan tonjolan dan berdasarkan fungsinya!
3. Jelaskan bagaimana penyampaian impuls saraf oleh sistem saraf!.
4. Jelaskan perbedaan sinap listrik dengan sinap kimia!
5. Jelaskan mekanisme kerja saraf dilengkapi dengan gambar!
6. Jelaskan organisasi sistem saraf hewan beserta contoh hewan-hewannya!
7. Tuliskan perbedaan sistem saraf artropoda dan vertebrata!
8. Buat skema bentuk hubungan antara letak dan fungsi antara neuron sensoris, interneuron dan neuron motoris!
9. Buat skema pembagian sistem saraf vertebrata!
10. Jelaskan fungsi dari otak depan, otak tengah dan otak belakang pada vertebrata!.

I. REFERENSI

- Champbell, Neil A, R., Jane B, Urry, Lisa A, C., L, M., Wasserman, Steven A, Minorsky, Peter V, J., & Robert B. (2008). *Biology*. (Campbell *et al.*, Ed.) (8 th). San Fransisco: Pearson Education, [nc.,publishingasPearson BenjaminCummings,.
- Matheson, T. (2002). Invertebrate Nervous Systems. *Encyclopedia of Life Science*, 1–6.
- Randall, D, Burggren, French, K. (1997). *Eckert Animal Physiology: Mechanism and Adaptation*. New York: W. H. Freeman and Company.
- Rastogi, S. (2007). *Essentials of Animal Physiology* (Fourth Edi). New Delhi: New Age International (P) Ltd.
- Rizzo, D. (2016). *Fundamentals of Anatomy and Physiology* (Fourth Edi). Boston, USA: Cengage Learning.
- Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, P. (2013). *Animal Physiology From Genes to Organisms* (Second Edi). USA: Yolanda Cossio.



- Squire, L., Betg, D., Bloom, F., Du Lac, S., Ghosh, A., Spitzer, N. (2008). *Fundamental neuroscience* (Third Edit). New York: Elsevier.
- Willmer, P, Stone, G, Johnston, I. (2005). *Environmental Physiology of Animals* (Second Edi). USA: Blackwell Publishing company BLACKWELL.

IAIN Batusangkar



IAIN Batusangkar

IV

BAB

RESEPTOR DAN EFEKTOR

Pada Bab IV ini pembelajar diharapkan mampu memahami tentang pengertian reseptor, klasifikasi atau tipe reseptor, mekanisme kerja reseptor (mekanoreseptor, kemoreseptor, fotoreseptor), efektor, jenis efektor dan mekanisme kerja efektor (otot).

Hewan sebagai makhluk hidup harus mempunyai kemampuan menanggapi rangsang atau stimulus. Stimulus merupakan informasi yang dapat diterima hewan. Informasi tersebut bisa berasal dari lingkungan luar maupun dari dalam tubuhnya. Stimulus yang berasal dari lingkungan eksternal hewan dapat berupa salinitas, temperatur, kelembaban, cahaya dan lain-lain. Adapun stimulus yang berasal dari dalam tubuh hewan dapat berupa pH darah, gula darah, kadar kalsium darah dan lain-lain. Untuk dapat menerima stimulus dan menghasilkan tanggapan atau respons yang baik, hewan harus memiliki alat untuk menerima stimulus dan untuk menghasilkan tanggapan terhadap stimulus yang datang. Alat penerima rangsangan/stimulus disebut reseptor, sedangkan alat penghasil tanggapan dinamakan efektor.

A. RESEPTOR

Informasi dihantarkan melalui sistem saraf dalam bentuk potensial aksi (impuls saraf), yang bersifat *all or none*. Potensial aksi yang mencapai otak melalui neuron sensoris disebut sensasi. Pada saat otak mengetahui adanya sensasi, otak menerjemahkannya, sehingga memberikan kita persepsi terhadap stimulus terse-

but. Persepsi seperti warna, bau, suara dan cita rasa merupakan konstruksi bentukan otak. Dengan demikian, apabila ada sebuah pohon tumbang dan tidak ada yang mendengarnya, apakah ada suara? Tumbangnya pohon tersebut memberikan tekanan di udara, tetapi jika suara didefinisikan sebagai persepsi, maka tidak ada suara, kecuali ada reseptor sensoris mendeteksi gelombang tersebut dan otak memersepsikannya. Sensasi dan persepsi yang dikembangkan di otak, diawali dari resepsi sensoris, yaitu deteksi energi suatu stimulus oleh sel-sel sensoris. Sebagian besar reseptor sensoris adalah neuron atau sel-sel epitel yang terspesialisasi di dalam organ sensoris seperti mata dan telinga.

Informasi mengenai keadaan lingkungan yang dapat diterima hewan sangat beragam, antara lain suhu, cahaya, kelembaban dan tekanan udara. Untuk itu alat penerima rangsangan (reseptor) yang dimiliki hewan harus beraneka ragam juga. Berarti, reseptor pada hewan harus dapat berfungsi untuk menerima berbagai jenis informasi. Reseptor bekerja secara khusus. Artinya reseptor tertentu hanya menerima rangsang jenis tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa dalam satu individu hewan dapat ditemukan berbagai macam reseptor.

1. Jalur Penerimaan Stimulus oleh Reseptor

Hewan menerima informasi dari lingkungannya melalui reseptor (organ sensoris). Semua stimulus mempresentasikan bentuk energi. Sel reseptor mengubah energi stimulus menjadi perubahan dalam potensial membran, dan kemudian menghantarkannya ke sistem saraf. Tugas ini terdiri dari empat fungsi, yaitu transduksi sensoris, amplifikasi, transmisi dan integrasi.

Transduksi sensoris merupakan proses pengubahan energi stimulus menjadi perubahan potensial membran sel reseptor. Respons pertama sel reseptor terhadap stimulus adalah mengubah permeabilitas membrannya, sehingga menghasilkan potensial membran yang bergradasi (disebut potensial reseptor). Potensial bergradasi adalah perubahan tegangan di sepanjang membran yang sebanding dengan kekuatan stimulus.



Amplifikasi merupakan penguatan energi stimulus. Amplifikasi sinyal bisa terjadi di dalam struktur sensoris suatu organ indra, seperti ketika gelombang suara ditingkatkan 20 kali lebih kuat sebelum mencapai reseptor telinga bagian dalam. Amplifikasi juga berarti transduksi itu sendiri. Suatu potensial aksi yang diantarkan dari mata ke otak mempunyai energi sekitar 100.000 kali energi beberapa foton cahaya aksi yang memicunya.

Transmisi merupakan penghantaran impuls ke sistem saraf pusat (pada saat energi stimulus ditransduksikan menjadi potensial reseptor). Contohnya pada kasus “sel rasa sakit”, reseptor itu sendiri sebenarnya adalah neuron sensoris yang menghantarkan potensial aksi ke sistem saraf pusat. Reseptor lain adalah sel-sel terpisah yang harus menghantarkan sinyal kimiawi (neurotransmitter) melewati sinapsis ke neuron sensoris. Jika reseptor itu juga berfungsi sebagai neuron sensoris, intensitas potensial reseptor memengaruhi frekuensi potensial aksi yang merambat sebagai sensasi ke sistem saraf pusat. Bagi sel-sel reseptor yang terpisah, kekuatan stimulus dan potensial reseptor memengaruhi jumlah neurotransmitter yang dilepaskan oleh reseptor tersebut pada pertemuan antara sinapsis dan neuron sensoris, yang selanjutnya menentukan frekuensi potensial aksi yang dibangkitkan oleh neuron sensoris. Dengan demikian, suatu stimulus tidak menghidupkan atau mematikan produksi potensial aksi, tetapi memodulasi frekuensinya.

Integrasi merupakan pengolah informasi, yang dilakukan setelah informasi pertama diterima. Sinyal dari reseptor diintegrasikan melalui sumasi atau penjumlahan potensial yang bergradasi, seperti yang terjadi pada sistem saraf. Aspek penting integrasi adalah adaptasi sensoris, yaitu suatu penurunan responsivitas yang terjadi selama stimulasi berlangsung. Tanpa adaptasi sensoris, kita merasakan setiap denyut jantung kita dan setiap sentuhan pakaian pada tubuh Anda. Reseptor bersifat selektif dalam hal informasi yang dikirimkannya ke sistem saraf pusat, dan adaptasi mengurangi kemungkinan penghantaran stimulus yang berkesinambungan. Aspek penting integrasi lainnya adalah sensitivitas reseptor. Nilai ambang transduksi oleh sel-sel reseptor bervariasi. Sebagai



contoh, nilai ambang untuk reseptor glukosa pada mulut manusia dapat bervariasi lebih dari beberapa kali lipat konsentrasi glukosa karena berubahnya kondisi umum nutrisi dan jumlah gula dalam makanan.

2. Klasifikasi atau Tipe-tipe Reseptor

Berdasarkan lokasi sumber stimulus yang dapat diterimanya, reseptor dibedakan menjadi dua, yaitu intero reseptor dan eksteroreseptor. Intero reseptor berfungsi untuk menerima rangsang dari dalam tubuh hewan, seperti kemoreseptor untuk memantau pH darah, gula darah dan lain-lain. Eksteroreseptor berfungsi menerima rangsang dari lingkungan di luar tubuh hewan, contohnya reseptor cahaya (mata) dan reseptor penerima gelombang suara (telinga).

Berdasarkan jenis energi yang dideteksi (yang ditransduksikan), reseptor dibedakan menjadi enam, yaitu, mekanoreseptor, kemoreseptor, fotoreseptor, reseptor rasa sakit, termoreseptor, dan reseptor elektromagnetik.

a. Mekanoreseptor

Mekanoreseptur terdapat pada kulit yaitu sel rambut, organ keseimbangan, dan telinga manusia yang berperan sebagai indra atau sensasi sentuhan. Mekanoreseptor dirangsang oleh stimulus berupa tekanan, sentuhan, regangan, pergerakan dan suara serta semua bentuk energi mekanik. Peregangan membran plasma sebuah sel mekanoreseptor meningkatkan permeabilitas terhadap ion natrium maupun kalium, yang menyebabkan depolarisasi. Indra atau sensasi sentuhan pada manusia mengandalkan mekanoreseptor yang sesungguhnya merupakan dendrit neuron sensori yang sudah dimodifikasi

Proses penerimaan rangsang mekanik oleh mekanoreseptor disebut dengan mekanoresepsi. Mekanoresepsi dapat terjadi pada invertebrata dan vertebrata. Jenis mekanoreseptor juga bervariasi. Insekta mempunyai mekanoreseptor pada permukaan tubuhnya, yang bisa memberikan informasi arah angin, orientasi tubuh dan lain-lain. Pada vertebrata, mekanoreseptor bukan hanya meneri-



ma rangsang berupa tekanan/sentuhan, tetapi juga bisa memantau panjang otot, bahkan juga berfungsi sebagai alat pendengaran dan organ keseimbangan (misalnya struktur di bagian dalam telinga).

Mekanisme sederhana mekanoresepsi adalah: (1) Saat sel dalam keadaan istirahat, pintu ion Na^+ pada membran mekanoreseptor masih dalam keadaan tertutup; (2) Rangsang mekanik yang menekan reseptor menyebabkan membran mekanoreseptor meregang (permiabilitas membran berubah); (3) Peregangan membran mekanoreseptor menyebabkan perubahan konformasi protein penyusun pintu ion Na^+ ; (4) terjadi depolarisasi mekanoreseptor.

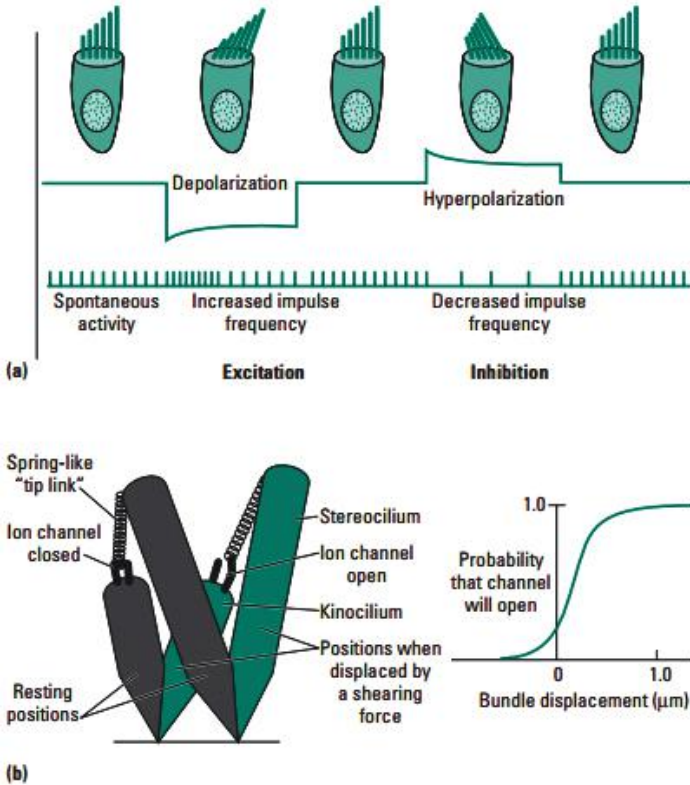
1). Sel Rambut

Sel rambut vertebrata sangat sensitif. Contohnya pada sistem garis lateral ikan dan amfibi, organ pendengaran dan keseimbangan vertebrata. Sel rambut sensitif terhadap perubahan stereosilia. Bila stereosilia condong ke arah *kinocillum*, maka terjadi depolarisasi sel rambut. Apabila berlawanan, maka terjadi hiperpolarisasi. Potensial reseptor sel rambut mengatur pembebasan neurotransmitter. Potensial reseptor sel rambut mengatur secara spontan pembebasan neurotransmitter dari ujung basalnya. Kecepatan pembebasan neurotransmitter, selanjutnya menentukan frekuensi pembangkitan akson sensor di mana sel-sel rambut bersinapsis kimia.

Kecepatan pembebasan transmitter tergantung kepada arah stereosilia condong dan selanjutnya kecepatan pembangkitan akson diatur di bawah atau di atas suatu frekuensi spontan yang berhubungan dengan perubahan posisi nol (posisi tegak). Pada respons sel rambut tampak bahwa hubungan antara input dan outputnya tidak simetri. Perubahan potensial yang dihasilkan oleh perubahan posisi stereosilia ke arah *kinocilium* (depolarisasi) lebih besar daripada yang dihasilkan oleh perubahan posisi stereosilia ke arah berlawanan (hiperpolarisasi). Keadaan yang asimetri ini penting sebab sel rambut yang dikenai getaran, potensial reseptor dapat dengan tepat “mengikuti” fase-fase pilihan stimulus yang hanya meningkatkan frekuensi beberapa ratus Hertz (Hz). Pada frekuensi yang lebih tinggi, respons terhadap getaran menyatu ke dalam suatu depolarisasi yang mantap. Depolarisasi yang mantap akan meng-

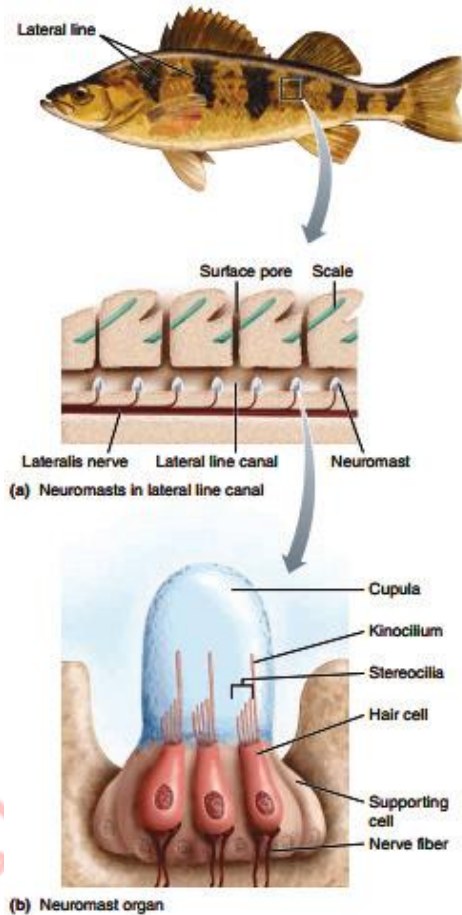


hasilkan pembebasan transmitter oleh sel rambut dan selanjutnya frekuensi yang tinggi membangkitkan saraf eferen.



GAMBAR 4.1. Mekanisme kerja mekanoreseptor. (a). Struktur dasar mekanoreseptor; (b). Model mekanisme kerja mekanoreseptor pada silia (Willmer, P, Stone, G, Johnston, 2005: 270).





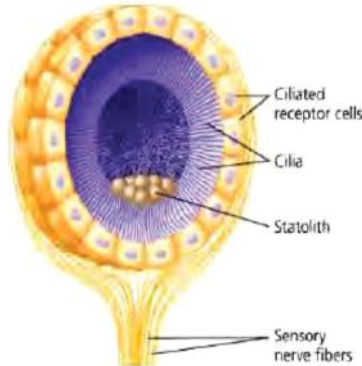
GAMBAR 4.2. Sel rambut dalam organ garis lateral pada ikan (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 219).

2). Organ-organ Keseimbangan

Organ keseimbangan yang sangat sensitif terhadap gravitasi dan percepatan adalah *statosit*. Organ ini ditemukan mulai dari ubur-ubur sampai vertebrata. Insekta tidak memiliki organ ini. Organ ini terdiri dari rongga yang ber dinding sel-sel mekanoreseptor yang umumnya bersilia dan bersentuhan dengan *statolith* (butir-



butir pasir, kalsium dan lain-lain). Bila seekor udang misalnya miring ke satu sisi, statolit menstimulus sel-sel reseptor statosit pada sisi tersebut, menyebabkan transmiter dibebaskan ke serabut sensori dari sel-sel reseptor yang distimulus. Pengaktifan sensori yang dihasilkan pada udang yang sedang miring menghasilkan gerak refleks dari apendik-apendiknya.

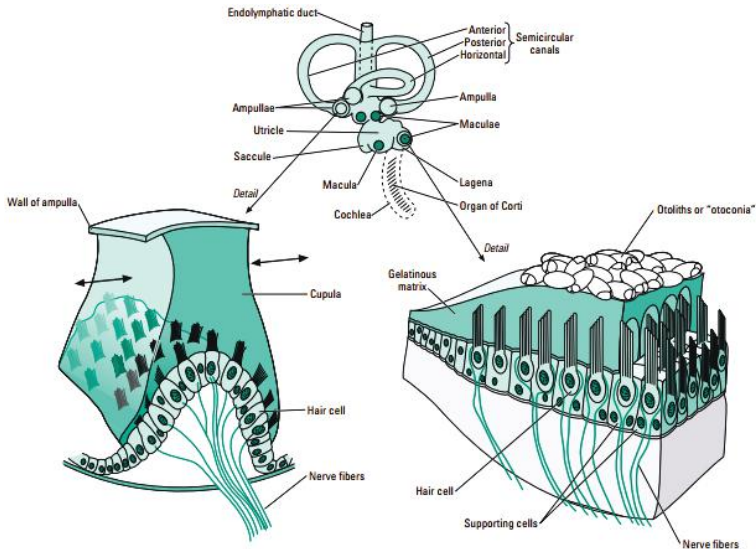


GAMBAR 4.3. Statosit invertebrata (Champbell *et al.*, 2008).

Organ-organ keseimbangan vertebrata berada di dalam labirin membranosa yang tumbuh dari ujung anterior dari sistem garis lateral. Organ tersebut terdiri dari sakulus dan utrikulus. Utrikulus memiliki tiga saluran setengah lingkaran dari telinga dalam yang terletak pada tiga bidang yang saling tegak lurus satu dengan yang lainnya. Pada pangkal ketiga saluran setengah lingkaran terdapat alat keseimbangan yang disebut dengan *krista*. Fungsinya adalah mendeteksi perubahan-perubahan kecepatan rotasi atau translasi kepala. Bila kepala digerakkan pada salah satu bidang tersebut, inersia cairan endolimfa dalam saluran setengah lingkaran menggerakkan *kupula* suatu proyeksi bergelatin. Gerak kupula menstimulus sel-sel rambut pada dasar *kupula*. Sel-sel rambut semua diorientasikan dengan *kinocilium* pada sisi yang sama. Di bawah saluran setengah lingkaran, terdapat *macula* (ruang yang besar dari tulang yang mengandung tiga kelompok sel-sel rambut yang lebih rapat). Di atas makula-makula melekat terdapat *oto-*



lith. Fungsi *otolith* sangat mirip dengan statolith pada invertebrata, tetapi *otolith* tidak berperan dalam mengenali percepatan yang ditimbulkan oleh inersia endolimfa. *Otolith* memberitahukan posisi relatif terhadap arah gravitasi, dan pada vertebrata tingkat rendah juga digunakan untuk mengenali getaran seperti gelombang suara.



GAMBAR 4.4. *Otolith* pada vestibular (telinga dalam) vertebrata yang berperan dalam penentuan posisi pergerakan (Willmer, P, Stone, G, Johnston, 2005: 271).

3). Telinga Mamalia

Sel-sel rambut telinga mamalia terletak pada organ korti dalam koklea (rumah siput). Sel-sel tersebut mirip sel-sel rambut dari sistem garis lateral vertebrata yang lebih rendah, tetapi pada hewan dewasa kinosoliumnya hilang. Kebanyakan struktur telinga membantu transformasi gelombang suara ke organ korti, yang akan menstimulus sel-sel rambut, yang selanjutnya akan mengaktifkan akson sensori saraf pendengaran. Koklea sebenarnya hanya dimiliki oleh mamalia, sedangkan burung dan buaya memiliki saluran koklea agak lurus yang mengandung beberapa bagian yang sama dengan koklea mamalia. Vertebrata yang lain tidak memiliki



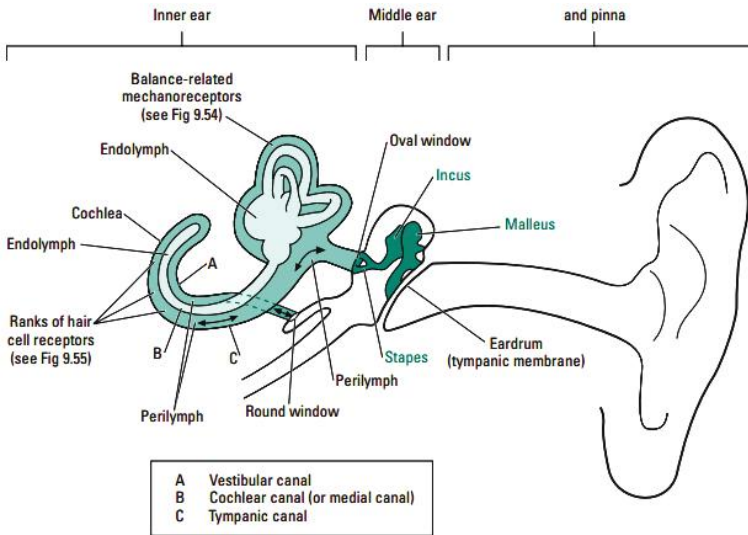
saluran koklea. Pengenalan gelombang suara pada beberapa vertebrata yang lebih rendah dilakukan oleh sel-sel rambut yang berhubungan dengan *otolith* dari utrikulus dan sakulus, dan dengan *lagna* (salah satu dari tiga makula).

Saluran koklea terbagi tiga saluran: skala timpani, skala vestibuli, dan skala media. Antara skala timpani dan skala vestibuli dihubungkan oleh helikotrema (suatu lubang yang terletak pada ujung koklea). Kedua skala ini berisi cairan perilimfa. Skala yang media yang dibatasi oleh membran basilar dan membran Reissner berisi endolimfa. Organ korti yang memiliki sel-sel rambut tertanam pada membran basilar dan ujung berambutnya muncul ke dalam skala media.

Mekanisme penyampaian suara oleh reseptor suara ke otak pada manusia adalah sebagai berikut: (1). Getaran udara berupa suara yang menimpa membran timpani menyebabkan terjadinya vibrasi pada membran timpani dengan frekuensi yang sama dengan suara; (2). Ketiga tulang telinga bagian tengah memperbesar dan menghantarkan gerakan mekanis ke jendela oval (membran pada permukaan koklea); (3). Vibrasi pada jendela oval menyebabkan jendela oval menghasilkan gelombang tekanan dalam cairan di dalam koklea; (4). Koklea mentransduksikan energi dari cairan yang bervibrasi itu menjadi potensial aksi; (5). Sangguardi yang menggetarkan jendela oval menghasilkan suatu gelombang tekanan yang merambat dan menjalar dalam cairan koklea yang melewati saluran vestibular. Gelombang ini terus merambat dan melewati membran timpani, dan menghilang ketika menumbuk jendela bundar; (6) Gelombang tekanan dalam saluran vestibuler mendorong ke bawah pada duktus koklea dan membran basilar; (7). Membran basilar bervibrasi ke atas dan ke bawah sebagai respons terhadap gelombang tekanan, dan sel rambutnya secara bergantian menggosok membran tektorial dan ditarik kembali dari membran tersebut; (8). Defleksi rambut akan membuka saluran ion pada membran plasma sel rambut, dan ion positif (K^+) akan masuk; (9). Depolarisasi menyebabkan peningkatan pembebasan neurotransmitter dari sel-sel rambut dan frekuensi potensial aksi da-



lam neuron sensoris yang bersinapsis dengan sel-sel rambut; (10). Neuron ini membawa sensasi ke otak melalui saraf pendengaran.



GAMBAR 4.5. Struktur telinga manusia dan bagian-bagiannya (Willmer, P, Stone, G, Johnston, 2005: 274).

