

# **DASAR FISILOGI TERNAK**



# **DASAR FISILOGI TERNAK**

Prof. Dr. Ir. Herry Sonjaya, DEA, DES



# Dasar Fisiologi Ternak

Prof. Dr. Ir. Herry Sonjaya, DEA, DES

Copyright © 2013 Prof. Dr. Ir. Herry Sonjaya, DEA, DES

Penyunting Bahasa : Nia Januarini  
Desain Sampul dan Penata Letak : Sani Etyarsah  
Korektor : -  
Sumber photo : -

PT Penerbit IPB Press  
Kampus IPB Taman Kencana Bogor

Cetakan Pertama: Desember 2012

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang  
Dilarang memperbanyak buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit

ISBN: 978-979-493-496-8

## Kata Pengantar

Fisiologi adalah ilmu yang mempelajari berbagai proses fisiologis (faal) atau berfungsinya tubuh makhluk hidup, baik yang terjadi pada tingkat sel, jaringan, maupun organ. Pemahaman proses-proses faal dalam tubuh ternak secara baik dan benar sangat diperlukan untuk penerapan teori-teori tersebut dalam bentuk aktivitas yang nyata. Penguasaan materi ilmu fisiologi juga sangat diperlukan untuk mengikuti mata kuliah lanjutan, seperti Fisiologi Lingkungan, Fisiologi Reproduksi Ternak, Teknologi Hasil Ternak, Ilmu Makanan Ternak Ruminansia dan Nonruminansia, Pemuliaan Ternak termasuk mata kuliah di luar bidang peternakan seperti Fisiologi Veteriner, Fisiologi Hewan Air, Biologi, dan Fisiologi Mikroba. Selain ditujukan untuk para mahasiswa yang menggeluti bidang peternakan, buku ini juga dapat digunakan sebagai acuan bagi mahasiswa Kedokteran Hewan, Perikanan, dan Kelautan, Biologi, serta untuk bahan pengayaan bagi para guru biologi SMU dan MAN.

Dalam buku ini, materi fisiologi dibagi dalam beberapa bab. Bab I sampai dengan Bab IV termasuk materi yang menyangkut dasar-dasar fisiologi, fisiologi darah dan sirkulasi darah, sistem saraf dan kelenjar endokrin dan hormon. Bab V sampai dengan Bab VII menyangkut masalah sistem pernapasan, zat-zat nutrisi dan sistem pencernaan, metabolisme energi dan hidro mineral. Bab VII sampai dengan Bab XII sebagai pengantar untuk mata kuliah lanjutan seperti Fisiologi Reproduksi, Pertumbuhan dan Termo Regulasi, serta Fisiologi Laktasi. Setelah mempelajari semua materi buku fisiologi ini, mahasiswa diharapkan memiliki kemajuan menguasai landasan teoretis tentang fungsi-fungsi faal dan memahami proses-proses rekayasa fisiologis dalam tubuh ternak.

Ucapan terima kasih untuk Urfiana dan Lisnawati yang telah membantu mengetik, memberikan masukan dan kritikan, serta merapikan format buku ini. Akhirnya, kata pepatah menyatakan, “Tiada gading yang tidak retak” buku ini masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penyusun merasa senang bila ada saran-saran dan kritik membangun dari pembaca maupun mahasiswa.

Makassar, 28 September 2012  
Penyusun

Prof. Dr. Ir. Herry Sonjaya, DEA, DES



# Daftar Isi

	Halaman
KATA PENGANTAR .....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR TABEL.....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	ix
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>2</b>
Sejarah Fisiologi.....	2
Penerapan Fisiologi .....	4
Dasar-dasar Fisiologi.....	4
Pengertian Homeostasis.....	17
Pengaturan Proses Fisiologis .....	17
<b>BAB II DARAH</b>	
Pendahuluan.....	21
Sifat Fisik dan Kimia Darah .....	21
Komposisi Darah.....	22
<b>BAB III FISIOLOGI JANTUNG DAN SISTEM SIRKULASI DARAH</b>	
Struktur Anatomi Jantung .....	38
Siklus Jantung .....	41
Denyut Jantung dan Integrasinya.....	42
<i>Output</i> Jantung ( <i>Cardiac Output</i> ) .....	44
Nutrisi Jantung.....	45
Kontrol Kerja Jantung .....	46
Sistem Sirkulasi Cairan Tubuh .....	47
Sistem Peredaran Darah Mamalia.....	48
Sistem Peredaran Darah Burung .....	49
Fisiologi Pembuluh Darah.....	49
<b>BAB IV FISIOLOGI KELENJAR ENDOKRIN DAN HORMON</b>	
Sistem Kelenjar Endokrin.....	63
Kelenjar Hipotalamus .....	72
Kelenjar Hipofisa ( <i>Pituitary Gland</i> ).....	72