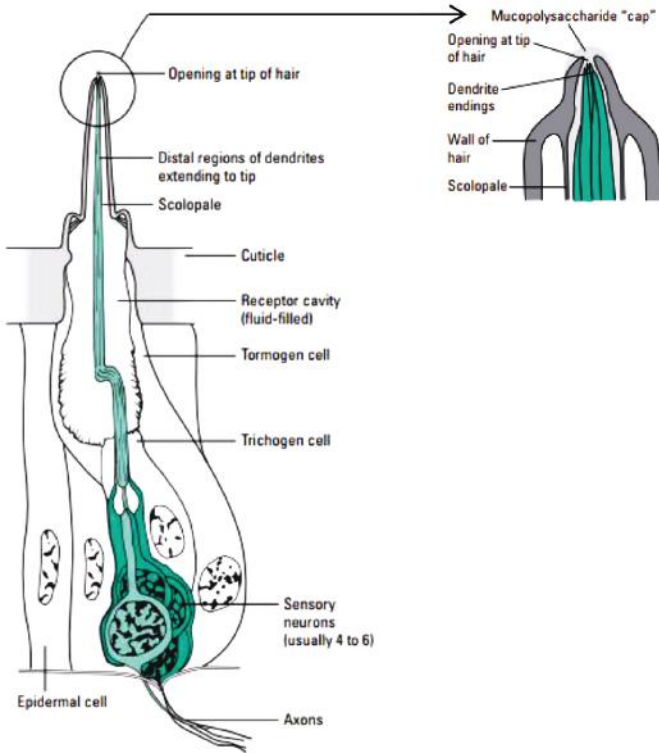
b. Kemoreseptor

Banyak hewan menggunakan indranya untuk menemukan pasangan kawin, mengenali daerah teritorial yang ditandai dengan zat-zat kimia dan membantu penjelajahan selama migrasi. “Percakapan” kimiawi sangat penting, khususnya pada serangga sosial seperti lebah dan semut. Pada semua hewan pengecapan (gustasi) dan penciuman (olfaksi) sangat penting dalam perilaku pencarian dan pengambilan makanan. Pada ular dan kadal ditemukan organ jacobson yang berfungsi sebagai alat pembau yang terletak pada tonjolan kecil di rongga hidungnya.

Pada insekta, kemoreseptor terdapat pada bagian mulut, antena, dan kaki. Pada umumnya kemoreseptor ini berupa rambut atau duri sensoris yang kaku, ukuran panjangnya dapat mencapai beberapa milimeter, dan ujungnya terbuka ke lingkungan luar. Ram-



but sensoris insekta memiliki lima buah neuron pada bagian dasar, yang berfungsi sebagai kemoreseptor, yaitu 1 reseptor untuk gula, 1 untuk air, serta 1 atau 2 untuk garam dan senyawa lainnya. Di antara kemoreseptor tersebut juga ditemukan mekanoreseptor (reseptor taktil). Pada antena insekta sering ditemukan sel pembau. Pada ular dan kadal ditemukan organ jacobson yang berfungsi sebagai alat pembau yang terletak pada tonjolan kecil di rongga hidungnya.



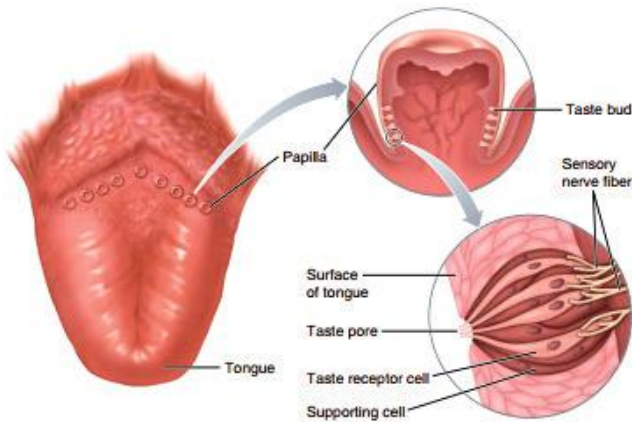
GAMBAR 4.6. Kemoreseptor pada serangga

Pada manusia dan mamalia lain, indra pengecap dan penciuman secara fungsional mirip dan saling berkaitan. Suatu molekul kecil harus terlarut di dalam cairan untuk mencapai sel reseptor dan memicu sensasi. Molekul tersebut berikatan dengan protein



spesifik pada membran sel reseptor, yang memicu depolarisasi membran dan membebaskan neurotransmitter.

Sel-sel reseptor pengecapan adalah sel epitel yang termodifikasi menjadi kuncup pengecapan (*taste bud*) yang terdapat pada bagian tertentu pada lidah dan mulut. Ada empat persepsi pengecapan dasar pada lidah yaitu manis, asam, asin dan pahit.



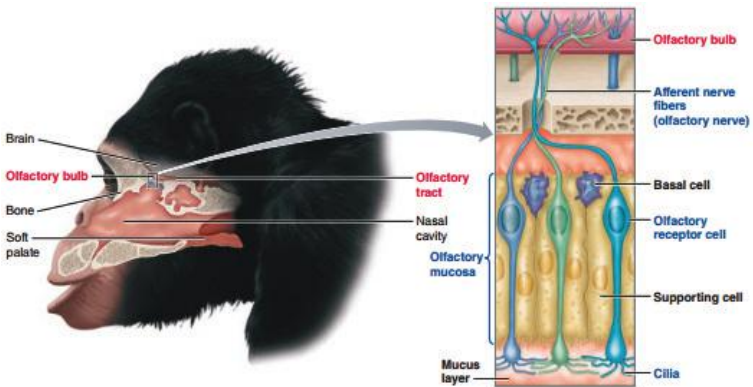
GAMBAR 4.7. Sel reseptor pengecapan pada lidah (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 234).

Ketika ada molekul gula, maka gula berikatan dengan protein reseptor khusus pada sel reseptor sensoris. Ikatan molekul gula dengan protein khusus ini akan menginisiasi sinyal transduksi protein G dan fosfolipase C. Aktivitas fosfolipase C akan mengaktifkan IR 3 (*messenger* kedua) yang menyebabkan *channel* kalsium di retikulumendoplasma (ER) membuka, sehingga Ca^{2+} masuk ke sitosol. IR3 dan Ca^{2+} menyebabkan *channel* Na^{+} terbuka dan Na^{+} masuk ke sel reseptor pengecap dan terjadi depolarisasi. Depolarisasi akan membangkitkan potensial aksi menuju otak melalui saraf pengecapan.

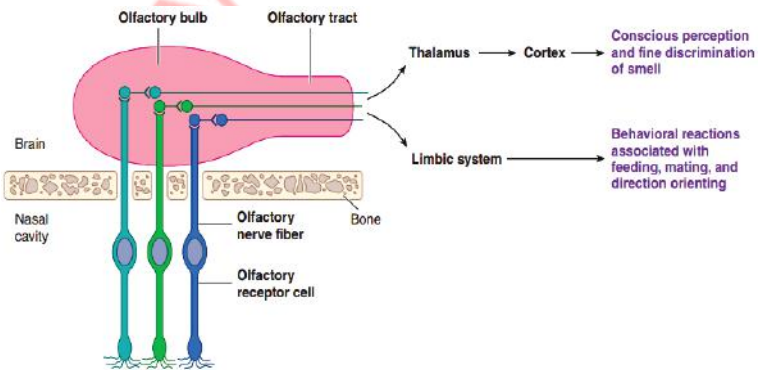
Indra olfaktorik (penciuman) mamalia mendeteksi zat kimia tertentu yang ada di udara. Sel reseptor olfaktorik adalah neuron yang melapisi bagian atas rongga hidung dan mengirimkan impuls langsung ke bola olfaktorik otak. Ujung sel-sel reseptif mengandung silia yang memanjang ke dalam lapisan mukus yang melapisi



rongga hidung. Ketika suatu zat bau berdifusi ke dalam daerah ini, zat ini berikatan dengan molekul protein spesifik pada membran plasma silia olfaktori. Pengikatan ini memicu jalur transduksi sinyal yang melibatkan protein G dan enzim efektor adenilat siklase dan *messenger* kedua siklik AMP. *Messenger* kedua ini menyebabkan *channel* Na^+ terbuka dan Na^+ masuk ke sel reseptor olfaktoris dan terjadi depolarisasi. Depolarisasi akan membangkitkan potensial aksi menuju otak.



GAMBAR 4.8. Sel reseptor bau (olfaktori) pada mamalia (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 234).



GAMBAR 4.9. Mekanisme kerja sel reseptor bau (olfaktori) pada mamalia (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 238).



c. Fotoreseptor

Hampir semua hewan dapat mendeteksi cahaya, bahkan pada hewan yang tidak mempunyai struktur fotoreseptor, seperti amuba. Struktur fotoreseptor bervariasi tetapi bekerja berdasarkan prinsip yang sama. Perbedaan cara kerja fotoreseptor terdapat pada jenis rangsangan yang diterimanya. Struktur fotoreseptor yang paling sederhana ditemukan pada euglena, yaitu berupa *eye-spot* (daerah sitoplasma yang peka terhadap cahaya).

Pada vertebrata, sel fotoreseptor mempunyai banyak lipatan dan mengandung pigmen berupa rodopsin. Rhodopsin berubah apabila ada cahaya mengenai sel tersebut. Perubahan awal tersebut menyebabkan perubahan selanjutnya yang membawa sel ke keadaan terpolarisasi.

Pada cacing pipih, fotoreseptor terdapat pada sepasang mata yang berbentuk mangkuk. Pada insekta, fotoreseptor berupa mata majemuk. Vertebrata dan *Mollusca* jenis *Chepalopoda* mempunyai mata fesikular yang dilengkapai retina. Burung dan mamalia mempunyai lensa mata yang khas yang dapat berubah bentuk (berakomodasi) sehingga bayangan benda dapat terfokus ke retina.

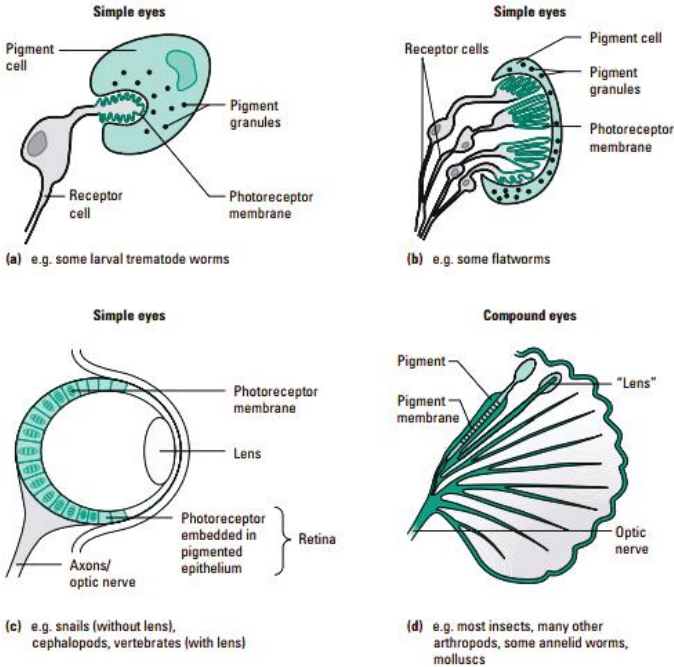
Vertebrata, mamalia dan burung mempunyai sel fotoreseptor berbentuk kerucut dan batang. Sel-sel ini tersebar tidak merata pada retina. *Povea* atau area sentral ($\pm 1 \text{ mm}^2$) merupakan bagian sentral retina yang memiliki kepekaan sangat tinggi terhadap cahaya. Sel kerucut bertanggung jawab pada penglihatan warna dan sel batang dikhususkan untuk penglihatan akromatik.

Vertebrata mempunyai mata berlensa tunggal. Lensa mata vertebrata memfokuskan citra cahaya pada retina. Sel batang atau sel kerucut pada retina mempunyai segmen luar tempat pigmen penglihatan terbungkus. Molekul pigmen penyerap cahaya (retinal; turunan vitamin A) yang terikat pada satu protein membran yang disebut opsin. Opsin bervariasi pada sel fotoreseptor dan kemampuan retinal untuk menyerap cahaya dipengaruhi oleh opsinya.

Sel batang mengandung jenis opsinya sendiri yang bergabung dengan retinal untuk menyusun pigmen rhodopsin. Ketika rhodopsin menyerap cahaya, komponen retina berubah bentuk yang



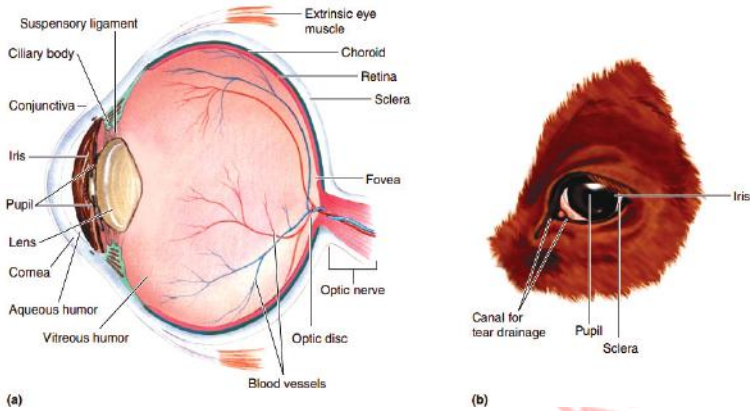
menyebabkan perubahan komformasi pada pasangan opsinya. Molekul obsin yang telah berubah tersebut mengaktifkan molekul penghantar dalam jalur transduksi sinyal, yaitu protein G (disebut transdusin). Transdusin akan mengaktifkan suatu enzim efektor, yaitu guanosin monofosfat siklik (cGMP) (*messenger* kedua) pada sel batang.



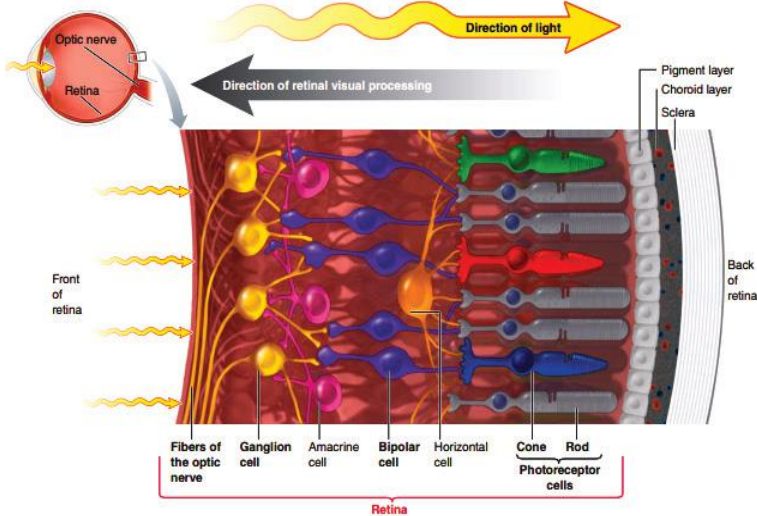
GAMBAR 4.10. Tipe mata beberapa hewan (a) mata trematoda; (b) mata cacing pipih; (c) mata siput; dan (d) mata majemuk pada serangga. (Willmer, P, Stone, G, Johnston, 2005: 281).

Pada keadaan gelap, rhodopsin tidak aktif, cGMP terikat pada *channel* ion Na^+ di membran sel batang dan mempertahankan agar *channel* tersebut tetap terbuka. Pada saat ini membran sel batang terdepolarisasi dan membebaskan suatu neurotransmitter inhibitoris pada sinapsisnya dengan neuron lain pada retina. Neurotransmitter menghambat depolarisasi membran neuron (mencegah potensial





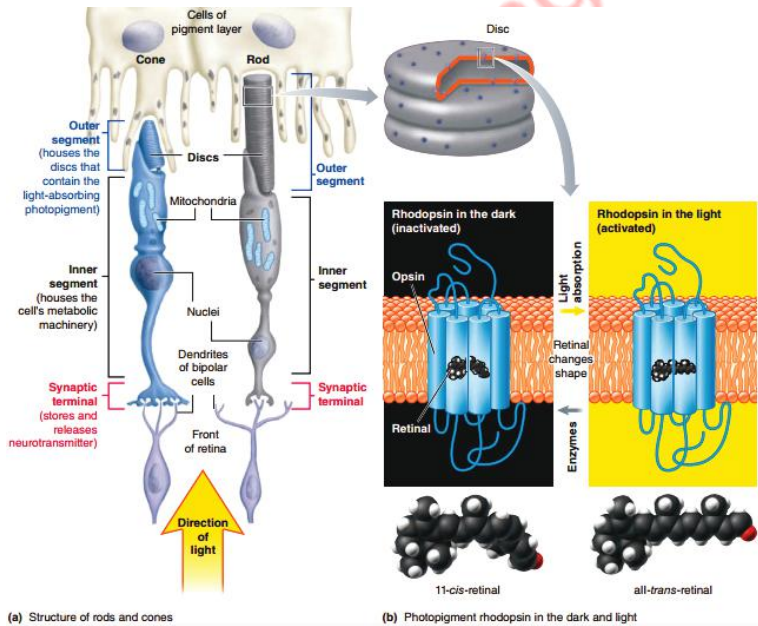
GAMBAR 4.11. Struktur mata vertebrata



GAMBAR 4.12. Retina vertebrata. Fofoteseptor yang disebut sel batang (*rod*) sangat sensitif terhadap cahaya dan berfungsi untuk penglihatan hitam dan putih pada malam hari. Sel kerucut (*cone*) bertugas dalam penglihatan warna pada siang hari. Pigmen rhodopsin terbungkus dalam membran berlipat yang tersusun atas tumpukan cakram pada segmen bagian luar sel kerucut dan sel batang (Chambell *et al.*, 2008).

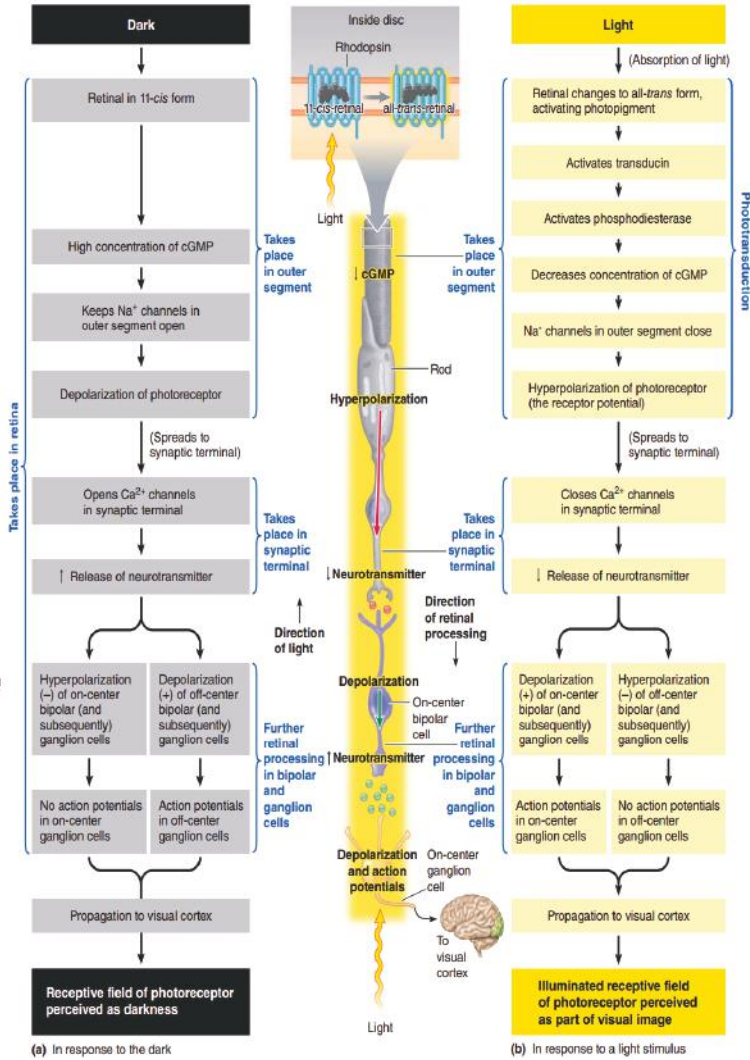


aksi). Pada keadaan ada cahaya, akan terjadi perubahan retinal dan memicu transduksi sinyal rhodopsin, enzim efektor mengubah cGMP menjadi GMP, sehingga membuatnya terlepas dari *channel* Na⁺ dan akan menutup *channel* Na⁺ dan menurunkan permeabilitas membran terhadap Na⁺ serta mengubah potensial membran (hiperpolarisasi). Sesungguhnya hiperpolarisasi memperlambat pembebasan neurotransmitter inhibitori oleh sel-sel batang. Dengan demikian, transduksi energi cahaya menjadi potensial reseptor menyebabkan suatu “penurunan” sinyal kimiawi ke sel yang mempunyai hubungan sinapsis dengan sel batang, dan penurunan tersebut merupakan pesan bahwa sel batang telah terangsang oleh cahaya. Pada keadaan gelap, enzim mengubah retinal kembali ke bentuk semula dan akan bergabung dengan opsin membentuk rhodopsin.



GAMBAR 4.13. Fotoreseptor pada retina vertebrata. (a) struk sel batang dan sel kerucut; (b) Fotopigmen rodopsin pada waktu gelap dan terang (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 248).





GAMBAR 4.14. Proses transduksi cahaya pada mata vertebrata (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 249).



d. Termoreseptor

Termoreseptor yang merespons panas atau dingin membantu mengatur suhu tubuh. Tempat terdapatnya termoreseptor bervariasi. Pada mamalia terdapat di kulit dan hipotalamus, yang memantau suhu tubuh bagian perifer dan pusat tubuh. Pada insekta, termoreseptor terdapat pada antena dan kaki. Ikan memiliki termoreseptor di kulit. Ular berbisa (*Crotalidae*), termoreseptornya berada di celah pada mukanya dan ular boa pada bibirnya (Kay, 1998: 40). Mekanisme bagaimana perubahan suhu mengubah output reseptor belum dipahami sepenuhnya.

e. Reseptor Rasa Sakit

Reseptor rasa sakit pada manusia adalah kelompok dendrit telanjang pada epidermis kulit yang disebut dengan **nosiseptor**. Sebagian besar hewan kemungkinan mengalami rasa sakit. Rasa sakit merupakan sensasi yang penting, karena stimulus diterjemahkan menjadi reaksi negatif, seperti penarikan diri dari bahaya.

f. Elektreseptor

Elektreseptor mendeteksi berbagai bentuk energi elektromagnetik seperti listrik, magnetik dan cahaya tampak. Alat penerima rangsang berupa medan elektrik yang disebut elektreseptor. Elektreseptor sudah banyak dipelajari pada reseptor yang terdapat pada gurat sisi dan ampula ikan hiu dan pari. Elektreseptor ikan hiu kecil bisa mendeteksi medan elektrik yang lemah (10 mV per cm²).

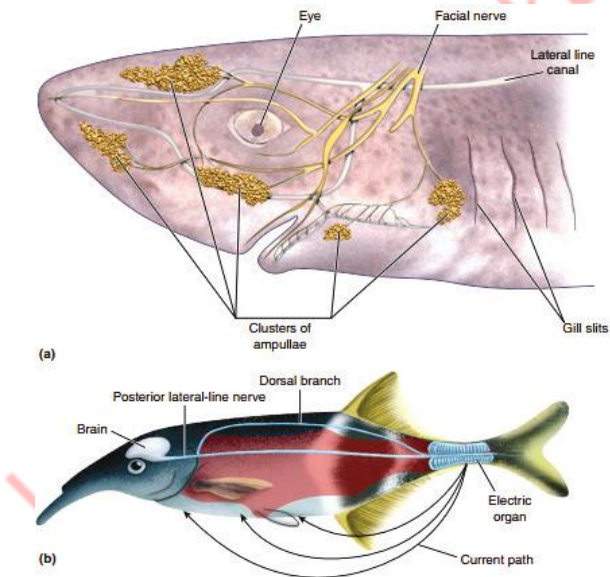
Medan listrik yang dihasilkan oleh suatu individu timbul dari organ listrik atau organ elektrik. Organ elektrik ini kebanyakan dimiliki oleh hewan akuatik terutama ikan (ikan listrik/elektrik). Ikan tersebut dapat menghasilkan listrik secara terus-menerus. Apabila berdekatan dengan ikan lain yang juga mengeluarkan medan listrik, keduanya dapat saling merasakan gangguan pada medan listrik yang dihasilkan masing-masing. Gangguan pada medan elektrik ini dideteksi oleh elektreseptor.

Beberapa jenis hewan memiliki kemampuan untuk berorientasi terhadap medan magnetik bumi. Kemampuan ini bermanfaat da-



lam navigasi yang memungkinkan hewan mengenali sumbu utara selatan. Contoh hewan yang mempunyai kemampuan ini adalah lebah madu. Ketika terbang dari sarangnya dan menemukan sumber makanan baru, lebah menyampaikan informasi tentang arah sumber makanan tersebut kepada lebah lainnya dengan menunjukkan tarian tertentu, dengan membentuk sudut tertentu antara sumber makanan dan matahari. Contoh hewan lainnya adalah burung.

Mekanisme yang menyebabkan hewan dapat menerima rangsang medan magnet sama sekali belum diketahui. Namun telah diketahui bahwa di dalam tubuh beberapa jenis hiu, lebah madu dan burung terkandung substansi magnetik, yang disebut *magnetit*.



GAMBAR 4.15. Elektroreseptor pada ikan (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 249)

B. EFEKTOR

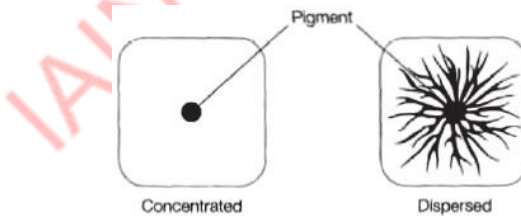
Respons atau tanggapan organisme terhadap stimulus dari lingkungan luar adalah melalui sistem yang melibatkan khusus yang terdiri dari sel atau kumpulan sel. Kumpulan sel atau organ peng-



hasil tanggapan ini disebut dengan organ efektor. Tanggapan yang dihasilkan oleh efektor sangat bervariasi mulai dari tanggapan yang dapat jelas dilihat mata, seperti gerakan tubuh yang dihasilkan jaringan otot, sampai kepada gerakan yang tidak bisa dilihat mata seperti perubahan beberapa aspek metabolisme akibat kerja hormon. Contoh organ efektor adalah otot, silia, flagela, *pseudopodia*, organ elektrik, organ luminesen dan kromatofor.

1. Kromatofor

Beberapa jenis hewan mempunyai kemampuan untuk menghasilkan tanggapan berupa perubahan warna kulit, misalnya cumi-cumi, oktopus, ikan *flounder*, bunglon, katak dan ular. Perubahan ini dilakukan untuk menyamar atau berkomunikasi dengan hewan lainnya. Perubahan warna terjadi karena hewan memiliki kromatofor (sel yang mengandung pigmen). Di bawah kendali hormon, kromatofor dapat mengubah penyebaran pigmen pada sel pigmen dalam ukuran menit atau detik. Mekanisme perubahan warna pada cumi-cumi dan oktopus, kromatofor terikat sel otot. Jika otot berkontraksi, kromatofor meluas dan pigmen tersebar, sehingga kulit tampak lebih gelap dan saat berelaksasi, kromatofor mengerut dan pigmen di dalamnya terkumpul sehingga kulit tampak berwarna lebih terang.



GAMBAR 4.16. Respons penyebaran kromatofor

2. Pergerakan Intrasel

Pergerakan yang terjadi pada sel hewan pada dasarnya karena adanya rangka sel yang disebut sitoskeleton. Sitoskeleton ini berperan dalam pergerakan sel secara keseluruhan atau pergerakan



organel di dalam sel dan mempertahankan bentuk sel. Sitoskeleton terdiri dari mikrotubul yang tersusun atas tubulin, mikrofilamen yang tersusun atas aktin dan miosin dan filamen intermediet.

Pergerakan intrasel dapat diamati pada hampir semua sel, misalnya pada sel saraf (pergerakan aliran sitoplasma dan vesikel neurotransmitter). Aliran sitoplasma pada sel saraf berperan untuk membawa neurotransmitter yang disintesis di badan sel, kemudian diangkut ke ujung akson untuk menyelenggarakan transmisi sinaps. Aliran sitoplasma juga ditemukan pada amuba.

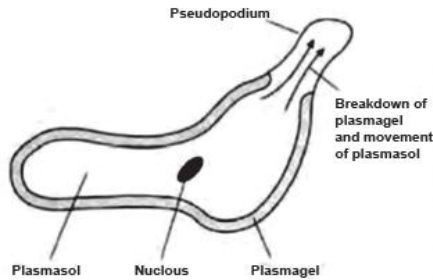
Gerakan sitoplasmik merupakan gerakan yang teratur. Pada sel saraf pergerakan berlangsung dalam dua arah, yaitu dari badan sel ke ujung akson dan sebaliknya. Pada akson, mikrotubul terbentang dari badan sel hingga ujung akson. Dalam peristiwa itu, aliran sitoplasma untuk mengangkut neurotransmitter dari badan sel ke ujung akson disebut transpor anterograde. Kecepatan aliran ini 40 cm per hari. Sebaliknya aliran sitoplasmik dari ujung akson ke badan sel yang mengangkut berbagai bahan untuk di daur ulang, disebut aliran retrograde (kecepatannya hanya 8 cm per hari).

3. Pergerakan Amuboid/Pseudopodia

Pergerakan amuboid merupakan pergerakan khas bagi hewan uniseluler (amuba) dan hewan multiseluler. Pada hewan multiseluler gerak amuboid terjadi pada sel darah putih yang meninggalkan aliran darah dan masuk ke dalam jaringan yang mengalami radang. Gerakan amuboid pada amuba terjadi dengan pembentukan kaki semu (*pseudopodia*).

Mekanisme pembentukan pseudopodiaini tidak diketahui secara jelas, tetapi diduga berkaitan dengan fase perubahan gel-sol pada sitoplasmanya. Pada saat amuba tidak bergerak (diam), bagian perifer sitoplasma berada pada fase gel, sementara bagian tengah sitoplasma dalam fase sol. Pada saat amuba memperoleh rangsang, perifer sitoplasma berubah ke fase sol, sementara bagian lain terjadi interaksi aktin miosin sehingga bagian tersebut mengerut dan menimbulkan tekanan positif. Hal ini menyebabkan terbentuknya *pseudopodia* dan amuba pun bergerak. Apabila rangsang berupa cahaya maka amuba bergerak menjauhi rangsang.





GAMBAR 4.17. Pergerakan amuboid terjadi dengan adanya perubahan plasmagel pada satu sisi dan plasmasol pada sisi lain. Perubahan plasmasol menjadi plasmogel menyebabkan terbentuknya *pseudopodium*.

4. Otot

Pada hewan tingkat tinggi, pergerakan bagian tubuh secara keseluruhan berhubungan erat dengan kerja otot. Otot adalah jaringan yang dapat tereksitasi atau sebagai organ efektor yang dapat merespons berbagai stimulus seperti perubahan tekanan, panas, dan cahaya. Fungsi berbagai sistem seperti sistem pencernaan, reproduksi, ekskresi dan lainnya berhubungan dengan pergerakan otot-otot yang menyusunnya. Dengan demikian, otot adalah unit yang berperan penting dalam pergerakan hewan.

Otot memiliki karakter kontraktilitas, ektensibilitas, dan elastisitas. Pada tubuh vertebrata, otot terbagi atas dua tipe susunan, yaitu otot fasis dan otot tonik. Otot yang menggerakkan anggota gerak disebut dengan otot fasis. Sistem kerjanya selalu saling antagonis. Di samping itu, terdapat otot yang menggerakkan organ-organ dalam seperti jantung, kantung urin, saluran pencernaan dan dinding tubuh yang disebut dengan otot tonik.

Secara struktural jaringan otot yang terdiri dari berkas-berkas dari sel-sel yang panjang yang dinamakan serat-serat otot. Ada 3 macam jaringan otot yaitu otot rangka (*skeletal muscles*), otot jantung (*cardiac muscles*) dan otot polos (*smooth muscles*). Ketiga tipe otot tersebut memiliki struktur yang berbeda dan mekanisme kerja yang berbeda pula terutama dalam hubungannya dengan kontrol saraf. Otot rangka melekat pada tulang dengan peranta-



raan tendon dan berfungsi untuk gerak-gerak tubuh yang volunter (berkontraksi menurut kemauan). Berkas otot rangka berwarna dengan kemasam lurik, adanya strip berwarna gelap dan terang. Dengan latihan fisik otot membesar bukan karena bertambahnya jumlah sel otot tetapi sel otot itu membesar. Contohnya semua otot rangka. Otot jantung adalah jaringan kontraktil dari jantung. Warna lurik tidak sebanyak pada otot rangka. Kontraksinya lambat tetapi berlangsung untuk periode waktu yang panjang. Ujung-ujung sel terikat erat secara bersama membentuk satu struktur yang mampu mengantarkan signal dari sel ke sel selama jantung berdetak. Otot polos diberi nama polos karena tidak ada warna lurik. Otot polos terdapat pada dinding pembuluh darah, dinding usus, dinding kandung kencing. Dapat berkontraksi dalam perioda waktu yang panjang. Otot polos dan otot jantung adalah termasuk otot involunter.

a. Komposisi Otot

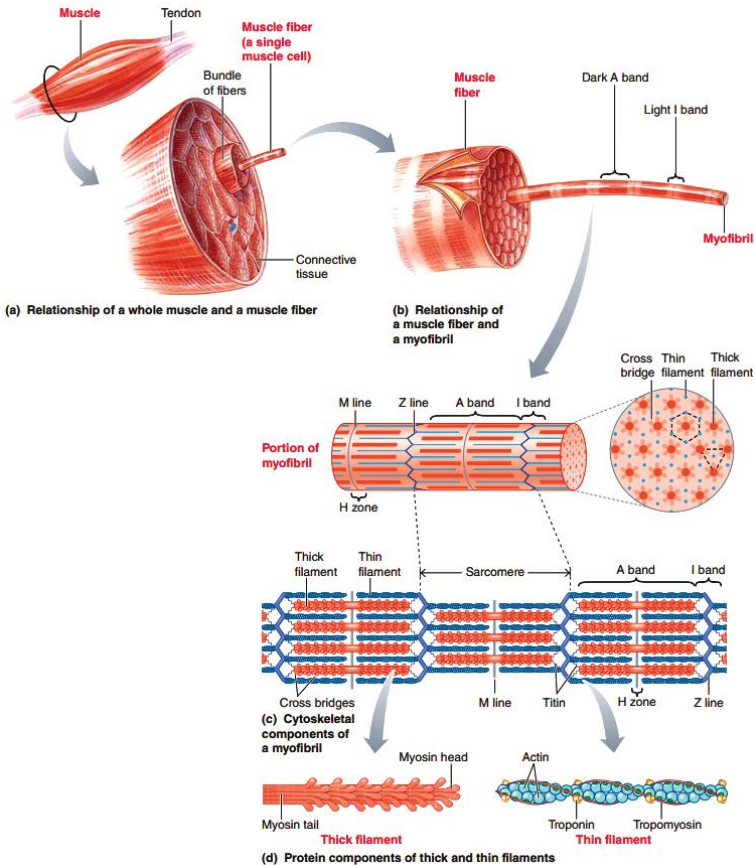
Untuk dapat memahami fungsi kerja otot, perlu diketahui komposisi-komposisi penyusunnya. Secara prinsip, otot terdiri atas air, protein, mineral dan senyawa organik lainnya. Otot mengandung air sekitar 75-80% yang berperan penting dalam kontraksi. Sejumlah besar air berada di antara serabut-serabut otot.

Komponen kontraktil otot berhubungan erat dengan keberadaan protein-protein spesifik. Semua protein pada otot berikatan dengan fibril-fibril dan tidak mudah untuk diekstraksi. Otot mengandung 20-25% protein yang larut dalam air yang merupakan fraksi miyogen. Ada berbagai tipe fraksi miyogen yang terbagi ke dalam tiga kelompok yaitu aktin yang berada di dalam *filament* tipis, miosin di dalam filamen tebal dan tropomyosin B. Di samping itu juga ditemukan protein lain dalam jumlah sedikit seperti alfa-aktinin, beta-aktinin, troponin dan protein M.

Aktin adalah protein globulin dan secara struktural melekat pada pita Z. Berat molekulnya sekitar 46.000 dan terdiri atas molekul-molekul yang sferis. Setiap unit globularnya berikatan dengan satu molekul ATP. Aktin terdiri atas dua jenis yaitu aktin globulin G dan aktin serabut F. Aktin globulin G adalah bentuk monomerik



dan dalam kondisi adanya ion Mg^{2+} akan mengalami polimerisasi membentuk dua struktur seperti dua utas tali yaitu aktin F. Aktin G dapat berikatan dengan sangat kuat dengan satu ion Ca^{2+} dan juga dengan molekul ATP atau ADP. Selama polimerisasi, molekul ATP dari aktin G dihidrolisis membentuk ADP dan pelepasan ion fosfat anorganik.



GAMBAR 4.18. Struktur otot rangka dan miofibril-miofibrilnya (Rastogi, 2007: 373).

Miosin adalah molekul yang kompleks dan asimetris dengan berat molekul 470.000, terdiri atas dua rantai polipeptida yang



identik dan membentuk struktur melilit dalam suatu susunan helik. Molekul miosin disusun oleh dua rantai peptida yang lebih kecil (S-1). Bagian filamenya disusun oleh dua fragmen yaitu meromyosin berat atau *heavy meromyosin* (HMM) dan meromyosin ringan atau *light meromyosin* (LMM). Kepala dari molekul miosin memiliki aktivitas ATPase yang tinggi dan memiliki dua sisi katalisis. Dalam mekanisme kontraktile, molekul aktin berikatan dengan miosin untuk membentuk aktomyosin. Aktivitas ATPase dari miosin membutuhkan ion Ca^{2+} sedangkan ATPase aktomyosin memerlukan Mg^{2+} sebagai stimulasinya. Jenis lain dari protein otot adalah mioglobin yang secara kimiawi sama dengan hemoglobin. Protein ini adalah protein terkonjugasi dan fungsinya sebagai pembawa oksigen.

Mekanisme dasar dari kontraksi otot dapat dijelaskan dengan suatu pola interaksi antara aktin dan miosin. Jika digabung bersama, dua protein tersebut membentuk suatu kompleks yang disebut aktomyosin dan bersifat sangat kental. Aktomyosin dapat didisosiasi dengan adanya ATP dan ion Mg^{2+} di mana ATP kemudian terhidrolisis. Jika hidrolisis ATP telah selesai, aktin dan miosin kembali beragregasi membentuk ikatan silang antara filamen aktin dan miosin.

Terdapat dua struktur identik dari protein pada bagian ekor molekul miosin. Tropomyosin B yang larut dalam air dan merupakan penyusun dari zona I pada aktin, dan tropomyosin A yang tidak larut dalam air dan ditemukan hanya ditemukan pada otot moluska. Ini juga disebut dengan paramyosin. Tropomyosin B berbentuk seperti batang dengan berat molekul 130.000 dan memiliki rantai peptida yang sama dengan BM 70.000, membentuk konfigurasi superkoil dalam susunan alfa helical. Tropomyosin B membentuk suatu kompleks dengan aktin F dan menempati celah dari lilitan heliks. Filamen I mengandung jenis protein lainnya yaitu troponin yang membentuk kompleks dengan tropomyosin B. Protein ini dibutuhkan untuk proses relaksasi dan terikat kuat dengan ion Ca^{2+} . Protein minor lainnya adalah alfa aktinin dan beta aktinin yang juga berasosiasi dengan filamen aktin pada pita Z.



b. Hubungan Gaya dan Kecepatan

Efisiensi kerja otot tergantung kepada jumlah beban yang dipindahkannya. Jika otot berkontraksi dengan tanpa adanya beban, bukan merupakan kerja eksternal. Adapun jika ada beban pada otot maka disebut sebagai kerja eksternal. Jika berat beban bertambah secara gradual, kecepatan kontraksi akan berkurang hingga waktu di mana beban sama dengan gaya optimum yang mampu dilakukan oleh otot. Pada fase ini tidak ada pemendekan otot, jadi kecepatan kontraksi adalah nol. Kontraksi otot dapat terjadi pada kondisi aerobik dan anaerobik.

Jika sedikit stimulus diberikan secara cepat setelah stimulus pertama, tidak ada respons terhadap stimulus tersebut. Periode di mana otot tidak memperlihatkan kontraksi disebut dengan periode refraktori. Pada otot lurik, periode refraktori sangat singkat sekitar 0,05 detik. Dua periode refraktori terdiri atas (a) periode refraktori absolut, dan (b) periode refraktori relatif. Pada periode refraktori absolut tidak akan ada kontraksi yang terjadi kendati seberapa pun besarnya stimulus yang diberikan. Akan tetapi respons kedua dapat muncul secara cepat mengikuti selang tertentu ketika stimulus yang lebih besar dari ambang batas diberikan kepada otot.

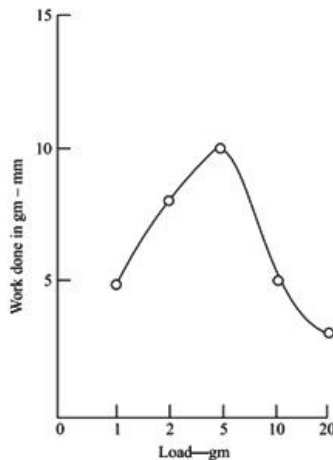
Otot secara langsung menghasilkan panas sebagai hasil dari proses oksidasi ketika beristirahat ataupun bekerja. Akan tetapi, produksi panas lebih banyak saat otot berkontraksi. Panas otot dapat diukur dengan alat galvanometer dan disajikan dalam gramkalori. Pada suhu 20°C, ketika istirahat, otot katak menghasilkan panas sebesar 2 kcal/g/min. Pada pria dewasa yang memiliki berat total ototnya 30 kg, diperkirakan pada kondisi istirahat menghasilkan panas sekitar 18 kcal/jam. (Rastogi, 2007: 381). Energi panas ini dibutuhkan untuk menjaga struktur dan gradien elektrokimia di dalam otot. Jika otot melakukan kontraksi, akan menghasilkan panas dalam dua fase:

1. *Initial heat* atau panas aktivasi yang dihasilkan selama fase laten dan periode pemendekan dalam jumlah yang sedikit sekitar 60 mikro detik stimulus. Panas yang dihasilkan sedikit.



2. *Delayed heat* atau panas tertunda dihasilkan selama relaksasi dan setelahnya, dan ini dihasilkan dalam jumlah yang lebih besar dari *initial heat*.

Selama kekurangan oksigen, hanya sedikit panas yang dihasilkan dan asam laktat juga dihasilkan. Pada kondisi atmosfer yang kaya oksigen, panas akan lebih dihasilkan dan asam laktat tidak dihasilkan selama produksi panas aerobik tersebut. Sekitar seperlima dari asam laktat yang dihasilkan pada kondisi anaerobik akan dioksidasi dan sisanya akan dikonversi menjadi glikogen. Selama kontraksi dan relaksasi, panas awal yang dihasilkan tidak tergantung kepada jumlah oksigen yang tersedia dan ini berasosiasi dengan perombakan ATP dan kreatin fosfat. Setelah relaksasi, dalam kondisi tanpa oksigen, sejumlah kecil panas tertunda (*delayed heat*) akan muncul sebagai hasil produksi asam laktat dari glikogen. Sebaliknya, dalam kondisi adanya oksigen, panas tertunda (*delayed heat*) aerobik muncul sebagai akibat dari adanya oksidasi asam laktat. Seluruh panas akan dihasilkan setelah kerja otot berlangsung.



GAMBAR 4.19. Efek beban terhadap kerja otot katak (Rastogi, 2007: 383).

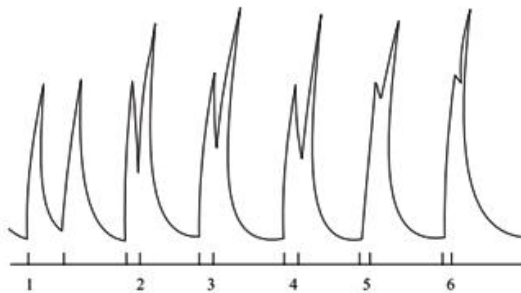
Respons otot juga tergantung kepada pemendekan otot yang berkaitan erat dengan efisiensi kemampuan pengangkatan beban-



nya. Dalam kondisi tanpa beban terhadap otot, kontraksinya berlangsung bukan sebagai kerja eksternal. Dengan menambahkan beban berupa berat pada otot maka akan tercapai tahap di mana otot tidak mampu lagi mengangkat beban tersebut sehingga kapasitas angkat beban otot akan menurun. Durasi stimulus merupakan faktor penting lainnya. Stimulus yang lemah yang diberikan pada kisaran waktu yang cukup panjang tidak akan menimbulkan respons. Ini disebut sebagai stimulus sublinial. Jika stimulus yang lebih besar diberikan pada periode yang lebih singkat, akan terlihat adanya respons otot.

Jika otot dibiarkan untuk mengangkat beban yang melampaui kapasitasnya, maka tidak akan terlihat adanya kontraksi. Tidak akan ada pemendekan, sehingga kerja otot hampir mendekati nol. Ini disebut dengan kontraksi isomerik. Jika otot diperlakukan untuk menahan beban yang konstan yang mana beban tersebut cukup ringan, maka kontraksi akan tetap konstan. Ini diistilahkan dengan kontraksi isotonik.

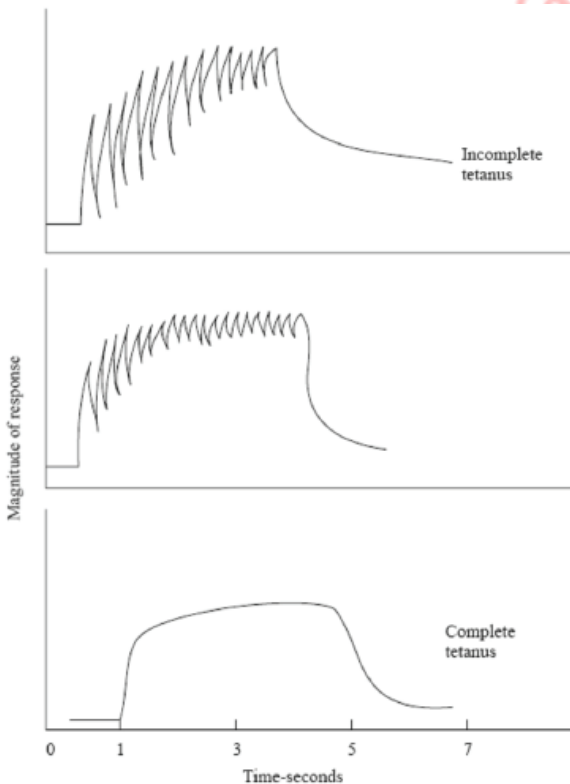
Jika otot lurik yang diisolasi kemudian diberikan stimulus, terjadi kontraksi tunggal. Jika satu detik stimulus diberikan terhadap otot yang masih berada dalam fase kontraksi, maka kontraksi selanjutnya atau pemendekan serabutnya akan terjadi. Kontraksi kedua yang mengikuti kontraksi pertama dan menyebabkan terjadinya pemendekan serabut otot lebih besar. Fenomena ini disebut dengan sumasi.



GAMBAR 4.20. Diagram yang memperlihatkan summasi otot lurik (Rastogi, 2007: 384).



Selama aktivitas normal misalnya dalam lokomosi atau pergerakan, kontraksi otot tidak akan mengalami kekejangan lebih dari satu detik. Proses tersebut akan berlangsung lebih lama jika aktivitas dilanjutkan sehingga akan memperlihatkan adanya kontraksi ganda atau kontraksi tetanus. Kontraksi yang terus dipertahankan disebut dengan tetanus sempurna, namun akan bervariasi sesuai dengan jenis otot dan kondisinya. Jika stimulus berulang-ulang diberikan kepada otot dalam interval waktu yang panjang, maka kontraksi-kontraksi tunggal akan muncul karena adanya sedikit relaksasi. Hal ini dikenal dengan tetanus tidak sempurna.



GAMBAR 4.21. Diagram yang memperlihatkan kondisi-kondisi tetanus (Rastogi, 2007: 385).



Sebagai hasil dari stimulus yang berulang, dengan interval yang tidak terlalu dekat dengan yang menghasilkan tetanus, otot akan kehilangan kemampuannya untuk berkontraksi. Kondisi ini disebut dengan kelelahan otot (*fatigue*). Kondisi ini jarang sekali ditemukan pada otot yang masih berada di tubuh tetapi dapat didemonstrasikan pada otot yang diisolasi. Jika stimulasi berulang diberikan kepada otot yang diisolasi, maka kontraksinya akan semakin lemah dan pada akhirnya tidak akan ada lagi respons sama sekali. Kelelahan otot ini berhubungan dengan penurunan fosfokreatin sebagai manifestasi adanya akumulasi asam laktat di otot. Kelelahan ini dapat dihilangkan dengan menghilangkan asam laktat.

Selama aktivitas muskular, otot-otot viseral mungkin akan tetap berada dalam kondisi memendek untuk beberapa waktu, kondisi ini disebut dengan tonus otot. Tonus dapat didefinisikan sebagai resistensi involunter terhadap regangan pasif. Jika otot memperlihatkan aktivitas ritmik, respons maksimalnya akan diperoleh pada kondisi di mana seluruh komponen serabut otot beraksi secara sinkron. Kadang hanya beberapa serabut otot yang berkontraksi, sedangkan serabut-serabut lainnya akan berkontraksi pada waktu yang lain. Pada kondisi ini tidak ada kelelahan otot. Selama tidur, otot beristirahat secara sempurna kecuali bahwa pada kondisi ini otot-otot masih melakukan kontraksi parsial yang menyebabkan serabut-serabut tetap dalam keadaan menegang. Otot tersebut memiliki tonus. Otot yang mampu untuk merespons suatu stimulus dikatakan memiliki tonus yang baik yang dapat didemonstrasikan dengan merekam potensial aksinya. Otot yang suplai motorisnya sudah dihilangkan atau di mana inervasi saraf sudah hilang disebut dengan atonik.

c. Kontraksi Otot Polos

Otot polos adalah otot dengan kerja tak sadar (*involunter*) karena dibawa kontrol sistem saraf autonom. Otot ini ditemukan pada jaringan-jaringan atau organ viseral seperti saluran pencernaan, saluran respirasi, ginjal, arteri, vena dan lain-lain. Kontraksinya lebih lamban dan kurang terorganisasi.

Pada vertebrata otot polos berupa gelendong serabut yang akan berespons dengan adanya kehadiran senyawa kimiaawi seper-



ti asetilkolin, adrenalin, histamin, oksitosin dan sebagainya. Otot-otot viseral kadangkala berfungsi seperti suatu sinsitium dan bekerja seperti otot jantung di mana ototnya berkontraksi secara keseluruhan.

Umumnya otot polos dikontrol oleh divisi autonom dari sistem saraf pusat. Akan tetapi ada beberapa yang diinervasi oleh saraf motorik dan berespons terhadap impuls yang melewati saraf tersebut. Potensial dasarnya bervariasi dari -30 mV sampai dengan -75 mV. Kontraksi otot polos sangat berbeda dengan kontraksi otot lurik. Otot lurik berkontraksi secara cepat, sedangkan otot polos berkontraksi dengan lambat dan masih dalam kondisi tersebut untuk beberapa detik. Perbedaan dasar tersebut berkenaan dengan pelepasan ion kalsium yang membentuk kompleks protein kontraktil.

d. Kontraksi Otot Jantung

Secara struktural, otot jantung mirip dengan otot lurik, tetapi ada beberapa perbedaan mendasar dari mekanisme kontraksinya. Otot jantung berbeda dengan otot lurik dalam hal:

- (1) Otot jantung menghasilkan ATP secara aerobik dan menggunakan asam lemak untuk produksi ATP lebih banyak daripada glukosa.
- (2) Asam laktat yang dihasilkan oleh otot lurik akan ditransportasikan ke jantung melalui darah yang akan dapat dioksidasi lebih lanjut untuk menghasilkan ATP.
- (3) Selama kontraksi, potensial aksinya lebih panjang dan proses repolarisasi juga diperpanjang. Hal ini berkenaan dengan kenyataan bahwa potensi aksi berakhir sekitar 100 milidetik, sedangkan pada otot lurik hanya 1 milisekon.
- (4) Otot jantung memperlihatkan kontraksi ritmik dengan tanpa adanya stimulus eksternal dan karena itu potensi aksinya tidak stabil.
- (5) Selama berkontraksi, otot jantung tidak memperlihatkan respons terhadap suatu stimulus sehingga sumasi dan tetanus tidak pernah terjadi.
- (6) Pada otot jantung periode refraksinya lebih panjang dari pada otot lurik dan akan berakhir melalui fase kontraksi.



Otot jantung memiliki piranti unik yang diturunkan secara ritmis. Aksi potensial dihasilkan oleh nodus sinoatrial dan menyebar secara cepat ke seluruh bagian jantung. Bagian tersebut dikenal dengan *pacemaker*. Jantung akan terus berdetak kendati telah diinervasi.