Hormon-hormon Lobus Anterior (Hipofisa Anterior).....	72
Hormon-hormon Lobus Intermedia .....	74
Hormon-hormon Lobus Posterior (Hipofisa Posterior) .....	74
Kelenjar Tiroid .....	75
Kelenjar Paratiroid dan Metabolisme Kalsium .....	76
Kelenjar Adrenal .....	77
Kelenjar Pankreas dan Pengaturan Glukosa Darah.....	80
Hormon-hormon Saluran Pencernaan .....	82
Hormon Kelenjar Gonad.....	83
Hormon-hormon Lokal .....	84
<b>BAB V FISILOGI SARAF</b>	
Sel Saraf, Impuls, dan Sinaps .....	88
Otak .....	94
Sistem Saraf Somatik.....	97
Sisatem Saraf Otonom.....	97
Integrasi Kontrol Saraf dan Endokrin: Sistem	
Hipotalamus-Hipofisa pada Vertebrata.....	99
Organ Sensor .....	101
Reseptor .....	102
<b>BAB VI FISILOGI RESPIRASI</b>	
Struktur Organ Respirasi .....	105
Prinsip Umum Respirasi.....	107
Mekanisme Bernapas .....	109
Volume dan Frekuensi Respirasi .....	110
Transpor Karbondioksida .....	116
Hipoksia .....	116
Kontrol Respirasi .....	117
Pengaturan Ventilasi pada Mamalia .....	119
Sistem Pernapasan Burung.....	120
<b>BAB VII PAKAN DAN ZAT-ZAT NUTRISI TERNAK</b>	
Klasifikasi Zat-zat Nutrisi dalam Pakan Ternak.....	123
Pencernaan pada Ternak dengan Lambung Sederhana .....	135

<b>BAB VIII</b>	<b>METABOLISME HIDROMINERAL DAN EKSKRESI AMONIAK (NH<sub>3</sub>)</b>	
	Volume dan Komposisi Cairan Tubuh .....	140
	Memelihara Keseimbangan Hidromineral .....	142
	Ekskresi Amoniak.....	143
	Homeostasis Kalsium Ekstraseluler .....	143
	Fisiologi Ginjal.....	146
	Pendekatan Pengaturan Terpadu.....	150
	ADH ( <i>Antidiuretic Hormone</i> ).....	151
	Sistem Renin-Angiotensine dan Sekresi Aldosteron .....	151
<b>BAB IX</b>	<b>METABOLISME ENERGI</b>	
	Energi dan Mikro Regulasi .....	154
	Kontrol Hormonal terhadap Metabolisme.....	157
	Makroregulasi dan Metabolisme Energi .....	159
	Adaptasi Metabolik dalam Berbagai Situasi Fisiologis .....	161
	Pengaturan Terpadu Metabolisme Energi: Lapar dan Kenyang .....	161
<b>BAB X</b>	<b>FISIOLOGI OTOT</b>	
	Otot Bergaris Melintang (Otot Kerangka) .....	169
	Otot Licin dan Otot Jantung .....	174
	Fisiologi Kontraksi Otot .....	178
	Aspek Energi Kontraksi Otot.....	184
<b>BAB XI</b>	<b>FISIOLOGI REPRODUKSI</b>	
	Peranan Hormon dalam Proses Reproduksi.....	189
	Spermatogenesis .....	191
	Oogenesis dan Folikulogenesis.....	195
	Siklus Reproduksi Ternak Betina pada Mamalia .....	198
<b>BAB XII</b>	<b>FISIOLOGI PERTUMBUHAN</b>	
	Konsep Dasar Pertumbuhan .....	204
	Perubahan dalam Bentuk dan Ukuran .....	206
	Pertumbuhan Seluruh Tubuh .....	209

**BAB XIII THERMOFISIOLOGI**

Pendahuluan.....	225
Pengertian-pengertian .....	225
Temperatur dan Proses Fisiologis .....	226
Termoreseptor dan Pusat-pusat Integrasi .....	240

**BAB XIV FISILOGI LAKTASI**

Inisiasi Laktasi .....	244
Endokrinologi Kebuntingan dan Laktasi .....	245
Kondisi Anestrus (Tidak Berahi) pada Masa Laktasi .....	246

DAFTAR PUSTAKA .....

GLOSARIUM.....

PROFIL PENULIS .....

# Daftar Tabel

	Halaman
Tabel 1.1 Komposisi kimia cairan ekstrasel dan intrasel .....	10
Tabel 1.2 Berbagai mode ekspresi konsentrasi suatu zat dalam Larutan dengan $N = \text{bilangan avogrado } (6,02.10^{23})$ , 1 mol = N molekul, 1 ekuivalen = N muatan, 1 osmol = N partikel .....	12
Tabel 2.1 Nilai perkiraan untuk kandungan leukosit dalam darah pada berbagai jenis ternak .....	24
Tabel 2.2 Rataan jumlah sel darah merah, sel darah putih, kadar hemoglobin, dan nilai hematokrit (PCV) pada sapi Bali jantan muda.....	28
Tabel 2.3 Komposisi plasma protein (g/100 ml plasma) pada berbagai jenis ternak .....	29
Tabel 2.4 Faktor-faktor koagulasi darah.....	32
Tabel 2.5 Waktu koagulasi pada temperatur 25°C untuk berbagai jenis hewan .....	33
Tabel 2.6 Sistem golongan darah ABO. Reaksi golongan darah terhadap serum anti A dan serum anti B diperlihatkan pada dua kolom sebelah kanan.....	35
Tabel 3.1 Ritme jantung dan volume darah per menit pada berbagai spesies vertebrata.....	45
Tabel 3.2 Reseptor adrenergik dari beberapa jaringan yang berkaitan dengan sistem kardiovaskular .....	59
Tabel 4.1 Hormon-homon utama vertebrata, tempat sekresinya dan fungsi utamanya.....	65
Tabel 4.2 Pengaruh injeksi intravena dari adrenalin dan non-adrenalin: (+) menunjukkan peningkatan aktivitas, (0) tidak ada aktivitas, dan (-)	