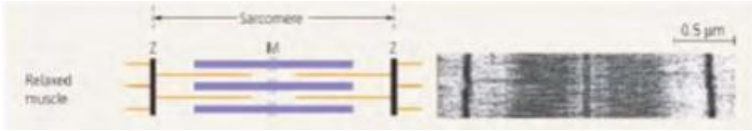
e. Mekanisme Kontraksi Otot Lurik

Ketika sebuah otot berkontraksi, panjang masing-masing sarkomer menjadi berkurang (jarak dari satu garis Z ke garis Z berikutnya menjadi lebih pendek). Pada sarkomer yang berkontraksi, pita A tidak berubah panjangnya, sedangkan pita I memendek dan zona H menjadi hilang. Peristiwa ini dijelaskan dengan teori sliding filamen. Model sliding filamen yang dikemukakan oleh H.E Huxely (Huxley, 1969: 1364).

Menurut teori ini, selama terjadinya kontraksi dan peregangan serabut otot, panjang pita A tetap konstan sedangkan panjang pita I memendek. Panjang filamen tebal sama dengan panjang pita A. Panjang pita H bertambah atau berkurang terhadap panjang pita. Hal ini mengindikasikan bahwa ketika terjadi perubahan panjang otot, ujung-ujung filamen bertemu. Filamen tebal dan filamen tipis konstan panjangnya saat istirahat. Selama pemendekan akan ditemukan adanya pita baru.

Adapun teori sliding filamen berupa jembatan penghubung reguler yang akan muncul pada interval yang teratur dari filamen tebal miosin dalam pola ikatan helik yang berikatan dengan filamen lain yaitu aktin. Ikatan silang ini mungkin akan membantu proses kontraksi otot dengan melakukan kontak pada sisi spesifik pada filamen aktin sehingga mempertahankan suatu kontinuitas mekanis di sepanjang otot. Jembatan tersebut dapat beresilasi maju dan mundur. Setiap kali jembatan tersebut meluncur secara cepat, molekul ATP akan dikatalisasi untuk melepaskan molekul fosfat dan energi. Selama fase relaksasi, tidak ada ikatan jembatan miosin-aktin dan penguraian ATP berhenti.





1. Otot direlaksasikan (diekstensi)



2. Otot berkontraksi



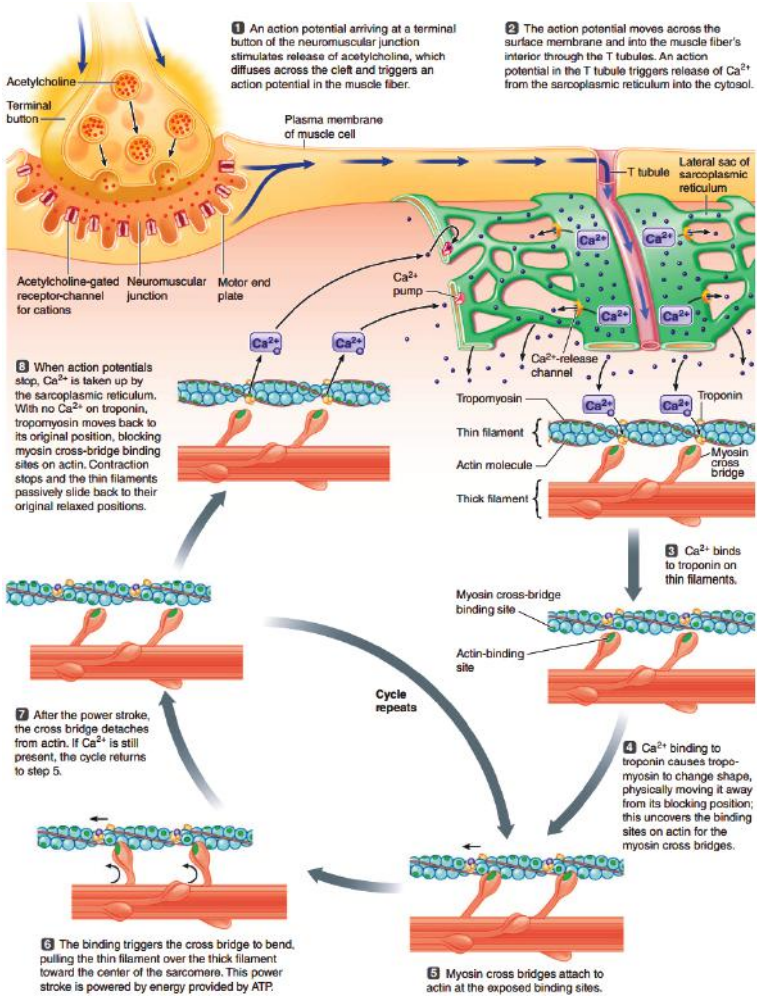
3. Otot dikonstraksikan

GAMBAR 4.22. Model filamen luncur pada kontraksi otot. (a) pada otot yang berelaksasi, panjang setiap sarkomer lebih besar dibandingkan dengan otot yang berkontraksi atau yang dikonstraksikan; (b) selama kontraksi, filamen tebal dan filamen tipis saling meluncur di atas satu sama lain, hingga memendekkan sarkomer; (c) ketika otot dikonstraksikan sepenuhnya, sarkomer dipendekkan secara nyata, filamen tipis tumpang-tindih, dan terdapat sedikit atau bahkan tidak ada ruangan antara ujung-ujung filamen tebal dan garis Z.

f. Peranan Ion Ca^{2+} pada Kontraksi Otot

Kerja otot baik kontraksi maupun relaksasi tidak terlepas dari mekanisme kimiawi. Proses pertama yang mengawali mekanisme kontraksi otot adalah peristiwa yang berlangsung antara sistem saraf dan otot. Pada sambungan *neuromuscular* terjadi pelepasan asetilkolin dari saraf ke otot. Asetilkolin yang berdifusi sampai ke neuromuskuler mengubah permeabilitas membran plasma serat-serat otot. Retikulum endoplasmik di dalam sel otot (ER) melepaskan Ca^{2+} dan ion tersebut masuk kesitoplasma. Ca^{2+} kemudian menginduksi pengikatan miosin ke aktin, yang menjadi awal dari mekanisme kontraksi. Jika neuron motor berhenti mengirim potensial aksinya ke serat-serat otot, maka Ca^{2+} akan kembali masuk ke retikulum sarkoplasma.





GAMBAR 4.23. Siklus interaksi antara miosin dan aktin pada kontraksi otot (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 345).

Pada Gambar 4.20 diketahui bahwa setelah potensial aksi yang mencapai dasar dari terminal *neuromuscular* akan melepaskan asetil kolin yang akan memicu terciptanya potensial aksi di serat otot (tahap 1). Setelah itu potensial aksi bergerak melinta-



si permukaan membaran dan masuk ke serat otot melalui tabung T. Aksi potensial pada tabung T menyebabkan lepasnya ion Ca^{2+} (tahap 2). Ion Ca^{2+} berikatan dengan troponin yang ada di filamen aktin (tahap 3). Terjadi perubahan struktur tropomiosin akibat adanya ikatan ion Ca^{2+} dengan troponin, yang memicu aktin dan miosin membentuk jembatan (tahap 4). Aktin dan miosin kemudian membentuk jembatan silang (tahap 5). Terbentuknya jembatan silang ini mengakibatkan aktin dan miosin tertekan menuju pusat sarkomer. Kekuatan penekukan (*power stroke*) ini didukung oleh adanya ATP (tahap 6). Setelah adanya penekukan tersebut, jembatan silang terlepas. Jika ion Ca^{2+} masih tersedia maka siklus akan kembali ke tahap 5 (tahap 7). Ketika potensial aksi terhenti, ion Ca^{2+} diambil kembali oleh retikulum sarkoplasma. Pada kondisi tidak ada ion Ca^{2+} ini, tropomiosin kembali ke posisi awal dan ikatan silang aktin miosin tidak terjadi. Hal ini mengakibatkan kontraksi berhenti dan aktin kembali ke posisi semula (tahap 8).

E. RINGKASAN

1. Untuk dapat menerima stimulus dan menghasilkan tanggapan atau respons yang baik, hewan harus memiliki alat untuk menerima stimulus dan untuk menghasilkan tanggapan terhadap stimulus yang datang. Alat penerima rangsangan/stimulus disebut reseptor, sedangkan alat penghasil tanggapan dinamakan efektor.
2. Jalur penerimaan stimulus melalui reseptor diawali dengan transduksi sensoris, amplifikasi, transmisi, dan integrasi.
3. Klasifikasi reseptor berdasarkan lokasi sumber stimulus yaitu interoreseptor dan eksteroreseptor. Klasifikasi berdasarkan jenis energi yang dideteksi (yang ditransduksikan), reseptor dibedakan menjadi enam, yaitu, mekanoreseptor, kemoreseptor, fotoreseptor, reseptor rasa sakit, termoreseptor, dan reseptor elektromagnetik.
4. Mekanoreseptur terdapat pada kulit yaitu sel rambut, organ keseimbangan, dan telinga manusia yang berperan sebagai indra atau sensasi sentuhan. Mekanoreseptor dirangsang oleh



stimulus berupa tekanan, sentuhan, regangan, pergerakan dan suara serta semua bentuk energi mekanik.

5. Kemoreseptor berkaitan dengan pengecapan (gustasi) dan penciuman (olfaksi).
6. Fotoreseptor berkaitan dengan hal pendeteksian cahaya (indra penglihatan). Vertebrata, mamalia dan burung mempunyai sel fotoreseptor berbentuk kerucut dan batang.
7. Termoreseptor membantu merespons panas atau dingin membantu mengatur suhu tubuh.
8. Nositseptor terdiri dari kelompok dendrit telanjang pada epidermis kulit.
9. Elektrosseptor mendeteksi berbagai bentuk energi elektromagnetik seperti listrik, magnetik, dan cahaya tampak.
10. Kumpulan sel atau organ penghasil tanggapan ini disebut dengan organ efektor. Contoh organ efektor adalah otot, silia, flagel, *pseudopodia*, organ elektrik, organ luminesen dan kromatofor.
11. Mekanisme kerja otot diawali setelah potensial aksi yang mencapai dasar dari terminal *neuromuscular* akan melepaskan asetil kolin yang akan memicu terciptanya potensial aksi di serat otot. Setelah itu potensial aksi bergerak melintasi permukaan membran dan masuk ke serat otot melalui tabung T. Aksi potensial pada tabung T menyebabkan lepasnya ion Ca^{2+} . Ion Ca^{2+} berikatan dengan troponin yang ada di filamen aktin yang mengakibatkan terjadi perubahan struktur tropomiosin akibat adanya ikatan ion Ca^{2+} dengan troponin. Aktin dan miosin kemudian membentuk jembatan silang. Kekuatan penekukan (*power stroke*) terjadi yang didukung oleh adanya ATP. Setelah adanya penekukan tersebut, jembatan silang terlepas. Hal ini mengakibatkan kontraksi berhenti dan aktin kembali ke posisi semula.

E. LATIHAN

1. Jelaskan pengertian dari reseptor dan efektor beserta contoh organ masing-masingnya!



2. Jelaskan klasifikasi reseptor berdasarkan asal stimulusnya!
3. Jelaskan mekanisme kerja kemoreseptor!
4. Jelaskan mekanisme kerja fotoreseptor (mata)!
5. Jelaskan mekanisme kerja mekanoreseptor (sel rambut)!
6. Jelaskan contoh organ efektor!
7. Jelaskan mekanisme kerja otot!
8. Jelaskan apa yang terjadi jika salah satu komponen fotoreseptor rusak! Mengapa saudara menjawab tersebut!
9. Jelaskan beda otot polos, otot lurik, dan jantung dalam hal kontraksinya!
10. Tuliskan komponen yang terlibat dalam kontraksi otot!

G. REFERENSI

- Champbell, Neil A.R., Jane B, Urry, Lisa A, C., L, M., Wasserman, Steven A, Minorsky, Peter V, J., & Robert B. (2008). *Biology*. (Campbell *et al.*, Ed.) (8 th). San Fransisco: Pearson Education, Inc.,publishing as Pearson Benjamin Cummings,.
- Huxley, H. E. (1969). Muscular Contraction. *Science*, 164(3886), 1356–1365.
- Kay, I. (1998). *Introduction to Animal Physiology*. USA: Bios Scientific Publisher Limited.
- Rastogi, S. (2007). *Essentials of Animal Physiology* (Fourth Edi). New Delhi: New Age International (P) Ltd.
- Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, P. (2013). *Animal Physiology From Genes to Organisms* (Second Edi). USA: Yolanda Cossio.
- Willmer, P, Stone, G, Johnston, I. (2005). *Environmental Physiology of Animals* (Second Edi). USA: Blackwell Publishing company BLACKWELL.



IAIN Batusangkar

V

BAB

SISTEM ENDOKRIN

Pada Bab V ini pembelajar diharapkan mampu memahami tentang pengertian hormon, ciri hormon, kelenjar hormon, sistem hormon pada invertebrata dan vertebrata, klasifikasi hormon, mekanisme kerja hormon.

Hewan mempunyai dua sistem komunikasi internal dan regulasi, yaitu sistem saraf dan sistem endokrin. Sistem endokrin terdiri dari sekelompok organ kadang disebut sebagai kelenjar buntu, yang fungsi utamanya adalah menghasilkan dan melepaskan hormon-hormon secara langsung ke dalam aliran darah karena kelenjarnya tidak memiliki saluran spesifik. Hormon berperan sebagai pembawa pesan untuk mengoordinasikan kegiatan berbagai organ tubuh. Sistem endokrin dikenal juga dengan sistem hormon. Sistem endokrin ditemukan pada invertebrata dan vertebrata.

A. PENGERTIAN HORMON

Hewan mempunyai sistem endokrin untuk mengontrol fungsi fisiologi seperti metabolisme, pertumbuhan, reproduksi, regulasi ionik dan osmotik, dan lain sebagainya. Hormon-hormon dibawa ke organ-organ target, dan biasanya jauh dari tempat pelepasannya pada aliran tubuh dari hewan. Walaupun demikian pandangan klasik mengenai organ dan fungsi endokrin baru-baru ini telah mengalami perubahan. Salah satu contohnya adalah beberapa hormon yang tidak perlu sistem sirkulasi umum pada hewan untuk mendorong terjadinya sebuah efek. Contohnya adalah pada peranan his-

tamin untuk mengontrol sekresi asam pada lambung vertebrata. Berbagai faktor pendorongnya berkumpul pada sel-sel khusus di lambung. Tipe dari aksi hormon lokal ini disebut kontrol parakrin.

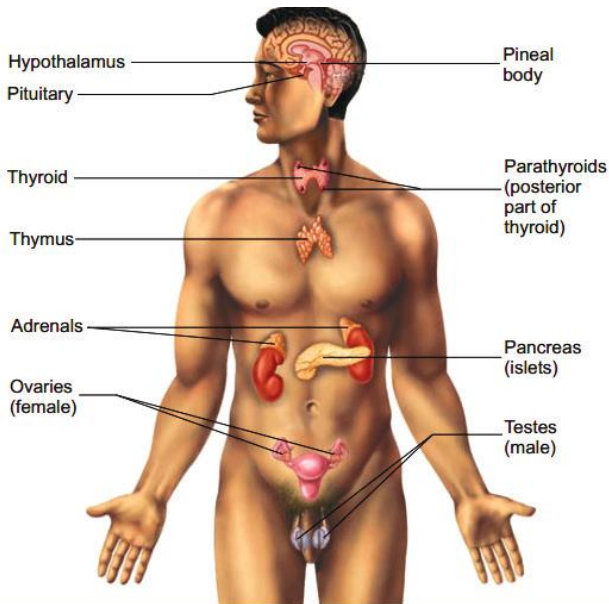
Hormon yang dihasilkan oleh kelenjar endokrin berbeda dengan substansi kimiawi lainnya yang dihasilkan oleh tubuh (seperti enzim, plasma dan sebagainya). Endokrin atau hormon merupakan suatu zat kimia khusus, disintesis oleh sel-sel hidup di dalam kelenjar, disekresikan langsung ke dalam darah untuk ditransportasikan menuju organ sasaran, berfungsi sebagai regulasi fisiologis dan sudah efektif dalam jumlah yang sedikit. Hormon mempunyai ciri-ciri spesifik (Rastogi, 2007: 407) sebagai berikut:

1. Hormon diproduksi dan disekresikan ke dalam darah oleh kelenjar endokrin dalam jumlah yang sangat sedikit.
2. Hormon diangkut oleh darah menuju ke sel/jaringan target.
3. Hormon mengadakan interaksi dengan reseptor yang terdapat pada sel target.
4. Hormon mempunyai peranan mengaktifkan enzim khusus.
5. Hormon tidak mempunyai satu sel target, tetapi dapat juga memengaruhi beberapa sel target.

Pada seluruh invertebrata dan vertebrata dikenal dengan neuroendokrin atau *neurosecretori*. Pada sistem ini neuron dikhususkan untuk sintesis, penyimpanan, pelepasan neurohormon (neurotransmitter yang ditemukan pada neuron). Neurohormon dilepaskan ke sinapsis, dilepaskan ke dalam sirkulasi darah selama perjalanan keorgan target. Pada mamalia, misalnya ginjal mengekskresi air yang dikontrol oleh sekresi hormon antidiuretik (ADH) yang dihasilkan dari neuron sel tubuh yang terletak pada bagian hipotalamus pada otak dan akson menyampaikan ke kelenjar pituitari posterior. Pada beberapa tempat, pelepasan neurohormon ke dalam sirkulasi bisa berpengaruh pada organ-organ endokrin yang menimbulkan beberapa efek biologi. Sebagai contohnya pada kepiting, pergantian kulit dikontrol oleh neurohormon yang mencegah hormon pergantian kulit (MIH), di mana pada saat pencegahan, kelenjar endokrin yang kedua memproduksi hormon yang meningkatkan proses pergantian kulit.



Hormon yang dihasilkan oleh kelenjar endokrin berbeda dengan substansi kimiawi lainnya yang dihasilkan oleh tubuh. Adapun organ penghasil hormon pada vertebrata adalah hipotalamus, kelenjar pineal, pituitari, tiroid, paratiroid, timus, adrenal pankreas, ovari, dan testis. Organ atau kelenjar penghasil hormon pada invertebrata berupa korpus kardiakum.



GAMBAR 5.1. Organ penghasil hormon pada manusia.

B. KLASIFIKASI HORMON

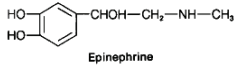
Semua hormon pada hewan invertebrata dan vertebrata di bagi ke dalam tiga kelompok besar yaitu peptida atau protein, derivat asam amino dan kelompok steroid. Akan tetapi ada pengecualian yaitu prostaglandin yang dikenal dengan kelompok senyawa C₂₀. Komponen ini memiliki banyak fungsi pada hewan. Ikatan alami dari suatu hormon penting karena menentukan bagaimana suatu hormon menimbulkan efek biologi.



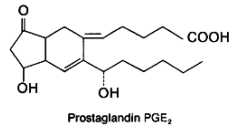
TABEL 5.2. Klasifikasi hormon pada vertebrata berdasarkan komposisi kimia hormon.

Steroid	Peptida dan Protein Besar		Turunan Tirosin
	Peptida	Protein Besar	
Testosteron	Hormon hipotalamus	Hormon pertumbuhan,	Katekolamin, terdiri dari: noradrenalin, adrenalin
Estrogen	Angiotensin	Prolaktin	hormon tiroid, meliputi Tiroksin (T4) dan Triodo-tironin (T3)
Progesteron	Somatostatin	LH	
Kortikosteroid	Gastrin	FSH	
Vitamin D-3	Sekretin	TSH	
	Glukagon		
	Kalsitonin		
	Insulin		
	Paratormon		

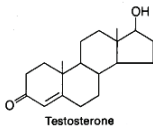
A Amine



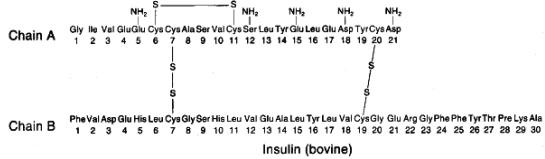
B Prostaglandin



C Steroid



D Peptide



GAMBAR 5.2. Struktur hormon amina, prostaglandin, steroid, peptida.

Klasifikasi hormon berdasarkan pengaruh hormon terhadap jaringan target ada empat (Schmidt-Nielsen, 1980: 329) yaitu:

1. Hormon kinetik. Hormon ini meliputi migrasi pigmen (melatonin), kontraksi otot (epineprin dan oksitosin), dan sekresi kelenjar eksokrin dan endokrin (sekretin, gastrin, hormon pelepas hipotalamik).
2. Hormon metabolik, yang berpengaruh pada perubahan laju keseimbangan reaksi-reaksi (tiroksin, insulin, hormon per-



- tumbuhan, glukokortikoid), keseimbangan elektrolit dan air (ADH, aldosteron, kalsitonin, paratormon).
3. Hormon morfogenetik, yang berpengaruh terhadap pertumbuhan (hormon pertumbuhan), pergantian kulit (tiroksin, kortikosteroid), metamorfosis (tiroksin), pematangan gonad (FSH), LH, androgen, estrogen.
 4. Hormon tingkah laku seperti hormon estrogen, progesteron, dan androgen.

C. SISTEM ENDOKRIN PADA INVERTEBRATA

Hewan invertebrata mengandalkan sistem kontrol neuroendokrin dalam meregulasi fisiologi tubuhnya. Kelompok invertebrata yang lebih tinggi seperti moluska memiliki sistem sirkulasi yang lebih berkembang dibandingkan dengan hewan invertebrata yang lebih rendah seperti pada cacing pipih, oleh karena itu mereka memiliki lebih banyak mekanisme untuk mendistribusikan hormon-hormon yang diperlukannya. Sel-sel neurosekresi terdapat pada terutama hewan rendah kecuali hewan bersel satu.

Pada *coelenterata* dan *annelida* tidak terdapat kelenjar endokrin, tetapi mekanisme neurosekresi mengatur pertumbuhan dan reproduksi. Demikian juga pada cacing pipih dan nematoda hanya mempunyai mekanisme neurosekresi. Hewan rendah yang mempunyai kelenjar endokrin ialah *cephalopoda*, arthropoda dan hewan yang lebih kompleks lainnya. Pada *crustacea* terdapat kelenjar sinus dan pada insekta ada korpus kardiakum, kedua kelenjar tersebut sama dengan neurohipofisis (hipofisis bagaian belakang) pada vertebrata. Jadi pada dasarnya hewan rendah maupun vertebrata memiliki suatu hubungan antara sistem saraf dengan kelenjar endokrin. Hipofisis pada vertebrata disebut kelenjar neuroendokrin. Berikut ini adalah uraian mengenai fungsi endokrin pada invertebrata.

1. Coelenterata

Pada *coelenterata* seluruh sistem saraf bekerja sebagai sistem neurosekresi. *Coelenterata* seperti *Hydra* memiliki sel-sel dengan



substansi sekret yang dilibatkan dalam reproduksi, pertumbuhan dan regenerasi. Bagian kepala *hydra* memindahkan sebuah molekul peptida yang disekresi oleh tubuh yang sedang beristirahat. Substansi ini disebut juga dengan “aktivator kepala”. Efeknya menyebabkan sisa dari bagian tubuh untuk regenerasi mulut dan tentakel yang membuat bagian kepala.

Pada ubur-ubur saraf cincin sirkum oral dengan serabut radialnya mempunyai sel-sel neurosekresi. Neurohormon belum diketahui strukturnya tetapi mempunyai fungsi penting misalnya untuk proses melepaskan gamet.

2. Platyhelminthes

Sel-sel neurosekresi cacing pipih terdapat pada ganglion otak. Fungsinya belum diketahui tetapi diduga belum mempunyai peranan dalam proses regenerasi. Substansi yang ditemukan pada cacing pipih kesamaan dengan *coelenterata* dan terlibat dalam proses regenerasi. Hal ini juga memperlihatkan bahwa hormon-hormon terlibat dalam regulasi osmotik dan ionik seperti pada proses reproduksi.

3. Nematoda

Peranan kontrol neuroendokrin pada nematoda, terdapat pada kelompok nematoda yang bersifat parasit. Nematoda memiliki sistem neuroendokrin yang diasosiasikan dengan sistem saraf (*nervous*) pada ganglia dibagian kepala dan beberapa tali saraf di sepanjang tubuhnya.

4. Annelida

Annelida, seperti *Polychaeta* (*Neris*), *Oligochaeta* (*Lumbricus*) dan *Hirudinae* (*Hirudo*) memperlihatkan tingkat kemajuan pada proses pembentukan kepala. Otak telah memperlihatkan sejumlah besar neuron neurosekretoris. Neuron neurosekretori dari hewan-hewan ini biasanya memiliki sistem sirkulasi yang berkembang dengan baik. Sistem endokrin hewan-hewan ini diasosiasikan dengan beberapa aktivitas seperti pertumbuhan, perkembangan,



regenerasi dan perkembangan dari sistem reproduksi. Contohnya yaitu pada tahapan metamorfosis cacing *polychaeta* dewasa, diketahui seperti epitoki dengan beberapa segmen-segmen tubuh yang ditransformasikan bersama untuk menjadi organisme yang hidup bebas, seperti terlihat pada beberapa *annelida*. Proses ini dikenal dengan stolonisasi.

Epitoki dikontrol oleh suatu sistem kontrol neuroendokrin, tetapi hormon yang dikeluarkan sebenarnya menghalangi proses ini. Oleh karena itu, selama epitoki tingkatan hormon harus dikurangi. Kendati ini berjalan tidak sempurna, tetapi hasil sekresi mungkin diregulasi dengan petunjuk lingkungan seperti beberapa cacing yang memiliki masa-masa berketurunan. Sama halnya dengan hormon-hormon yang menghalangi pertumbuhan gamet dan ini mungkin sama dengan hormon yang mengontrol epitoki.

5. Molusca

Pada *Mollusca*, khususnya siput ada sejumlah besar sel neuroendokrin di ganglion yang merupakan sistem saraf pusat. Selain itu terdapat kelenjar-kelenjar endokrin umum yang mendukung kelenjar neuroendokrin. Kebanyakan senyawa yang disekresikan dari organ atau kelenjar tersebut adalah struktur seperti protein. Semuanya mengontrol banyak fungsi seperti proses regulasi osmotik, ionik, regulasi pertumbuhan dan reproduksi. Banyak informasi mengenai endokrin *mollusca* berasal dari studi tentang sistem reproduksinya. Reproduksi pada *mollusca* sangat kompleks terutama karena sifatnya yang hermaprodit misalnya ada perubahan jantan dan betina pada individu yang sama secara simultan. Selain itu, hewan ini juga ada yang bersifat protandri di mana gamet jantan muncul sebelum gamet betina. Beberapa substansi hormon telah diidentifikasi misalnya hormon yang menstimulasi pelepasan telur dari jaringan gonad dan peletakkannya. Pada *cephalopoda*, reproduksi juga di bawah kontrol kelenjar endokrin. Kelenjar optik menjadi salah satu unit yang sangat penting untuk menyekresikan beberapa hormon yang dibutuhkan untuk perkembangan sperma dan telur.

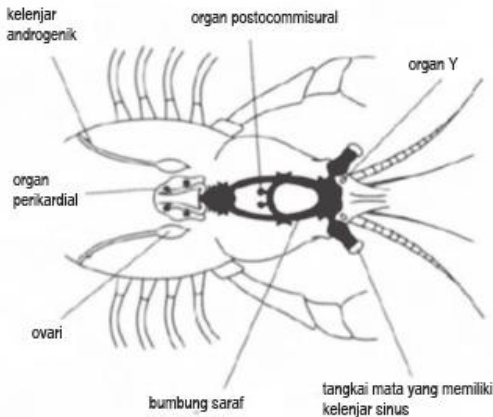


6. Crustacea

Crustacea memiliki sistem kontrol neuroendokrin yang utama. Kisaran fungsi-fungsi fisiologis yang dikontrol oleh hormon sangat beragam yang terdiri atas regulasi osmotik dan ionik, regulasi jantung, komposisi darah, pertumbuhan dan *molting*. Kontrol neuroendokrin berkembang dengan baik pada *malacostraca* (seperti kepiting, lobster, udang). Sel-sel neuroendokrin dari *crustacea* terdapat pada tiga bagian utama:

- Kompleks kelenjar sinus, kadang-kadang disebut kompleks organ X kelenjar sinus. Organ ini menerima akson-akson neuroendokrin dari ganglia kepala dan lobus optik dan berada di bagian pangkal mata (*eye stalk*).
- Organ *postcommissural*, organ ini menerima akson-akson dari otak yang berakhir di bagian pangkal esofagus.
- Organ *pericardial*, organ ini menerima akson dari ganglia torak dan terdapat pada area dekat proksimal jantung.

Selain itu, terdapat kelenjar-kelenjar endokrin lainnya. Organ tersebut adalah organ Y yang merupakan sepasang kelenjar yang terletak di bagian torak hewan di segmen *maxilla* atau segmen antena. Sekresi dari kelenjar Y menjadi penting dalam proses per-



GAMBAR 5.3. Kelenjar endokrin utama pada *Crustacea* (Kay, 1998: 65).



gantian kulit. Kelenjar mandibula yang terletak di dekat kelenjar Y yang juga memiliki fungsi endokrin. Ada juga struktur endokrin yang berasosiasi dengan dengan organ reproduksi. Contohnya kelenjar androgen yang diduga kuat berhubungan dengan perkembangan testis dan produksi sperma.

7. Insekta

Insekta memiliki kesamaan dengan *crustacea* pada keanekaragaman fungsi fisiologisnya yang dikontrol oleh organ-organ endokrin. Ada tiga kelompok utama dari sel-sel neuroendokrin pada sistem saraf serangga:

- a. Sel-sel neurosekretori median yang mengirim akson-akson menuju ke sepasang *corpora cardiaca* yang menjadi tempat penyimpanan dan pelepasan neurohormon.
- b. Kelompok sel-sel neurosekretori lateral, yang juga mengirim akson-aksonnya menuju ke *corpora cardiaca*.
- c. Sel-sel neurosekretori *subesophageal*, yang mengirim akson-aksonnya menuju ke *corpora allata*.

Insekta juga memiliki kelompok kelenjar-kelenjar endokrin lainnya selain neuroendokrin. Berikut adalah hormon-hormon yang dimiliki oleh serangga:

a). *Hormon Juvenile*

Dihasilkan di *corpora allata* (di belakang otak), mempertahankan fase larva (*molting* larva dari fase ke fase), menginduksi perkembangan larva yang lebih besar dari segi ukuran, efeknya signifikan terhadap hormon *ecdysone*. Jika JH tinggi, *ecdysone* hanya memicu *molting* larva; jika JH rendah, *ecdysone* memicu pembentukan pupa dan jika JH tidak ada, terjadi pembentukan imago lebih cepat.

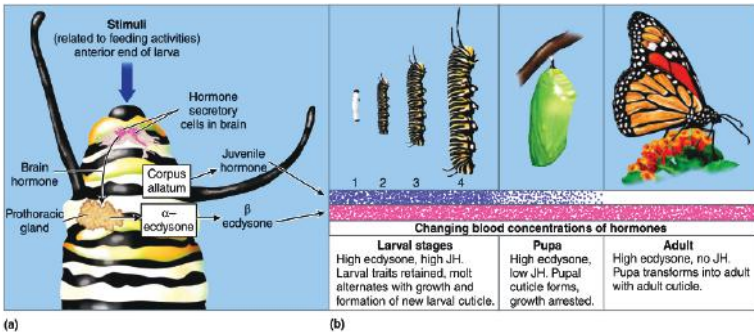
b). *Hormon Prothoraciotropic* (PTTH)

Dibutuhkan selama pembentukan pupa dan *molting* dan dihasilkan oleh dua pasang massa sel di bagian otak larva. Fungsi spesifiknya adalah memacu kelenjar protorak untuk menghasilkan hormon-hormonnya.



c). **Hormon Ekdison**

Dihasilkan di kelenjar prothorak di thorax dan kerjanya memengaruhi proses ekdisis (*molting*) dari larva hingga dewasa.



GAMBAR 5.4. Kelenjar endokrin dan sistem saraf pada insekta (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 280)

D. SISTEM ENDOKRIN PADA VERTEBRATA

Vertebrata memiliki organ endokrin yang lengkap. Stabilitas sistem ini dipengaruhi oleh organ perifer endokrin di bawah kontrol pituitari anterior. Tipe sistem endokrin pada vertebrata terdiri dari tiga kelenjar utama yaitu: hipotalamus, kelenjar pituitari dan kelenjar perifer endokrin.

1. Hipotalamus

Hipotalamus merupakan organ endokrin pusat yang dimiliki hewan vertebrata. Hipotalamus merupakan bagian otak yang berada di bawah talamus dan berperan dalam mempertemukan sistem saraf dan endokrin. Hipotalamus berperan dalam mengendalikan kelenjar pituitari, sementara pituitari berperan dalam mengendalikan kelenjar endokrin lainnya. Oleh karena itu, hipotalamus disebut kelenjar induk (*master of gland*). Sel-sel neurosekretori atau hormon yang dikeluarkan oleh hipotalamus akan dibawa ke pituitari. Ada dua jenis hormon yang dilepaskan ke lobus pituitari anterior (adenohipofisis, lobus depan) dan hormon yang dilepaskan ke lobus pituitari posterior (neurohipofisis).



2. Kelenjar Pituitari/Hipofisa

Kelenjar pituitari atau hipofisa terletak dalam rongga tulang pada dasar otak di bawah hipotalamus. Secara embriologi hipofisa sebagian berasal dari jaringan saraf yaitu dari evaginasi dasar diensefalon dan bagian lain berasal dari tonjolan atap mulut. Kelenjar pituitari terbagi tiga yaitu lobus anterior, posterior, dan intermediet.

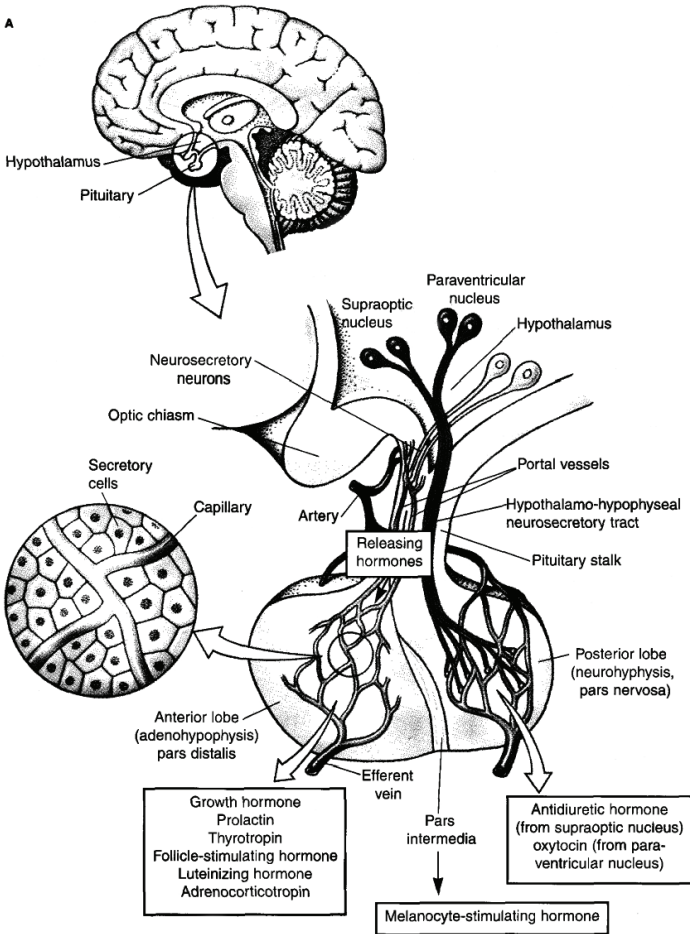
Lobus Anterior atau Adenohipofisa

Pada daerah ini terdapat dua jenis sel yaitu sel-sel kromofob dan kromofil. Sel kromofob tidak mempunyai afinitas terhadap zat warna biasa, sementara sel kromofil mempunyai afinitas yang besar terhadap zat warna. Ada enam hormon yang dihasilkan oleh lobus anterior (Faria, Provete, Thurman, & Mcnamara, 2017: 206), yaitu:

1. Hormon pertumbuhan atau somatotrofik hormon (STH). Hormon ini merangsang pertumbuhan jaringan. Kelebihan hormon ini memicu suatu penyakit yang dikenal dengan gigantisme pada anak-anak dan *acromegaly* pada orang dewasa. Adapun kekurangan hormon ini memicu *dwarfisme* (kerdil).
2. *Luteotropik hormone* (LTH) atau prolaktin. Jumlah dan ukurannya bertambah selama kehamilan dan laktasi, berkaian dengan fungsi menstimulir produksi susu dan perkembangan mammae.
3. *Folikel stimulating hormon* (FSH). FSH pada wanita berperan dalam merangsang pertumbuhan dan pematangan *folikel de-graaf* dengan cara memproduksi estrogen. Pada laki-laki berperan dalam merangsang perkembangan epitel germinal pada tubulus seminiferus.
4. *Luteining hormon* (LH), lebih dikenal dengan "*interstitial cell-stimulatinghormon*" (ICTH). Pada wanita berperan dalam pembentukan korpus luteum dan pada pria berperan dalam merangsang sel interstisial testis untuk menghasilkan testoteron.
5. "*Thyroid stimulatinghormon*" (TSH). Bekerja memicu produksi tiroxin oleh kelenjar tiroid.
6. "*Adrenokortikotropik hormon*" (kortikotropin, ACTH), yang bekerja menstimulir produksi glukokortikoid oleh kortek adre-



nal. Glukokortikoid terlibat dalam produksi dan metabolisme dari sel darah.



GAMBAR 5.5. Morfologi kelenjar pituitari (Randall, D, Burggren, French, 1997: 306)

Lobus Intermediat

Lobus intermediat ini menghasilkan hormon *melanocyte-stimulating hormone* (MSH), bekerja memicu sintesa dan penyebaran melanin pada sel dan menggelapkan warna kulit.



Lobus Posterior atau Neurohipofisa

Neurohipofisa sebetulnya bukan merupakan kelenjar endokrin murni karena daerah ini terutama dibangun oleh akson-akson dari hipotalamus dan sel pituisit. Pada hipofisa posterior ini dihasilkan dua hormon yaitu:

- 1). hormon antidiuretik (ADH) disebut juga vasopresin. Hormon ini bekerja meningkatkan kontraksi otot polos pembuluh darah, meningkatkan tekanan darah, yang terutama bekerja pada otot arteri dan arteriol.
- 2). Oksitoksin, hormon ini menyebabkan otot pada dinding rahim berkontraksi. Hormon ini juga mengaktifkan proses pengeluaran susu pada proses menyusui.

3. Kelenjar Perifer Endokrin

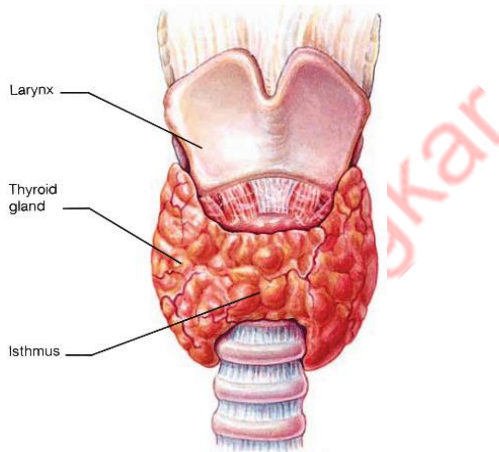
a. Kelenjar Tiroid

Kelenjar tiroid terletak di bawah laring. Kelenjar ini terdiri atas dua lobus, lobus kiri dan lobus kanan, yang dihubungkan oleh isthmus. Kelenjar ini dibangun oleh lobus-lobus yang disebut folikel, dibangun oleh epitel kubus berlapis tunggal. Ukuran folikel tidak beraturan. Di antara sel epitel folikel atau di antara folikel ditemukan selain yang disebut sel-sel parafolikel. Sel yang membangun folikel menyekresikan dan menimbun hasilnya didalam lumen folikel sebagai substansi mirip gelatin disebut koloid. Koloid terdiri dari tiroglobulin, suatu senyawa protein yang teriodinasi. Hormon yang dihasilkan tiroid tersimpan dalam koloid dalam bentuk terikat pada tiroglobin. Adapun hormon yang dihasilkan tiroid.

- 1). Tiroid termasuk, triiodotironin (T3) dan tiroksin (T4). T4 akan diubah menjadi T3. T3 berfungsi dalam konsumsi oksigen, produksi panas dan mempertahankan proses metabolik.
- 2). *Calcitonin* berfungsi menurunkan kadar kalsium darah dengan menghambat pelepasan kalsium tulang. Di sekitar folikel terdapat banyak pembuluh darah sehingga memudahkan pencurahan hormon ke dalam aliran darah. Hormon tiroid pada Amfibia berfungsi merangsang metamorfosa larva. Hormon



ini menyebabkan deposisi melanin pada bulu burung dan kristal guanin pada kulit ikan. Jika tidak dibutuhkan hormon ini akan mengalami deiodinasi, di mana iodium akan disimpan kembali dalam koloid. Pada kondisi kekurangan maupun kelebihan iodium akan menyebabkan terjadi gangguan pada tiroid yang disebut goiter.



GAMBAR 5.6. Kelenjar tiroid (Gunstream, 2010: 206).

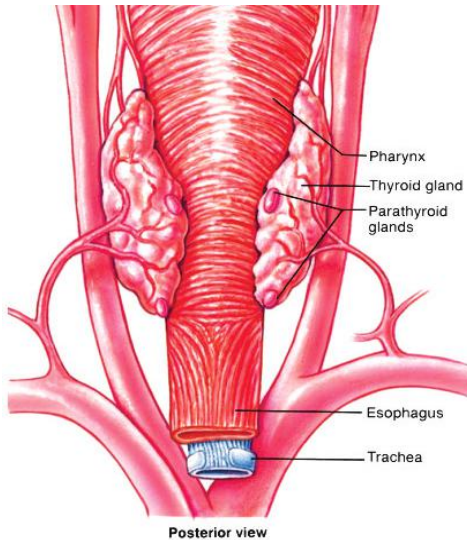
b. Kelenjar Paratiroid

Paratiroid merupakan kelenjar yang terletak sangat dekat dengan tiroid. Kelenjar ini berbentuk oval. Pada manusia terdapat dua pasang, satu pasang terdapat di permukaan belakang kelenjar tiroid. Kelenjar tiroid bekerja memproduksi hormon paratiroid hormon (parathormon) yang berfungsi mengatur kalsium darah dan kadar fosfat. Hormon parathormon meningkatkan kadar kalsium darah dengan cara:

- 1). Pengaruh langsung pada tulang, menyebabkan meningkatnya kecepatan refraktur dan merangsang hancurnya matriks tulang.
- 2). Pengaruh langsung pada ginjal, dengan cara meningkatnya reabsorpsi ion kalsium pada tubulus ginjal dan menghalangi reabsorpsi ion fosfat dari filtrat glomerulus ginjal.



- 3). Merangsang absorpsi kalsium pada usus kecil. Efek ini melibatkan vitamin D.
Sekresi hormon paratiroid distimulasi oleh penurunan jumlah kalsium darah.



GAMBAR 5.7. Kelenjar paratiroid (Gunstream, 2010: 207).

c. Kelenjar Adrenal

Adrenal merupakan sepasang organ yang terletak dekat kutub anterior ginjal, berbentuk gepeng bulan sabit. Adrenal terdiri dari dua daerah yaitu korteks, merupakan daerah perifer dan medula, merupakan lapisan tengah yang berwarna coklat kemerahan.

Korteks adrenal menghasilkan hormon:

- 1). Glukokortikoid, berfungsi meningkatkan gula darah, dengan cara memengaruhi metabolisme karbohidrat. Contohnya kortisol.
- 2). Mineralokortikoid, berfungsi merangsang reabsorpsi sodium dan ekskresi kalsium pada ginjal. Contohnya aldosteron. Kedua hormon ini disebut juga *catecolamin*. Pengeluaran hormon ini di bawah kontrol langsung susunan saraf otonom.



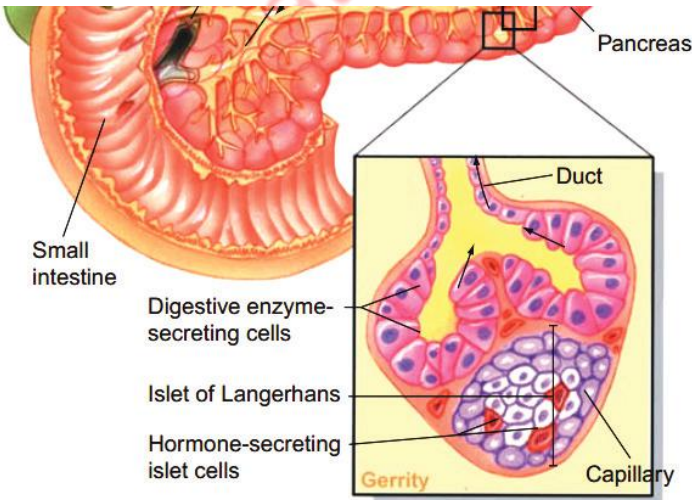
Daerah medula menghasilkan hormon:

- 1). Epinefrin, dikenal juga dengan adrenalin. Bekerja meningkatkan gula darah, penyempitan pembuluh darah di kulit dan ginjal.
- 2). Norepinefrin atau disebut juga norepinefrin, bekerja meningkatkan denyut jantung, penyempitan pembuluh darah seluruh tubuh.

d. Kelenjar Pankreas

Pankreas tidak hanya bekerja sebagai kelenjar eksokrin, juga sebagai kelenjar endokrin. Pulau Langerhans, yang terdiri dari kumpulan sel yang berperan menghasilkan hormon yang penting dalam metabolisme karbohidrat yaitu:

- 1). Insulin merangsang pemakaian gula oleh sel hati, otot dan sel lemak yang menyebabkan turunnya kadar gula.
- 2). Glukagon mempunyai fungsi yang berlawanan dengan insulin, selain itu juga mempunyai pengaruh pada metabolisme, tumbuh dan perkembangan.



GAMBAR 5.8. Kelenjar pankreas (Gunstream, 2010: 208).



3). Somatostatin mempunyai pengaruh pada fungsi lambung dan usus.

Pelepasan insulin dan glukagon sangat dipengaruhi oleh kadar gula darah, namun pada kondisi yang berlawanan.

e. Kelenjar Gonad

Gonad betina

Gonad betina disebut ovarium, terdiri dari sepasang kelenjar buntu, terletak dalam rongga panggul (pelvis). Di dalam ovarium ini terdapat bakal telur (ovum) pada berbagai tahap perkembangan dan sel soma yang berperan menyokong perkembangan bakal telur dan mengatur fungsi sistem reproduksi. Sebagai kelenjar endokrin sel soma ovarium berfungsi menghasilkan hormon di antaranya hormon pada tabel berikut:

TABEL 5.3. Hormon dan fungsinya yang dihasilkan oleh kelenjar gonad

Ovarium	<ul style="list-style-type: none"> - Estrogen - Progesteron - Testosteron - Inhibin 	<ul style="list-style-type: none"> - Efek ganda terhadap saluran reproduksi, buah dada, lemak, dan pertumbuhan tulang. - Efek ganda terhadap saluran reproduksi dan perkembangan buah dada. - Bahan biosintesa estrogen merangsang atresia folikel. - Menghambat sekresi FSH.
Plasenta	<ul style="list-style-type: none"> - Estrogen - Progesteron - Human chorionic gonadotrophic - Human plasental lactogen (somatomammotropik) 	<ul style="list-style-type: none"> - Efek ganda terhadap saluran reproduksi, buah dada, lemak, dan pertumbuhan tulang. - Efek ganda terhadap saluran reproduksi & perkembangan buah dada. - Mempertahankan aktivitas korpus luteum. - Merangsang pertumbuhan mammae & korpus luteum selama hamil.

Gonad jantan

Testis terdapat sepasang, tertanam dalam kantung skrotum. Di dalam gonad ditemukan dua macam sel seperti halnya pada ovarium, yaitu sel yang akan berkembang jadi sperma dan sel soma penyokong. Sel soma ditemukan dua macam yaitu: *sel Leydig*, tempat sintesa hormon testosteron dan sel sertoli, bukan merupa-



kan tempat sintesa hormon, namun hormon yang sampai kini akan diubah menjadi dihidrotestosteron dan estradiol yang akhirnya akan masuk dalam peredaran darah.

f. Beberapa Kelenjar dan Jaringan Tubuh yang Lainnya

Beberapa kelenjar dan jaringan tubuh lainnya yang mengeluarkan hormon dan merupakan bagian dari sistem endokrin. Kelenjar tersebut adalah pineal, timus kelenjar, dan kelenjar kecil tertentu di lapisan lambung dan usus kecil. Selain itu, plasenta adalah organ endokrin sementara yang penting selama kehamilan.

Kelenjar pineal berbentuk kerucut nodul jaringan endokrin yang terletak di otak antara belahan otak dekat atap ventrikel ketiga. Kelenjar ini mengeluarkan hormon melatonin yang tampaknya menghambat sekresi hormon gonadotropik dan dapat membantu mengendalikan permulaan pubertas. Melatonin tampaknya mengatur siklus tidur dan bioritme lain yang terkait dengan pergantian siang dan malam. Sekresi melatonin diatur oleh paparan cahaya dan kegelapan. Saat terkena cahaya, impuls dari retina mata sedang dikirim ke kelenjar pineal, menyebabkan penurunan produksi melatonin. Sekresi paling hebat di malam hari dan terendah dalam sehari.

Kelenjar timus terletak di mediastinum jantung. Ukurannya besar pada bayi dan anak-anak tetapi sangat berkurang pada orang dewasa. Kelenjar memainkan peran penting dalam pengembangan imunitas. Timus menghasilkan hormon *thymosin* yang terlibat dalam pematangan limfosit T.

E. MEKANISME KERJA HORMON

Jenis hormon apa pun untuk menimbulkan efek biologi harus berinteraksi dengan reseptor spesifiknya. Reseptor biasanya adalah sebuah molekul protein panjang yang memiliki bentuk khas yaitu tiga dimensi dan hanya akan mengikat sebuah hormon khusus atau analog dari hormon itu. Tempat-tempat reseptor untuk hormon berada pada salah satu dari membran sel atau sitoplasma. Kerja spesifik dari hormon sangat jelas di mana hanya sel-sel khusus yang akan dipengaruhi oleh hormon-hormon khusus. Jika



reseptor tidak ada dari suatu sel maka sel tidak berespons terhadap hormon. Hormon terikat kepada reseptor di permukaan sel atau di dalam sel. Ikatan antara hormon dan reseptor akan mempercepat, memperlambat atau mengubah fungsi sel. Pada akhirnya hormon mengendalikan fungsi dari organ secara keseluruhan misalnya mengendalikan pertumbuhan dan perkembangan, perkembangbiakan dan ciri-ciri seksual, hormon memengaruhi cara tubuh dalam menggunakan dan menyimpan energi dan lain-lain.

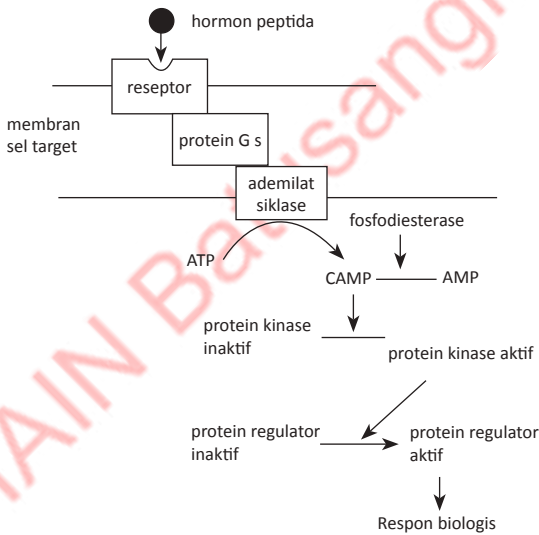
1. Mekanisme Kerja Hormon dengan Reseptor yang Terletak di Membran Sel

Hormon yang tergolong kelompok peptida dan protein dan sebagian besar kombinasi derivat asam amino akan bekerja pada sel target dengan terlebih dahulu berikatan dengan reseptor yang ada di membran sel target. Interaksi hormon dan reseptor tersebut akan menyebabkan perubahan pada berbagai fungsi seluler. Hormon dengan struktur kimia berupa molekul peptida, protein dan derivat asam amino memiliki sifat hidrophilik yang dengan mudah larut dalam pelarut seperti pada cairan tubuh, dan memiliki kemampuan yang rendah untuk larut pada pelarut organik. Sifat kimia dari hormon yang demikian menyebabkannya sulit untuk melintasi membran sel target secara langsung sehingga membutuhkan reseptor spesifik.

Hormon yang berikatan dengan reseptornya mirip dengan sebuah kunci dan anak kunci. Mekanisme ikatan tersebut akan menginisiasi serangkaian reaksi biokimia yang pada akhirnya akan menimbulkan respons biologis. Langkah awal dari serangkaian reaksi ini adalah mengaktifkan protein lainnya yang berada di membran yang disebut dengan protein G yang terdiri atas tiga subunit. Satu subunit mengikat substansi *diphospat guanosine* (GDP) karena itu dinamakan dengan G protein. Aktivasi G protein oleh kompleks reseptor dan hormon akan menyebabkan fosforilasi dari GDP menjadi GTP (*Guanosin Triphosphate*). Selanjutnya akan terjadi perubahan konformasi pada G protein dan sebagai akibatnya G protein akan terpisah-pisah menjadi subunit-subunit



penyusunnya. Subunit-subunit yang memiliki ikatan masing-masingnya dengan GTP akan mengaktifasi enzim yang ada di membran yaitu enzim adenilat siklase. GTP akhirnya kembali diubah menjadi GDP oleh aktivitas GTPase dari G protein dan sebagai akibatnya G protein kembali ke konformasi awalnya. Proses ini menghabiskan waktu beberapa detik dan menyebabkan aktivasi molekul *adenylate cyclase* dalam jumlah yang banyak. *Adenylate cyclase* menyebabkan lepasnya fosfat dari ATP sehingga ATP menjadi cAMP (*Cyclic adenosine monophosphate*). Fungsi dari cAMP adalah untuk mengaktifkan enzim lainnya yang disebut protein kinase. Setelah melakukan kerja tersebut, cAMP akan dirombak menjadi AMP oleh enzim *phosphodiesterase*.



GAMBAR 5.9. Rangkaian mekanisme kerja hormon peptida dan protein yang memiliki reseptor di membran sel target yang akhirnya menimbulkan respons biologis.

Kinase adalah enzim yang mefosforilasi molekul lainnya dan protein kinase yang teraktivasi akan mencari substansi yang akan difosforilasinya. Ini adalah akhir dari proses fosforilasi yang menghasilkan respons biologi dari hormon yang terikat dengan mem-



bran sel. Substansi yang difosforilasi adalah protein dan efek dari proses fosforilasi adalah perubahan konformasinya. Jika protein tersebut misalnya adalah *channel* ion, maka fosforilasinya akan menyebabkan perubahan konformasi dari kondisi menutup menjadi terbuka. Hal ini akan menyebabkan terjadinya pergerakan ion-ion melalui membran sebagai salah satu respons fisiologis yang diharapkan dari kerja hormon tersebut. Berikut ini adalah proses lainnya yang mungkin diubah oleh hormon dengan mekanisme yang sama seperti yang telah dijelaskan, yaitu: (1) aktivasi enzim, contohnya terjadi perubahan jalur metabolik; (2) aktivasi dari mekanisme transpor aktif, misalnya suatu substansi diserap sel; (3) aktivasi pembentukan mikrotubul, hal ini merupakan langkah awal dari sekresi substansi; (4) metabolisme DNA mungkin diubah, hal ini penting pada pertumbuhan dan pembelahan sel.

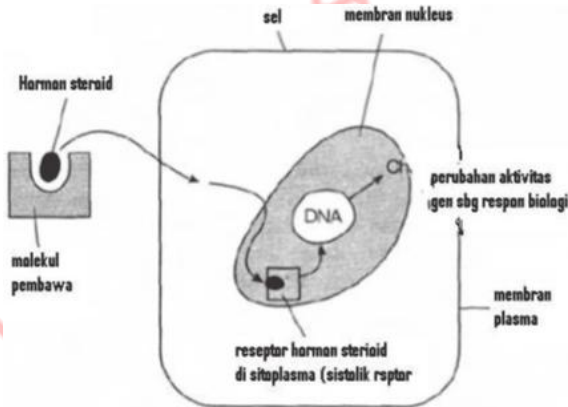
Pada mekanisme kerja hormon yang telah dijelaskan tadi, cAMP diistilahkan sebagai molekul pembawa pesan kimiawi kedua (*second messenger molecule*), dan hormon menjadi pembawa pesan pertama. Sekarang dikenal bahwa banyak substansi lainnya dapat berfungsi sebagai molekul pembawa pesan kimiawi kedua dalam sel. Contohnya adalah *phospholipase C* yang berada di membran. Enzim ini akan memicu perubahan membran lipid *phosphatidyl inositol biphosphate* (PIP₂) menjadi *diacylglycerol* (DAG) dan *inositol triphosphate* (IP₃) yang keduanya memiliki fungsi sebagai molekul *messenger* kedua.

2. Mekanisme Kerja Hormon yang Memiliki Reseptor Sitosolik (di Sitoplasma)

Hormon steroid dan beberapa hormon derivat asam amino (seperti *thyroxin* dihasilkan dari kelenjar tyroid pada mamalia) memiliki reseptor yang terletak di sitoplasma atau disebut reseptor sitosolik. Hormon dalam kelompok ini memiliki kemampuan yang tinggi untuk larut dalam lemak dan sangat mudah untuk melintasi membran plasma dari sel target. Ada beberapa perdebatan mengenai bagaimana hormon menghasilkan respons biologi, tetapi yang lebih dahulu bahwa hormon tiba di sel target dengan perantara



beberapa molekul pembawa (karier) tertentu. Jika suatu hormon bersifat larut dalam lemak, maka akan sulit untuk terlarut dalam cairan tubuh yang mengandung air sehingga keberadaan molekul karier memang diperlukan. Hormon akan terlepas dari molekul pembawanya dan akan masuk dengan bebas ke dalam sel target. Di sitoplasma sel target, hormon akan berkombinasi dengan reseptor spesifik dan interaksi ini akan membentuk kompleks hormon dan reseptor. Kompleks hormon dan reseptor yang teraktivasi sangat afinitif terhadap DNA. Kompleks tersebut akan masuk ke nukleus dan berkombinasi dengan reseptor yang berasosiasi dengan DNA sehingga akan menginisiasi perubahan pada transkripsi DNA. Posisi spesifik dari reseptor di DNA belum diketahui secara pasti akan tetapi diduga kuat bahwa reseptor tersebut berada pada daerah yang disebut promotor region. Melalui ikatan dengan tempat tersebut pada DNA, maka kerjanya sangat memungkinkan untuk mengubah gen-gen tertentu menjadi aktif atau non-aktif.



GAMBAR 5.10. Rangkaian mekanisme kerja hormon steroid yang memiliki reseptor di sitoplasma dan di DNA sel target yang akhirnya menimbulkan respons biologis.

Secara keseluruhan, fungsi hormon steroid adalah menstimulasi atau menekan produksi protein. Hormon-hormon tersebut mampu untuk mengaktifkan gen atau menonaktifkannya. Protein



yang dihasilkan akan memodifikasi proses-proses biokimiadi dalam sel, dan akan menghasilkan efek biologis hormon. Sebagai contoh, protein yang dihasilkan adalah enzim yang akan memengaruhi metabolisme sel. Hal ini berarti salah satu dari jalur metabolisme sel akan mengalami peningkatan atau terhenti sama sekali. Kendati prosesnya untuk menghasilkan efek biologis lebih sederhana dari pada hormon peptida, aksi hormon steroid cenderung lebih lambat.

F. RINGKASAN

1. Endokrin atau hormon merupakan suatu zat kimia khusus, disintesis oleh sel-sel hidup di dalam kelenjar, disekresikan langsung ke dalam darah untuk ditransportasikan menuju organ sasaran, berfungsi sebagai regulasi fisiologis dan sudah efektif dalam jumlah yang sedikit.
2. Kelenjar penghasil hormon pada vertebrata adalah hipotalamus, kelenjar pineal, pituitari, tiroid, paratiroid, timus, adrenal pankreas, ovari, dan testis. Kelenjar penghasil hormon pada invertebrata berupa korpus kardiakum.
3. Hormon diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok besar yaitu peptida atau protein, derivat asam amino dan kelompok steroid.
4. Hewan invertebrata mengandalkan sistem kontrol neuroendokrin dalam meregulasi fisiologi tubuhnya. Kelompok invertebrata yang lebih tinggi seperti moluska memiliki sistem sirkulasi yang lebih berkembang dibandingkan dengan hewan invertebrata yang lebih rendah seperti pada cacing pipih, oleh karena itu mereka memiliki lebih banyak mekanisme untuk mendistribusikan hormon-hormon yang diperlukannya. Sel-sel neurosekresi terdapat pada terutama hewan rendah kecuali hewan bersel satu.
5. Insekta memiliki *hormon juvenile*, PTTH dan ecdison. JH yang dihasilkan di *corpora allata* berperan mempertahankan fase larva. Hormon *Prothoraciotropic* (PTTH) yang dihasilkan oleh dua pasang massa sel di bagian otak larva dan berfungsi pem-



bentukan pupa dan *molting*. Ekdison dihasilkan oleh protorak, berperan dalam proses *molting*.

6. Vertebrata memiliki organ endokrin yang lengkap. Tipe sistem endokrin pada vertebrata terdiri dari tiga kelenjar utama yaitu: hipotalamus, kelenjar pituitari dan kelenjar perifer endokrin.
7. Hipotalamus berperan dalam mengendalikan kelenjar pituitari, sementara pituitari berperan dalam mengendalikan kelenjar endokrin lainnya. Oleh karena itu, hipotalamus disebut kelenjar induk (*master of gland*).
8. Kelenjar pituitari terbagi tiga yaitu lobus anterior, posterior, dan intermediet.
9. Kelenjar perifer terdiri dari tiroid, paratiroid, adrenal, testis, ovari, pineal, plasenta.
10. Hormon yang tergolong kelompok peptida dan protein dan sebagian besar kombinasi derivat asam amino akan bekerja pada sel target dengan terlebih dahulu berikatan dengan reseptor yang ada di membran sel target. Mekanisme ikatan tersebut akan menginisiasi serangkaian reaksi biokimia yang pada akhirnya akan menimbulkan respons biologis.
11. Hormon steroid dan beberapa hormon derivat asam amino (seperti *thyroxin* dihasilkan dari kelenjar tiroid pada mamalia) memiliki reseptor yang terletak di sitoplasma atau disebut reseptor sitosolik. Hormon akan terlepas dari molekul pembawanya dan akan masuk dengan bebas ke dalam sel target. Di sitoplasma sel target, hormon akan berkombinasi dengan reseptor spesifik dan interaksi ini akan membentuk kompleks hormon dan reseptor. Kompleks hormon dan reseptor yang teraktivasi sangat afinitif terhadap DNA. Kompleks tersebut akan masuk ke nukleus dan berkombinasi dengan reseptor yang berasosiasi dengan DNA sehingga akan menginisiasi perubahan pada transkripsi DNA. Posisi spesifik dari reseptor di DNA belum diketahui secara pasti akan tetapi diduga kuat bahwa reseptor tersebut berada pada daerah yang disebut promotor region. Melalui ikatan dengan tempat tersebut pada



DNA, maka kerjanya sangat memungkinkan untuk mengubah gen-gen tertentu menjadi aktif atau non-aktif.

G. LATIHAN

1. Jelaskan pengertian hormon dan ciri-cirinya!
2. Jelaskan klasifikasi hormon berdasarkan strukturnya dan berdasarkan pengaruhnya beserta contohnya masing-masing!
3. Jelaskan dua macam mekanisme kerja hormon!
4. Jelaskan maksud dari *second messenger*!
5. Tuliskan hormon yang disekresikan oleh hipotalamus!
6. Jelaskan perbedaan antara adenohipofisis dan neurohipofisis!
7. Jelaskan hormon pada serangga dan peranan masing-masing hormon tersebut!

H. REFERENSI

- Faria, S. C., Provete, D. B., Thurman, C. L., & Mcnamara, C. (2017). Phylogenetic patterns and the adaptive evolution of osmoregulation in fiddler crabs, 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171870>
- Gunstream, S. (2010). *Anatomy dan Physiology with Integrated Study Guide* (Fourth Edi). New York: McGraw-Hill.
- Kay, I. (1998). *Introduction to Animal Physiology*. USA: Bios Scientific Publisher Limited.
- Randall, D, Burggren, French, K. (1997). *Eckert Animal Physiology: Mechanism and Adaptation*. New York: W. H. Freeman and Company.
- Rastogi, S. (2007). *Essentials of Animal Physiology* (Fourth Edi). New Delhi: New Age International (P) Ltd.
- Schmidt-Nielsen, K. (1980). *Animal Physiology: Adaptation and environment* (Second Edi). USA: Cambridge University Press.
- Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, P. (2013). *Animal Physiology From Genes to Organisms* (Second Edi). USA: Yolanda Cossio.



IAIN Batusangkar

VI

BAB

SISTEM REPRODUKSI

Pada Bab VI ini pembelajar diharapkan mampu memahami sistem reproduksi hewan, peranan sistem reproduksi, mekanisme reproduksi, organ reproduksi jantan dan betina, spermatogenesis dan oogenesis, hormon yang mengontrol reproduksi, siklus menstruasi dan proses kehamilan dan proses melahirkan.

Reproduksi merupakan salah satu karakter kunci dari makhluk hidup untuk mempertahankan eksistensi spesies dari waktu ke waktu. Kemampuan hewan untuk menghasilkan keturunan yang viabel terkait erat dengan kemajuan evolusinya. Penyusunan kembali gen-gen, yang mungkin terjadi selama reproduksi, telah memberikan peluang untuk munculnya variasi-variasi dari berbagai karakter yang dimiliki oleh hewan. Hal ini juga mengisyaratkan bahwa proses reproduksi berhubungan erat dengan genetik dan perkembangan. Dua proses fisiologi reproduksi adalah reproduksi aseksual dan reproduksi seksual.

A. MEKANISME REPRODUKSI

1. Reproduksi Aseksual (Vegetatif)

Reproduksi aseksual berlangsung dengan tanpa adanya interaksi sel-sel gamet. Secara esensial, proses reproduksi aseksual merupakan manifestasi dari proses mitosis yang hanya melibatkan satu individu parental saja. Reproduksi aseksual dapat menghasilkan keturunan dalam jumlah yang banyak dan tidak memerlukan pasangan individu sehingga hambatan-hambatan reproduksi lebih

sedikit, akan tetapi variasi genetik dari turunannya sangat rendah atau bahkan seragam. Adapun reproduksi seksual membutuhkan keberadaan pasangan kawin yang sesuai, dan kecocokan-kecocokan seksual yang harus terpenuhi sebelum perkawinan berlangsung sehingga lebih banyak hambatan yang terjadi.

Reproduksi aseksual umumnya hanya terjadi pada hewan-hewan invertebrata dan beberapa hewan vertebrata. Secara spesifik reproduksi aseksual meliputi mekanisme sebagai berikut:

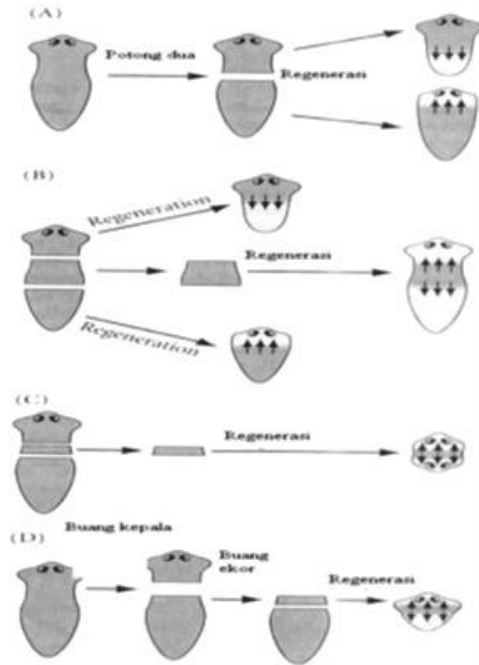
- a. Pembelahan biner (*binary fission*), contohnya pada *Amoeba proteus* dan anemon laut.



GAMBAR 6.1. Reproduksi aseksual anemon laut. Individu pada bagian tengah pada foto ini sedang membelah. Dua individu yang lebih kecil akan segera terbentuk. Keturunan yang dihasilkan merupakan salinan genetik dari sang induk.

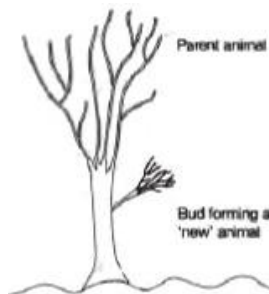
- b. Fragmentasi yaitu perkembangan bagian tubuh yang rusak menjadi individu baru yang sempurna, contohnya pada *Planaria*.





GAMBAR 6. 2. Proses fragmentasi pada Planaria sebagai salah satu proses reproduksi vegetatif (aseksual)

- c. Tunas (*budding*) yaitu pembentukan tunas dari tubuh induk yang selanjutnya dapat lepas dan berkembang menjadi individu baru yang independen, contohnya pada *Hydra* sp.



GAMBAR 6. 3. Proses pembentukan tunas (*budding*) pada *Hydra* sp.



- d. Sporulasi (pembentukan spora) yaitu dengan membentuk spora dalam jumlah yang banyak, contohnya pada *Plasmodium* sp.
- e. Paedogenesis yaitu perkembangbiakan pada hewan muda atau larva yang individu-individu barunya berasal dari sel tubuh, contohnya pada larva *Fasciola hepatica* (cacing hati).
- f. *Parthenogenesis* adalah mekanisme pertumbuhan dan perkembangan embrio tanpa fertilisasi oleh jantan. Biasanya terdapat pada kelompok invertebrata seperti lebah madu, kelompok vertebrata seperti pada kadal, salamander, ikan dan kadang pada ayam kalkun. Pergantian reproduksi antara partenogenesis dengan reproduksi seksual disebut heterogami.

Parthenogenesis alami terjadi secara reguler dan konstan dalam siklus hidup suatu hewan. *Parthenogenesis* alami terbagi menjadi tipe sempurna dan tidak sempurna. Ini ditemukan pada serangga tertentu di mana tidak terdapat fase seksual dan tidak ada jantan sama sekali sehingga reproduksinya hanya tergantung kepada proses *parthenogenesis*. Tipe artifisial (*parthenogenesis* siklik) yaitu dalam siklus hidupnya terjadi pergantian antara fase seksual dan fase *parthenogenesis* secara bergilir. Misalnya pada *Hymenoptera* terdapat telur yang dibuahi menjadi individu betina, sedangkan telur yang tidak dibuahi akan menjadi jantan.

Parthenogenesis juga dapat diinduksi dengan memberikan perlakuan khusus terhadap telur. Induksi dapat dilakukan secara kimiawi maupun fisik. Secara fisik misalnya dengan mengatur temperatur (misal dari 30°C ditukar menjadi 10°C), tegangan listrik, UV, pemisahan dengan jarum *glass*. Secara kimiawi dapat digunakan kloroform, ion K, Ca, Na, Mg, asam butirat, air laut hipertonik, dan pelarut lemak.

2. Reproduksi Seksual

Pada proses reproduksi terjadi rekombinasi material genetik dari dua sel gamet induk sehingga dihasilkan sel anak yang unik dan berbeda dengan induknya. Pada vertebrata, yang hidup di air melakukan fertilisasi di luar tubuh (fertilisasi eksternal), contohnya ikan dan katak. Vertebrata yang hidup di darat melakukan pem-



buahannya di dalam tubuh (fertilisasi internal). Pada mamalia jantan, alat kelaminnya disebut penis. Pada reptil seperti cicak dan kadal menggunakan hemipenis (penis palsu), sedang pada bangsa burung misalnya bebek, untuk menyalurkan sperma menggunakan ujung kloaka.

Pada hewan yang melakukan fertilisasi internal dikenal adanya tiga macam perkembangan embrio yaitu:

- a. Ovipar/bertelur: Bila embrio berkembang di dalam telur. Misalnya: pada jenis-jenis burung dan ikan.
- b. Ovovivipar/bertelur dan beranak: bila embrio berkembang di dalam telur yang diinkubasi dalam tubuh dengan sumber nutrisi berasal dari telur. Misalnya pada beberapa jenis ikan hiu, dan kadal (*Maboya* sp.).
- c. Vivipar/beranak: Bila embrio tumbuh dan berkembang di dalam uterus dan mendapat nutrisi dari induknya melalui plasentasanya. Misalnya pada beberapa jenis mamalia.

Sistem reproduksi vertebrata meliputi hipotalamus, gonad, dan sistem reproduksi. Organ reproduksi primer, atau gonad, sebagian besar vertebrata terdiri dari testis pada jantan dan ovarium pada betina. Pada kedua jenis kelamin vertebrata, gonad dewasa ditemukan memiliki fungsi ganda (1) memproduksi gamet (Gametogenesis), yaitu, spermatozoa (sperma) pada jantan dan ovum (telur) pada betina, dan (2) menyekresi hormon seks, terutama testosteron pada jantan dan estrogen (estradiol) dan progesteron pada betina. Namun, jantan juga mensintesis estrogen dan betina menyintesis testosteron. Misalnya, pria membutuhkan estrogen untuk pemeliharaan tulang dan produksi sperma; wanita membutuhkan testosteron untuk libido.

Selain gonad, sistem reproduksi jantan dan betina termasuk saluran reproduksi yang mencakup suatu sistem saluran yang khusus untuk mengangkut atau menampung gamet setelah dilepaskan, ditambah kelenjar seks aksesori. Pada serangga, kelenjar aksesori adalah struktur sekretori tubular berpasangan yang melepaskan sekresi mereka ke saluran genital. Pada mamalia betina ditemukan kelenjar mammae dan kelenjar prostat pada mamalia jantan.



Bagian reproduksi yang terlihat secara eksternal dikenal sebagai genitalia eksternal dan bagian internal disebut genitalia internal. Anatomi organ reproduksi berhubungan dengan karakteristik strategi reproduksi untuk spesies tertentu. Organ reproduksi betina sangat berbeda dengan hewan jantan.

Pada beberapa spesies, karakteristik eksternal vertebrata yang tidak terlibat secara langsung dalam reproduksi itu sendiri, dapat digunakan untuk membedakan jantan dan betina. Karakteristik tersebut dapat berupa perawakan tubuh, distribusi rambut, pewarnaan bulu, dan alat seksual. Karakteristik seksual sekunder berperan penting dalam perilaku menarik pasangan dan kawin. Tanduk rusa misalnya sangat berguna untuk melawan rusa jantan yang lain dan membangun dominasi dalam koloni. Karakteristik ini muncul berkaitan dengan fungsi testosteron pada hewan jantan dan estrogen pada hewan betina.

B. ORGAN REPRODUKSI VERTEBRATA

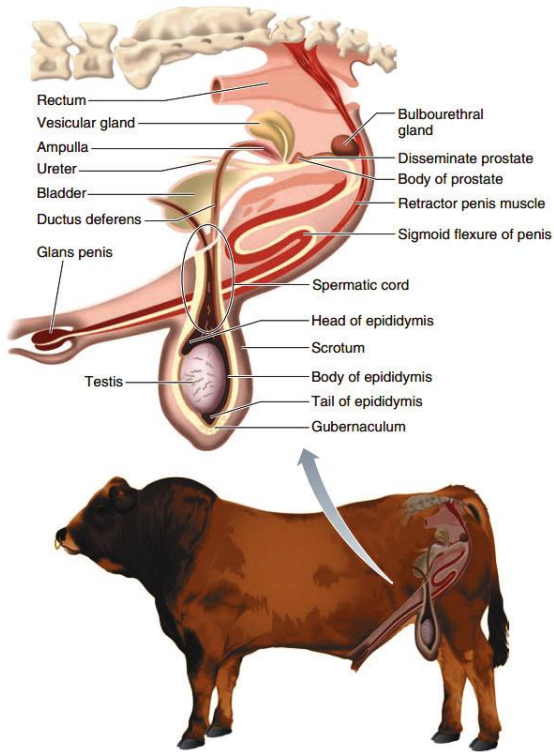
Organ-organ yang termasuk ke dalam sistem reproduksi cukup kompleks dan berbeda antara organ jantan (genitalia maskulus) dan organ betina (genitalia femina). Organ-organ tersebut meliputi unit produksi sel gamet, unit perkembangan embrio dan alat kopulasi serta penghasil hormon-hormon seks.

1. Sistem Reproduksi Jantan

Sistem reproduksi jantan terdiri dari:

- a. Gonad, yaitu testis berfungsi sebagai penghasil gamet jantan, sperma dan hormon yang terkait dengan reproduksi seperti testosteron. Gonad terutama dibangun oleh lobus-lobus di mana di dalamnya terdapat satu hingga empat tubulus (saluran) seminiferus. Pada manusia terdapat lebih kurang 250 tubulus seminiferus. Pada dinding tubulus tertanam bakal sperma.
- b. Sistem saluran (duktus) antara lain duktus eferen, duktis epididimis duktus deferen dan duktus ejakulasi.
- c. Kelenjar eksokrin, vesikula seminalis dan kelenjar prostat.
- d. Penis yang berfungsi sebagai alat kopulasi.





GAMBAR 6.4. Struktur organ kelamin jantan pada mamalia (sapi) (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 762).

Pada sebagian besar mamalia, organ penghasil sperma (testis), berada di luar rongga perut dalam kantung yang tertutup kulit yaitu skrotum. Pada ikan, testis berpasangan terletak dalam membran rongga tubuh bagian punggung. Sistem reproduksi pria dirancang untuk memproduksi sperma ke saluran reproduksi betina dalam kendaraan semen cair, agar dapat menjamin kelangsungan hidup sperma. Pada mamalia, sekresi dari kelenjar seks aksesori jantan yaitu vesikula seminalis, kelenjar prostat, dan kelenjar *bulbourethral* yang menyediakan sebagian besar cairan mani. Penis, atau hemipenis pada burung adalah organ yang digunakan untuk menyimpan semen pada betina.



Sperma keluar dari testis mamalia melalui *vasa efferentia*, *epididymis*, *ductus (vas) deferens*, saluran ejakulasi, dan uretra, yang terakhir menjadi kanal yang membentang sepanjang penis. Pada burung, *vasa efferentia* melewati sperma dari testis ke saluran epididimis yang berukuran pendek yang kemudian dilanjutkan ke *vas deferens*, di mana ia akhirnya membuka ke area yang membesar sebelum memasuki kloaka. Baik *vas deferens* maupun daerah yang membesar berfungsi sebagai situs penyimpanan sperma.

2. Sistem Reproduksi Betina

Sistem reproduksi betina terdiri atas gonad dan saluran reproduksi. Saluran reproduksinya termodifikasi untuk tempat masuknya sperma dan tempat perkembangan embrio. Secara spesifik organ reproduksi tersebut adalah:

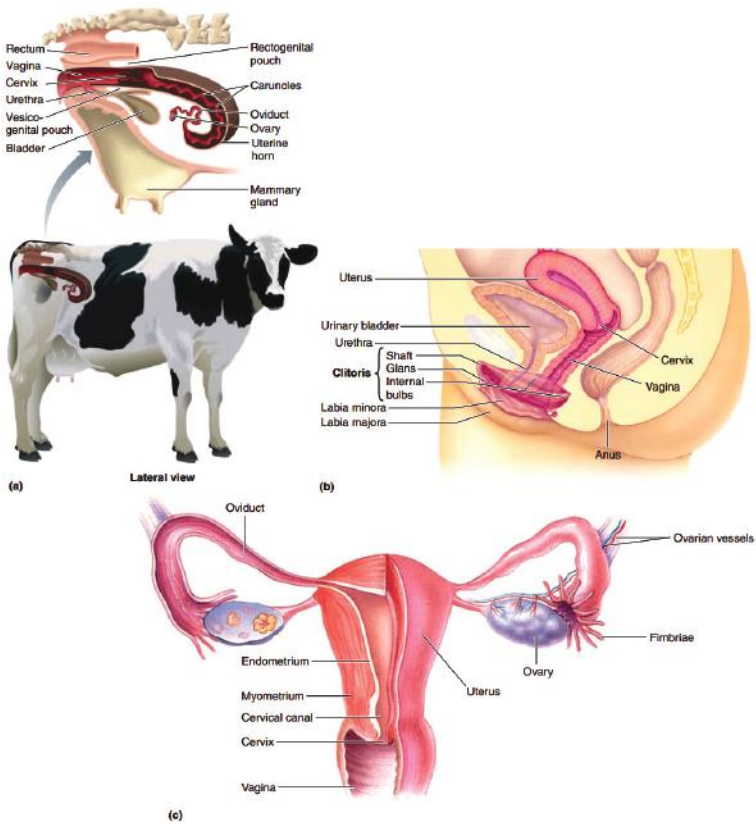
- a. Gonad, terdiri dari sepasang ovari, yang berfungsi sebagai penghasil ovum dan hormon reproduksi seperti estrogen dan progesteron. Dalam ovarium ini terdapat oosit dengan berbagai ukuran dan tingkat perkembangan.
- b. Saluran reproduksi, yang terdiri dari tuba falopi, uterus di mana embrio tertanam saat hamil, serviks dan vagina.

Peran sistem reproduksi betina lebih rumit daripada jantan, terutama pada hewan yang fertilisasinya internal. Struktur utama saluran reproduksi betina pada burung dan mamalia adalah vagina, serviks, uterus, saluran telur, dan genitalia eksterna. Ovarium terletak di dalam panggul dan rongga perut. Fungsi reproduksi wanita yang penting meliputi:

- a. Produksi sel telur (oogenesis) dan ovulasi dalam ovarium (walaupun pengelolaan oosit yang diovolusi tergantung pada spesies).
- b. Penerimaan sperma.
- c. Transportasi sel sperma menuju telur.
- d. Melahirkan anak.
- e. Memelihara keturunan melalui produksi susu (laktasi) pada mamalia.



- f. Pada marsupial memiliki peran tambahan: memelihara janin yang sedang berkembang secara internal sampai dapat bertahan di dunia luar melalui plasenta.



GAMBAR 6.5. Struktur organ kelamin betina pada mamalia (sapi) dan manusia (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 763).

Pada mamalia, oviduk berperan menangkap sel telur pada saat ovulasi dan berfungsi sebagai tempat fertilisasi jika fertilisasi secara internal. Pada beberapa vertebrata, saluran telur dilapisi dengan sekretori dan sel bersilia, yang menyediakan lingkungan yang cocok untuk sel telur dan membantu mengangkut spermato-



zoa. Bagian masing-masing saluran mamalia yang berdekatan dengan ovariumnya masing-masing mengembang membentuk infundibulum, struktur tipis, berbentuk corong yang menangkap telur setelah terlepas dari ovarium. “Menangkap” telur melibatkan partisipasi aktif pada bagian infundibulum dan bukan hanya proses pasif di mana telur disalurkan ke saluran telur.

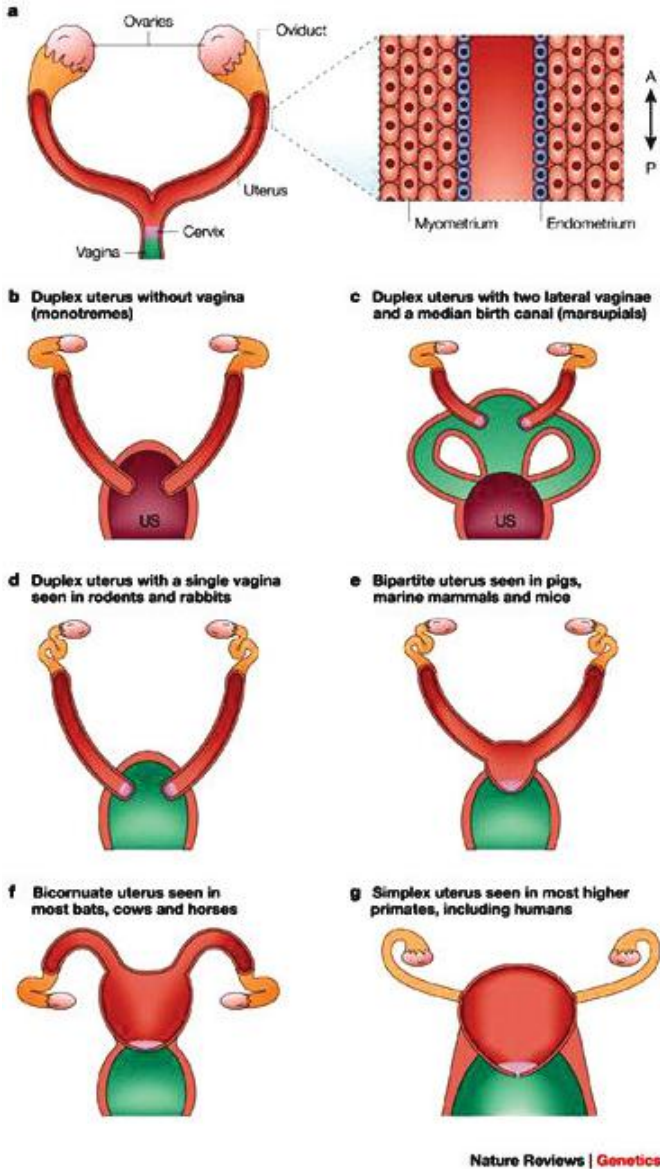
Produk fertilasi dikenal sebagai embrio (zigot sebelum pembelahan sel), di mana pada perkembangan awal terjadi diferensiasi jaringan, pembentukan sistem organ dan plasenta. Embrio kemudian berkembang menjadi janin yang terhubung ke ibu melalui plasenta selama masa kehamilan. Pada mamalia, uterus berinding tebal berfungsi sebagai struktur pelindung dan nutrisi untuk menjaga janin. Variasi yang cukup besar ada di antara spesies berkenaan untuk organisasi anatomi saluran telur dan uterus.

Ada tiga struktur anatomi uterus pada mamalia yaitu uterus simpleks (primata) dengan satu tubuh uterus, uterus bikornuata (anjing, kuda betina, sapi) dengan uterus kecil tubuh dan dua tanduk uterus atau *cornua*, dan uterus dupleks (marsupial, kelinci), dengan dua kanal serviks yang terpisah setiap tanduk uterus ke dalam kompartemen yang berbeda (Kay, 1998: 440). Korpus itu relatif besar pada kuda betina, kurang luas pada sapi dan domba, dan kecil pada anjing dan babi sementara pada beberapa spesies, seperti seperti tikus dan kelinci, tidak ada tubuh rahim.

Pada vertebrata ovipar dan ovovivipar, oviduk adalah tempat untuk pengendapan bahan telur non-embriolik (albumin). Pada burung dan reptil, uterus berfungsi sebagai kelenjar sel untuk kalsifikasi lapisan luar telur. Bagian ekor rahim adalah serviks, yang memproyeksikan ke dalam vagina. Kanalis servikal, satu kecil pembukaan, berfungsi sebagai tempat pengendapan semen pada beberapa spesies atau sebagai jalur untuk sperma yang disimpan di anterior vagina.

Selama kehamilan, serviks mamalia secara efektif menutup lubang luar rahim, menghasilkan lendir kental yang mencegah masuknya benda asing ke dalam rahim. Leher rahim menjadi sangat melebar selama proses kelahiran, karena berfungsi sebagai jalan untuk pengiriman janin dari rahim ke vagina. Vagina, tabung ber-





GAMBAR 6.6. Tipe uterus hewan (Kobayashi & Behringer, 2003: 974).



otot, yang dapat meluas yang menghubungkan uterus ke lingkungan eksternal terutama merupakan organ kopulasi dan berfungsi sebagai wadah untuk sperma.

Alat kelamin eksternal perempuan secara kolektif disebut sebagai vulva pada mamalia. Pada manusia dan monyet, dua pasang lipatan kulit, labia minora dan labia majora, mengelilingi bukaan vagina dan uretra lateral. Minora homolog dengan preputium jantan, sedangkan majora adalah homolog skrotum jantan. Pada mamalia, klitoris, struktur ereksi yang terdiri dari jaringan yang homolog dengan penis, terletak di ujung anterior lipatan labia minora.

Bagian kloaka dari burung homolog dengan vulva mamalia. Kloaka berfungsi sebagai hal biasa yaitu jalur untuk produk kemih, tinja, dan reproduksi.

C. ORGAN REPRODUKSI INVERTEBRATA (SERANGGA)

Sistem reproduksi pada serangga termasuk organ neuroendokrin, gonad, dan saluran reproduksi. Sistem reproduksi serangga jantan terdiri dari sepasang testis, vesikula seminalis, dan kelenjar aksesori. Sebagian besar serangga memiliki sepasang kelenjar aksesori kecuali belalang gurun yang dapat memiliki hingga 15 pasang. Sekresi dari kelenjar aksesori mungkin termasuk penyedia nutrisi ke betina dan cairan mani yang berfungsi sebagai pembawa spermatozoa atau untuk membentuk kapsul yang mengandung sperma (spermatofor). Vas efferens dan vas deferens terhubung dengan tabung sperma (spermatogenesis) ke ejakulasi saluran.

Pada banyak spesies seperti lebah, setelah kawin atau kopulasi terbentuk plug (sumbat) kopulasi (juga ditemukan di beberapa vertebrata), agar tidak kehilangan air mani dari saluran betina dan masuknya sperma ke dalam vagina (ruang genital) dari pejantan yang bersaing. Kontraksi saluran wanita kemudian mengangkut spermatozoa ke spermatheca, organ yang menyimpan sperma sebelumnya masuk ke dalam vagina.

Sistem reproduksi serangga betina terdiri dari sepasang ovarium, suatu sistem saluran di mana telur akan dikeluarkan, kelen-



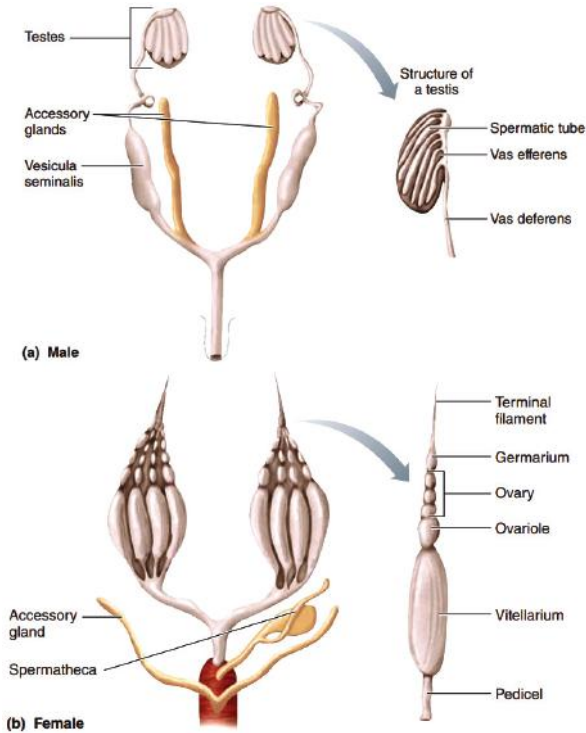
jar aksesori, dan *spermatheca*. Ada tiga jenis ovarium serangga: bentuk ankestral/panoistik, ovarium yang tidak memiliki perawat sel-sel (sel-sel yang memberikan nutrisi pada oosit awal); meroistik, di mana ovarium memiliki indung telur dan sel perawat. Ada dua subdivisi ovarium meroistik yaitu telotrofik, di mana sel-sel perawat ditemukan di germarium, dan polytrophic, di mana sel-sel perawat tertutup dalam folikel. Germarium membentuk bagian anterior ovariole dan di bagian penghasil sel telur ovarium inilah terjadi pembelahan sistosit dan kelompok-kelompok sistosit menjadi diselimuti oleh sel-sel folikel.

Secara eksternal, serangga betina memiliki ovipositor, ekstensi dari perut, digunakan untuk bertelur, misalnya, dengan memasukkan ke dalam tanah atau menjadi hewan inang. Ovipositor dimodifikasi dalam banyak spesies untuk fungsi lain. Dianggap sebagai salah satu pertahanan yang paling ditakuti di antara mereka. *Stinger hymenopteran* adalah ovipositor yang dimodifikasi. Pada beberapa spesies seperti lebah madu infertil, ini bersifat struktur seksual telah sepenuhnya kehilangan fungsi reproduksinya. Pada lebah, seluruh bagian perut lebah itu lepas dari tubuhnya ketika menyengat korbannya, dan sekaligus membuat lebah tersebut terbunuh sendiri.

Pada nyamuk, ketika konsentrasi juvenil hormon (JH) turun, merangsang nyamuk untuk makanan darah. *Ecdysone*, pada gilirannya, memulai vitellogenesis dan pematangan sel telur secara bersamaan dengan sekresi dari ovariol. Ovulasi diyakini sebagai peristiwa yang dikendalikan secara hormon yang melibatkan pelepasan peptida oleh otak, sedangkan oviposisi (bertelur) juga membutuhkan kontribusi dari saraf sistem karena betina dapat dengan hati-hati memilih waktu dan tempat untuk oviposisi.

Sekresi dari kelenjar aksesori tergantung pada spesies dan berfungsi membungkus telur dalam sekresi berbuih atau agar-agar, menyimpannya di selubung pelindung (*oothecae*) atau hanya menempelkannya ke permukaan tertentu, dari tanaman yang bisa dikonsumsi selama tahap perkembangan juvenil.





GAMBAR 6.7. Struktur organ kelamin serangga jantan dan betina (Triplehorn, C.A., Borrer, D.J. & Johnson, 1989: 57).

D. GAMETOGENESIS

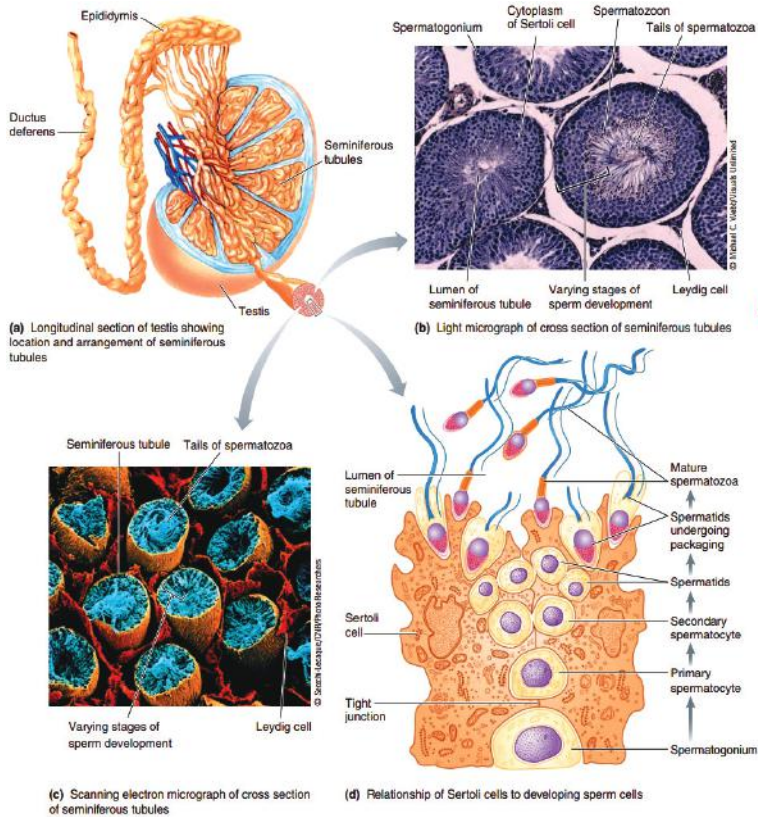
Perkembangan suatu individu diawali oleh pertemuan gamet jantan (sperma) dan gamet betina (ovum). Sel-sel yang akan berkembang menjadi gamet disebut germ plasm (plasma germinal). Perubahan plasma geminal menjadi gamet yang sangat terspesialisasi dan mampu bersatu pada saat fertilisasi dan akan menghasilkan individu baru disebut gametogenesis.

1. Pembentukan Gamet Jantan (Spermatogenesis)

Proses pembentukan dan pemasakan spermatozoa disebut spermatogenesis. Pada tubulus seminiferus testis terdapat sel-sel in-



duk spermatozoa atau spermatogonium, sel sertoli yang berfungsi memberi makan spermatozoa juga sel *Leydig* yang terdapat di antara tubulus seminiferus yang berfungsi menghasilkan testosteron.



GAMBAR 6.8. Testis dengan tubulus seminiferus tempat berlangsungnya spermatogenesis (Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, 2013: 771).

Proses pembentukan spermatozoa dipengaruhi oleh kerja beberapa hormon. Kelenjar hipofisis menghasilkan hormon perangsang folikel (*Folicle Stimulating Hormone/FSH*) dan hormon lutein (*Luteinizing Hormone/LH*). LH merangsang sel *Leydig* untuk plasma germinal sel gamet. Gametogenesis menghasilkan hormon testos-



teron. Pada masa pubertas, androgen/testosteron memacu tumbuhnya sifat kelamin sekunder. FSH merangsang sel sertoli untuk menghasilkan ABP (*Androgen Binding Protein*) yang akan memacu spermatogonium untuk memulai proses spermatogenesis. Proses pemasakan spermatosit menjadi spermatozoa disebut spermiogenesis. Spermiogenesis terjadi di dalam epididimis dan membutuhkan waktu selama 2 hari.

Secara spesifik proses spermatogenesis diawali dengan perkembangan spermatogonium. Spermatogonium berkembang menjadi sel spermatosit primer. Sel spermatosit primer bermiosis menghasilkan spermatosit sekunder, spermatosit sekunder membelah lagi menghasilkan spermatid, spermatid berdiferensiasi menjadi spermatozoa masak. Bila spermatogenesis sudah selesai, maka ABP testosteron (androgen binding protein testosteron) tidak diperlukan lagi, sel sertoli akan menghasilkan hormon inhibin untuk memberi umpan balik kepada hipofisis agar menghentikan sekresi FSH dan LH. Spermatozoa akan keluar melalui uretra bersama-sama dengan cairan yang dihasilkan oleh kelenjar vesikula seminalis, kelenjar prostat dan kelenjar *cowper*. Spermatozoa bersama cairan dari kelenjar-kelenjar tersebut dikenal sebagai semen atau air mani. Pada waktu ejakulasi, seorang laki-laki dapat mengeluarkan 300-400 juta sel spermatozoa (Gunstream, 2010: 361).

2. Pembentukan Gamet Betina (Oogenesis)

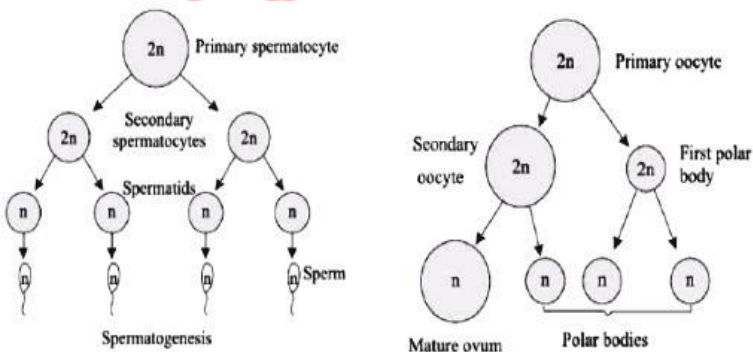
Oogenesis merupakan proses perubahan oogonium menjadi ovum. Proses oogenesis berlangsung di dalam ovarium dengan melibatkan perkembangan plasma germinal secara bertahap hingga terbentuk ovum fungsional. Dalam satu siklus oogenesis hanya dihasilkan satu ovum fungsional dan tiga badan kutub (*polar body*). Jumlah ovum total yang dihasilkan oleh suatu individu sangat bervariasi sesuai dengan kebiasaan reproduksi dan akan berbeda antara hewan yang berfertilisasi eksternal dan internal.

Hewan-hewan yang melakukan fertilisasi eksternal sangat rentan untuk mengalami kegagalan fertilisasi atau kegagalan perkembangan zigot hasil fertilisasi sehubungan dengan besarnya po-



tensi risiko dari lingkungan eksternal di mana fertilisasi dan perkembangan embrio berlangsung. Pada hewan yang berfertilisasi eksternal, jumlah telur beberapa ratus hingga ribuan seperti pada katak dan *sea urchin*. Adapun pada hewan yang berfertilisasi internal, dihasilkan satu hingga 15 belas telur pada waktu yang bersamaan. Ukuran ovum tergantung pada tempat embrio berkembang. Pada embrio yang berkembang dalam tubuh induk ukuran telur umumnya sangat kecil, karena makanan tidak dibutuhkan untuk perkembangan. Telur reptil dan unggas lebih besar dari telur hewan akuatik karena adanya cadangan makanan yang banyak untuk embrio di dalam telur.

Oogenesis tidak kontinu seperti spermatogenesis tetapi cenderung mengalami fase istirahat pada waktu tertentu (misalnya dari oosit sekunder menjadi ovum). Pada mamalia oogenesis aktif berlangsung ketika memasuki fase awal kematangan seksual. Oosit primer membelah secara meiosis, menghasilkan 2 sel yang berbeda ukurannya. Sel yang lebih kecil, yaitu badan polar pertama membelah lebih lambat, membentuk 2 badan polar. Sel yang lebih besar yaitu oosit sekunder, melakukan pembelahan meiosis kedua yang menghasilkan ovum tunggal dan badan polar kedua. Ovum berukuran lebih besar dari badan polar kedua.



GAMBAR 6.10. Proses pembentukan sperma (spermatogenesis) dan ovum (oogenesis) yang menghasilkan satu ovum fungsional dan tiga badan kutub (*polar body*).



D. KONTROL HORMONAL

Reproduksi sangat dipengaruhi oleh aksi berbagai hormon yang tergolong ke dalam hormon seks. Pada hewan tingkat tinggi misalnya mamalia, terdapat banyak sekali hormon yang dihasilkan oleh organ seks (testis dan ovarium) serta hormon-hormon dari hipofisa dan hipotalamus.

1. Kontrol Hormonal pada Hewan Jantan

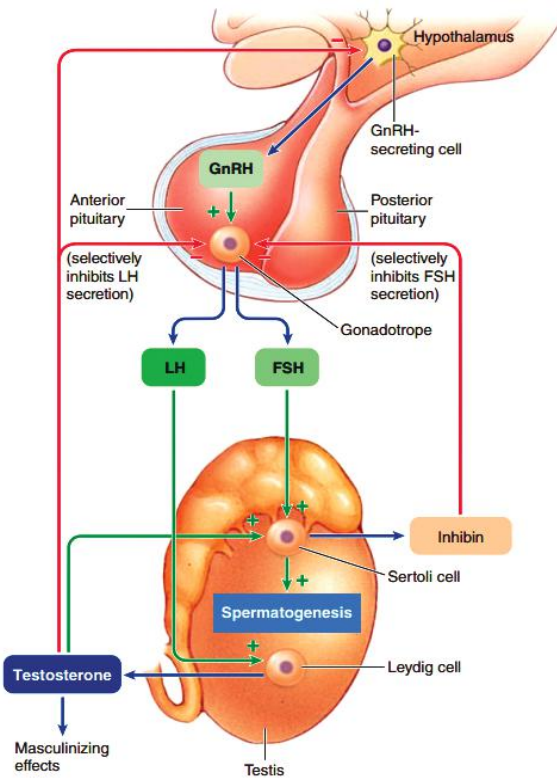
Ada dua hormon reproduksi jantan yang utama yaitu testosteron dan androgen. Testosteron, dihasilkan oleh sel interstisial (*Ley-*

TABEL 6.1. Berbagai macam hormon yang mengontrol reproduksi pada mamalia

Organ	Hormon	Fungsi
Hipotalamus	Gonadotrohic-realising factor (GnRh, LH-Rh) prolactin-inhibiting hormon	Merangsang dihasilkannya LH dan FSH oleh hipofisa anterior Menghambat produksi prolaktin
Hipofisa anterior	Folicle stimulating hormon (FSH) Luteining Hormon (LH)	Merangsang sel folikel untuk menghasilkan estrogen Sel Leydig menghasilkan testosteron dan sel folikel dan korpus luteum menghasilkan progesteron
Hipofisa posterior	Prolaktin Oxytoxin	Merangsang laktasi Merangsang pengeluaran susu oleh kelenjar susu
Ovari	Estrogen Progesteron Testosteron Inhibin	Efek ganda terhadap saluran reproduksi, buah dada, lemak dan pertumbuhan tulang Efek ganda terhadap saluran reproduksi dan perkembangan buah dada Bahan biosistesis estrogen merangsang antresia folikel Menghambat sekresi FSH
Testis	Testosteron Inhibin	Efek ganda terhadap saluran reproduksi jantan, pertumbuhan rambut, dan ciri seks sekunder
Plasenta	Estrogen Progesteron Human chorionic gonadotrophic Human plasental lactogen	Efek ganda terhadap saluran reproduksi, buah dada, lemak, dan pertumbuhan tulang Efek ganda terhadap saluran reproduksi & perkembangan buah dada Mempertahankan aktivitas korpus luteum Merangsang pertumbuhan mammae & korpus luteum selama hamil.



dig) yang terdapat di antartubulus seminiferus testis. Hormon ini mempunyai efek lokal, mempertahankan proses spermatogenesis dan juga organ lain seperti otak. Sekresi testosteron dirangsang oleh LH yang dihasilkan oleh hipofofisa. Androgen, dihasilkan oleh sel Sertoli, karena pengaruh FSH. Androgen bekerja mempertahankan kadar testosteron dalam tubulus seminiferous. Testosteron bekerja pada axis hipotalamus-hipofisa sehingga terbentuk keseimbangan antara kadar testosteron dengan pituitary gonadotropik (FSH dan LH) yang dihasilkan oleh hipofisa. Pengaturan kadar gonadotropik diperantarai oleh inhibin yang dihasilkan oleh prostat dan sel sertoli.

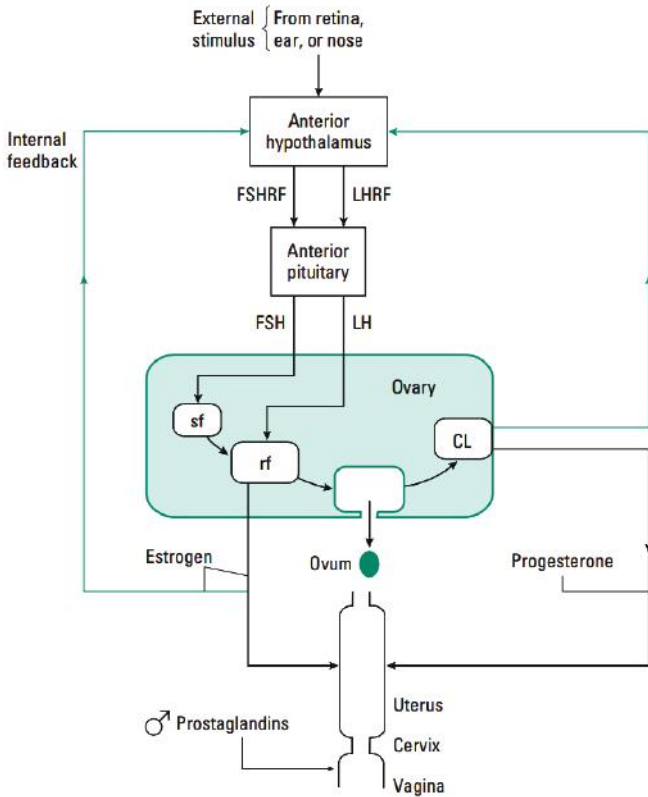


GAMBAR 6.11. Mekanisme kontrol hormonal pada hewan jantan



2. Kontrol Hormonal pada Hewan Betina

Hormon yang dihasilkan oleh hipofisa sama pentingnya pada hewan jantan dan betina yaitu FSH dan LH. Kelenjar hipofisis menghasilkan hormon FSH yang merangsang pertumbuhan sel-sel folikel di sekeliling ovum. Ovum yang matang diselubungi oleh sel-sel folikel yang disebut *Folikel Graaf*, *Folikel de Graaf* menghasilkan hormone estrogen. Hormon estrogen merangsang kelenjar hipofi-



GAMBAR 6.12. Mekanisme kontrol hormonal pada hewan betina. CL, *corpus luteum*; FSH, *follicle-stimulating hormone*; FSHRF, *FSH-releasing factor*; LH, *lutetizing hormone*; LHRF, *LH-releasing factor*; sf, *small follicle*; rf, *ripe follicle* (Willmer, P, Stone, G, Johnston, 2005: 593).



sis untuk menyekresikan hormon LH, hormon LH merangsang terjadinya ovulasi. Selanjutnya folikel yang sudah kosong dirangsang oleh LH untuk menjadi badan kuning atau korpus luteum. Korpus luteum kemudian menghasilkan hormon progesteron yang berfungsi menghambat sekresi FSH dan LH. Kemudian korpus luteum mengecil dan hilang, sehingga akhirnya tidak membentuk progesteron lagi, akibatnya FSH mulai terbentuk kembali, proses oogenesis mulai kembali.

E. REPRODUKSI MANUSIA

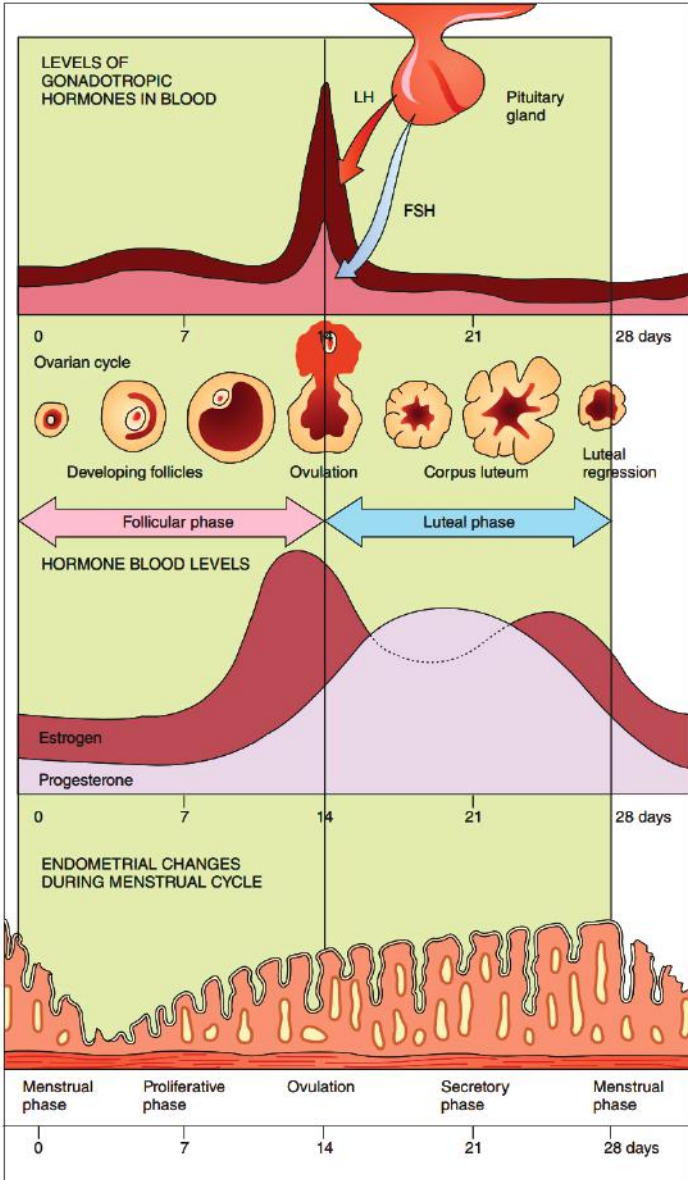
Mekanisme reproduksi pada manusia sama halnya dengan kebanyakan vertebrata terutama mamalia dan kelompok ordo primata. Hal yang spesifik untuk dikaji adalah siklus menstruasi pada wanita, kehamilan (pregnansi), dan persalinan (parturisi).

1. Siklus Menstruasi

Siklus menstruasi terjadi pada manusia dan primata. Adapun pada mamalia lain terjadi siklus estrus. Bedanya, pada siklus menstruasi, jika tidak terjadi pembuahan maka lapisan endometrium pada uterus akan luruh keluar tubuh, sedangkan pada siklus estrus, jika tidak terjadi pembuahan, endometrium akan direabsorpsi oleh tubuh. Umumnya siklus menstruasi terjadi secara periodik setiap 28 hari (ada pula setiap 21 hari dan 30 hari) sebagai berikut:

- a. Pada hari 1 sampai hari ke-14 terjadi pertumbuhan dan perkembangan folikel primer yang dirangsang oleh hormon FSH. Pada saat tersebut selosit primer akan membelah dan menghasilkan ovum yang haploid. Saat folikel berkembang menjadi *folikel Graaf* yang masak, folikel ini juga menghasilkan hormon estrogen yang merangsang keluarnya LH dari hipofisis. Estrogen yang keluar berfungsi merangsang perbaikan dinding uterus yaitu endometrium yang habis terkelupas waktu menstruasi, selain itu estrogen menghambat pembentukan FSH dan memerintahkan hipofisis menghasilkan LH yang berfungsi merangsang *folikel Graaf* yang masak untuk mengadakan ovulasi.





GAMBAR 6.13. Siklus menstruasi (Rizzo, 2016: 467).



- b. Pada hari ke-14, ovulasi terjadi. Waktu di sekitar terjadinya ovulasi disebut fase estrus. Selain itu, LH merangsang folikel yang telah kosong untuk berubah menjadi badan kuning (*Corpus Luteum*). Badan kuning menghasilkan hormon progesteron yang berfungsi mempertebal lapisan endometrium yang kaya dengan pembuluh darah untuk mempersiapkan datangnya embrio. Periode ini disebut fase luteal, selain itu progesteron juga berfungsi menghambat pembentukan FSH dan LH, akibatnya korpus luteum mengecil dan menghilang, pembentukan progesteron berhenti sehingga pemberian nutrisi kepada endometrium terhenti, endometrium menjadi mengering dan selanjutnya akan terkelupas dan terjadilah perdarahan (menstruasi).
- c. Pada hari ke-28 terjadi fase perdarahan atau fase menstruasi. Oleh karena tidak ada progesteron, maka FSH mulai terbentuk lagi dan terjadilah proses oogenesis kembali.

2. Kehamilan (Pregnansi)

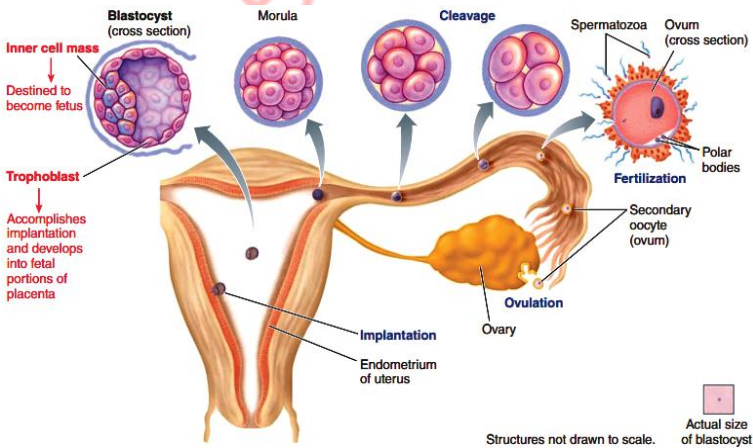
Peristiwa fertilisasi terjadi di saat spermatozoa membuahi ovum di tuba falopi. Hasil pembuahan disebut zigot. Zigot membelah secara mitosis menjadi dua, empat, delapan, enam belas dan seterusnya. Pada saat menjadi 32 sel disebut morula, yang mana di dalam morula terdapat rongga yang disebut blastosol yang berisi cairan yang dikeluarkan oleh tuba falopi, bentuk ini kemudian disebut blastosit. Lapisan terluar blastosit disebut trofoblas dan merupakan dinding blastosit yang berfungsi untuk menyerap makanan dan merupakan calon tembuni atau ari-ari (plasenta), sedangkan masa di dalamnya disebut simpul embrio (embrionik knot), yang merupakan calon janin. Blastosit ini bergerak menuju uterus untuk mengadakan implantasi (perlekatan dengan dinding uterus).

Pada hari ke-4 atau ke-5 sesudah ovulasi, blastosit sampai di rongga uterus, hormon progesteron merangsang pertumbuhan uterus, dindingnya tebal, lunak, banyak mengandung pembuluh darah, serta mengeluarkan sekret seperti air susu (uterin milk)



sebagai makanan embrio. Enam hari setelah fertilisasi, trofoblas menempel pada dinding uterus (melakukan implantasi) dan melepaskan hormon korionik gonadotropin. Hormon ini melindungi kehamilan dengan cara menstimulasi produksi hormon estrogen dan progesteron sehingga mencegah terjadinya menstruasi. Trofoblas kemudian menebal beberapa lapis, permukaannya berjonjot dengan tujuan memperluas daerah penyerapan makanan. Embrio telah kuat menempel setelah hari ke-12 dari fertilisasi.

Setelah hari ke-12, tampak dua lapisan jaringan di sebelah luar disebut ektoderm, di sebelah dalam endoderm. Endoderm tumbuh ke dalam blastosol membentuk bulatan penuh. Dengan demikian, terbentuklah usus primitif dan kemudian terbentuk Pula kantung kuning telur (*Yolk Sac*) yang membungkus kuning telur. Pada manusia, kantung ini tidak berguna, maka tidak berkembang, tetapi kantung ini sangat berguna pada hewan ovipar (bertelur), karena kantung ini berisi persediaan makanan bagi embrio. Di antara lapisan ektoderm dan endoderm terbentuk lapisan mesoderm. Ketiga lapisan tersebut merupakan lapisan lembaga (*Germ Layer*). Semua bagian tubuh manusia dibentuk oleh ketiga lapisan tersebut. Ektoderm akan membentuk epidermis kulit dan sistem saraf, en-



GAMBAR 6.14. Tahap dari fertilisasi sampai implantasi



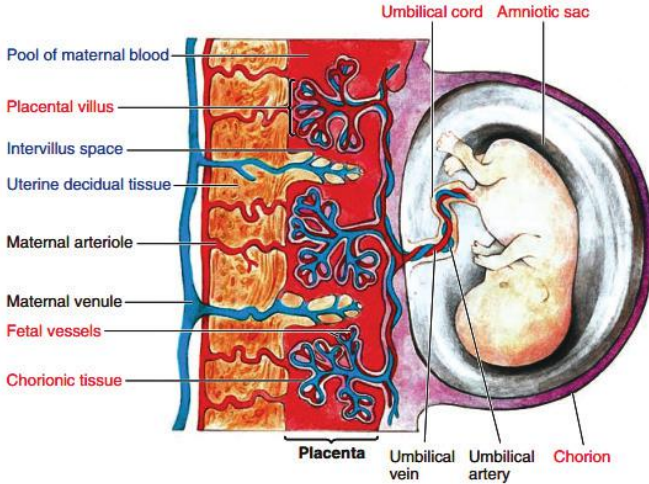
doderm membentuk saluran pencernaan dan kelenjar pencernaan, mesoderm membentuk antara lain rangka, otot, sistem peredaran darah, sistem ekskresi, dan sistem reproduksi.

Terdapat 4 macam membran embrio, yaitu:

- a. *Kantung Kuning Telur (Yolk Sac)*: kantung kuning telur merupakan pelebaran endodermis berisi persediaan makanan bagi hewan ovipar, pada manusia hanya terdapat sedikit dan tidak berguna.
- b. *Amnion*: amnion merupakan kantung yang berisi cairan tempat embrio mengapung, gunanya melindungi janin dari tekanan atau benturan.
- c. *Alantois*: pada alantois berfungsi sebagai organ respirasi dan pembuangan sisa metabolisme. Pada mamalia dan manusia, alantois merupakan kantung kecil dan masuk ke dalam jaringan tangkai badan, yaitu bagian yang akan berkembang menjadi tali pusat.
- d. *Korion*: korion adalah dinding berjonjot yang terdiri dari mesoderm dan trofoblas. Jonjot korion menghilang pada hari ke-28, kecuali pada bagian tangkai badan, pada tangkai badan jonjot trofoblas masuk ke dalam daerah dinding uterus membentuk ari-ari (plasenta). Setelah semua membran dan plasenta terbentuk maka embrio disebut janin/fetus.

Plasenta atau ari-ari berbentuk seperti cakram dengan garis tengah 20 cm, dan tebal 2,5 cm. Ukuran ini dicapai pada waktu bayi akan lahir tetapi pada waktu hari 28 setelah fertilisasi, plasenta berukuran kurang dari 1 mm. Plasenta berperan dalam pertukaran gas, makanan dan zat sisa antara ibu dan fetus. Pada sistem hubungan plasenta, darah ibu tidak pernah berhubungan dengan darah janin, meskipun begitu virus dan bakteri dapat melalui penghalang (barier) berupa jaringan ikat dan masuk ke dalam darah janin.





GAMBAR 6.15. Skema hubungan antara struktur maternal dan fetus yang membentuk plasenta pada manusia.

3. Proses Kelahiran (Parturisi)

Parturisi didefinisikan sebagai tahap keluarnya individu baru yang lengkap dari tubuh induknya melalui serangkaian kontraksi uterus yang kuat dan berirama. Tiga tahap penting dalam proses kelahiran:

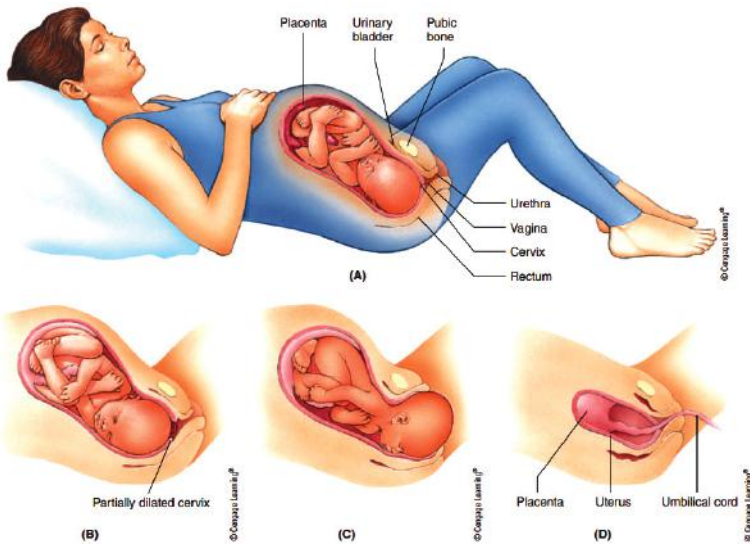
- Dilatasi serviks yang diawali dengan pembukaan dan pemipihan serviks hingga berdilatasi secara sempurna.
- Eksplusi yaitu pengeluaran bayi akibat kontraksi yang kuat dari uterus ke vagina dan ke luar tubuh.
- Pengeluaran plasenta mengikuti keluarnya bayi.

Dalam proses kelahiran ini terlibat berbagai hormon penting yaitu:

- Estrogen dari ovarium yang menginduksi reseptor oksitosin pada uterus.
- Oksitosin dari pituitari posterior ibu dan fetus yang merangsang kontraksi uterus dan merangsang plasenta untuk membuat prostaglandin.



- c. Prostaglandin yaitu hormon yang berperan dalam perangsangan frekuensi kontraksi uterus.



GAMBAR 6.16. Parturisi pada manusia. A. Posisi fetus dalam rahim, B. Fase dilatasi servik; C. Fase eksplusi; dan D. Fase pengeluaran plasenta.

H. RINGKASAN

1. Reproduksi merupakan salah satu karakter kunci dari makhluk hidup untuk mempertahankan eksistensi spesies dari waktu ke waktu.
2. Mekanisme reproduksi hewan ada dua yaitu aseksual dan seksual.
3. Organ-organ reproduksi vertebrata meliputi unit organ untuk produksi sel gamet, unit perkembangan embrio dan alat kopulasi serta penghasil hormon-hormon seks.
4. Sistem reproduksi jantan meliputi gonad, yaitu testis, sistem saluran (duktus) antara lain duktus eferen, duktis epididimis duktus deferen dan duktus ejakulasi, kelenjar eksokrin, vesikula seminalis dan kelenjar prostat dan penis.



5. Sistem reproduksi betina terdiri atas gonad dan saluran reproduksi. Gonad, terdiri dari sepasang ovarium, saluran reproduksi, yang terdiri dari tuba falopi, uterus, serviks, dan vagina.
6. Sistem reproduksi pada serangga termasuk organ neuroendokrin, gonad, dan saluran reproduksi. Sistem reproduksi serangga jantan terdiri dari sepasang testis, vesikula seminalis, dan kelenjar aksesori.
7. Proses pembentukan dan pemasakan spermatozoa disebut spermatogenesis dan oogenesis merupakan proses perubahan oogonium menjadi ovum.
8. Reproduksi sangat dipengaruhi oleh aksi berbagai hormon yang tergolong ke dalam hormon seks. Pada hewan tingkat tinggi misalnya mamalia, terdapat banyak sekali hormon yang dihasilkan oleh organ seks (testis dan ovarium) serta hormon-hormon dari hipofisis dan hipotalamus.
9. Siklus menstruasi terjadi pada manusia dan primata. Adapun pada mamalia lain terjadi siklus estrus. Bedanya, pada siklus menstruasi, jika tidak terjadi pembuahan maka lapisan endometrium pada uterus akan luruh keluar tubuh, sedangkan pada siklus estrus, jika tidak terjadi pembuahan, endometrium akan direabsorpsi oleh tubuh.
10. Peristiwa fertilisasi terjadi di saat spermatozoa membuahi ovum di tuba falopi. Hasil pembuahan disebut zigot. Zigot membelah secara mitosis menjadi dua, empat, delapan, enam belas dan seterusnya. Pada saat menjadi 32 sel disebut morula, yang mana di dalam morula terdapat rongga yang disebut blastosol yang berisi cairan yang dikeluarkan oleh tuba falopi, bentuk ini kemudian disebut blastosit. Lapisan terluar blastosit disebut trofoblas dan merupakan dinding blastosit yang berfungsi untuk menyerap makanan dan merupakan calon tembuni atau ari-ari (plasenta), sedangkan masa di dalamnya disebut simpul embrio (embrionik knot), yang merupakan calon janin. Blastosit ini bergerak menuju uterus untuk mengadakan implantasi (perlekatan dengan dinding uterus).
11. Tiga tahap penting dalam proses kelahiran yaitu dilatasi serviks yang diawali dengan pembukaan dan pemipihan serviks



hingga berdilatasi secara sempurna, eksplusi yaitu pengeluaran bayi akibat kontraksi yang kuat dari uterus ke vagina dan ke luar tubuh dan pengeluaran plasenta mengikuti keluarnya bayi.

I. LATIHAN

1. Tuliskan peranan sistem reproduksi pada hewan!
2. Tuliskan perbedaan antara reproduksi seksual dan aseksual beserta contohnya!
3. Jelaskan organ-organ yang terlibat dalam reproduksi betina beserta hormon yang terlibat!
4. Jelaskan sistem reproduksi pada serangga!
5. Jelaskan siklus menstruasi pada manusia!
5. Tuliskan perbedaan siklus reproduksi pada manusia dan primata!
6. Jelaskan proses kehamilan pada manusia!
7. Jelaskan hormon yang terlibat dalam proses parturisi!

J. REFERENSI

- Gunstream, S. (2010). *Anatomy dan Physiology with Integrated Study Guide* (Fourth Edi). New York: McGraw-Hill.
- Kay, I. (1998). *Introduction to Animal Physiology*. USA: Bios Scientific Publisher Limited.
- Kobayashi, A., & Behringer, R. R. (2003). Developmental genetics of the female reproductive tract in mammals. *Nature Reviews Genetics v, 4*, 969–980.
- Rizzo, D. (2016). *Fundamentals of Anatomy and Physiology* (Fourth Edi). Boston, USA: Cengage Learning.
- Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, P. (2013). *Animal Physiology From Genes to Organisms* (Second Edi). USA: Yolanda Cossio.
- Triplehorn, C.A., Borrer, D.J. & Johnson, D. (1989). *Introduction to the Study of Insects* (6Th ed.). Belmont: Thomson.
- Willmer, P, Stone, G, Johnston, I. (2005). *Environmental Physiology of Animals* (Second Edi). USA: Blackwell Publishing company BLACKWELL.



- Gunstream, S. (2010). *Anatomy dan Physiology with Integrated Study Guide* (Fourth Edi). New York: McGraw-Hill.
- Kay, I. (1998). *Introduction to Animal Physiology*. USA: Bios Scientific Publisher Limited.
- Kobayashi, A., & Behringer, R. R. (2003). Developmental genetics of the female reproductive tract in mammals. *Nature Reviews Genetics* v, 4, 969–980.
- Rizzo, D. (2016). *Fundamentals of Anatomy and Physiology* (Fourth Edi). Boston, USA: Cengage Learning.
- Sherwood, L, Klandrof, H, Yancey, P. (2013). *Animal Physiology From Genes to Organisms* (Second Edi). USA: Yolanda Cossio.
- Triplehorn, C.A., Borror, D.J. & Johnson, D. (1989). *Introduction to the Study of Insects* (6Th ed.). Belmont: Thomson.
- Willmer, P, Stone, G, Johnston, I. (2005). *Environmental Physiology of Animals* (Second Edi). USA: Blackwell Publishing company BLACKWELL.



BIODATA PENULIS



RINA DELFITA lahir di Sigiran, Agam tanggal 15 Agustus 1979, dari ayah Naziri dan ibu Gustinar. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD Inpres Malalak (1986-1992). Melanjutkan pendidikan menengah pertama ke MTsN Balingka (1992-1995), dan pendidikan menengah atas ke MAN 2 Bukittinggi (1995-1998). Penulis menyelesaikan Sarjana Sains (S.Si.) di Jurusan Biologi FMIPA Universitas Andalas pada 2004. Kemudian menyelesaikan Magister Sains pada 2008 di Program Studi Biologi Pascasarjana Universitas Andalas dan sekarang sedang menempuh jenjang S-3 di Program Studi Ilmu Biologi Universitas Andalas. Tahun 2009 menikah dengan Andrizal, M.A. dan dikaruniai tiga orang putra, M. Ghani al-Baroq, Adzka Adzkiya, dan Gina Raudhatul Jannah.

Penulis sejak tahun 2009 sampai sekarang adalah dosen tetap di Program Studi Tadris/Pendidikan Biologi Jurusan Tarbiyah dan Ilmu Keguruan IAIN Batusangkar. Penulis juga pernah menjadi staf pengajar di beberapa perguruan tinggi swasta di Sumatra Barat. Penulis juga pernah menjadi staf pengajar di beberapa bimbingan belajar di Sumatra Barat.

Sebagai seorang dosen, penulis cukup banyak memublikasikan tulisan baik dalam buku ataupun jurnal terakreditasi ataupun non-terakreditasi. Buku yang pernah diterbitkan adalah *Fisio-*

logi Hewan Jilid 1 (Stain Batusangkar Press, 2014); *Fisiologi Hewan dalam Al-Qur'an: Mengerti Mukjizat Ilmiah Al-Qur'an* (Stain Batusangkar Press, 2015); *Metabolisme Primer Tumbuhan: Proses Tumbuhan menghasilkan Karbohidrat, Protein dan Lipid* (PrenadaMedia Group, 2018).

IAIN BATUSANGKAR