	menurunkan aktivitas .....	79
Tabel 5.1	Aktivitas dari sistem saraf autonomi .....	98
Tabel 6.1	Tekanan parsial pada udara atmosfer, udara alveolus, dan darah kapiler paru-paru .....	108
Tabel 6.2	Pengaruh berbagai tingkat respirasi terhadap ventilasi alveol pada anjing dengan <i>dead space</i> 100 ml .....	111
Tabel 6.3	Volume udara pada paru-paru berbagai jenis ternak (liter) .....	111
Tabel 6.4	Kandungan O <sub>2</sub> dan CO <sub>2</sub> pada udara inspirasi, ekspirasi dan alveoli, serta tekanan parsial di permukaan laut untuk udara jenuh dengan uap air (tekanan uap 47 mmHg).....	112
Tabel 8.1	Komposisi kimia cairan ekstrasel dan intrasel (1991) .....	141
Tabel 9.1	Proporsi substrat energi utama (M1J manusia dengan berat 70 kg) .....	
Tabel 9.2	Rataan konsentrasi (mmol/liter) beberapa substrat energi yang bersirkulasi dalam darah manusia pada periode sesudah makan (10 jam setelah makan) dan puasa .....	155
Tabel 9.3	Substrat energi yang digunakan oleh berbagai jaringan manusia.....	156
Tabel 9.4	Pengaruh-pengaruh utama dari hormon insulin terhadap jaringan yang terlibat dalam metabolisme energi .....	158
Tabel 10.1	Perbandingan karakteristik jaringan otot pada hewan vertebrata .....	170
Tabel 11.1	Volume, konsentrasi spermatozoa, dan pH ejakulasi berbagai jenis ternak .....	194
Tabel 12.1	Jumlah protein (mg) berhubungan dengan setiap	

mg ADN dalam otot kerangka.....	207
Tabel 12.2 Pengaruh pertumbuhan terhadap komposisi dan otot kerangka pada babi (g/kg otot) .....	208
Tabel 12.3 Lamanya bunting, bobot lahir, dan rata-rata tingkat pertumbuhan selama periode kebuntingan pada berbagai spesies.....	209
Tabel 12.4 Komposisi zat-zat nutrisi pada air susu (g/per kg) dan tingkat pertumbuhan (g/ekor/hari) selama kebuntingan dan setelah lahir pada berbagai spesies hewan) .....	210
Tabel 12.5 Rataan bobot badan (kg) sapi Bali jantan yang dipelihara intensif selama 6 bulan .....	213
Tabel 12.6 Koefisien pertumbuhan allometrik (b) dan % tulang, jaringan otot dan lemak dari karkas dingin pada kerbau dan sapi.....	217
Tabel 12.7 Berat komponen nonkarkas (kg), koefisien pertumbuhan allometri dan persentase karkas pada ternak ruminansia besar di Indonesia yang diberi pakan konsentrasi tinggi (C) atau hijauan tinggi (R) (N: 11–13 jantan per spesies per ransum) .....	218
Tabel 13.1 Beberapa temperatur disukai hewan eksoterm yang hidup di air atau di darat .....	233
Tabel 13.2 Temperatur internal beberapa hewan endoterm .....	236



## Daftar Gambar

	Halaman
Gambar 1.1 Struktur sel hewan yang biasa terlihat dalam mikroskop elektronik .....	6
Gambar 1.2 Prinsip penentuan volume kompartemen A pada satu organisme hidup dengan metoda pencairan.....	8
Gambar 1.3 Konsentrasi air tritium (HTO) antardua kompartemen teoretis dengan volume sama (C1 dan C2).....	9
Gambar 1.4 Teknik yang dapat mengukur tekanan hidrostatik ..	12
Gambar 1.5 Keragaman volume sel darah, setelah pergerakan air antarmembran.....	14
Gambar 1.6 Efek Donnan membran .....	15
Gambar 1.7 Aliran ion-ion Na <sup>+</sup> dan K <sup>+</sup> yang melewati membran plasma pada kondisi basal .....	17
Gambar 1.8 Siklus pengaturan proses fisiologis.....	18
Gambar 1.9 Model yang disederhanakan dari pengaturan konsentrasi gula dalam lingkungan internal tubuh manusia dalam keadaan istirahat.....	19
Gambar 2.1 Struktur morfologi sel-sel darah pada hewan mamalia .....	23
Gambar 2.2 Distribusi Fe mulai dari saluran pencernaan sampai terjadi pembentukan sel darah .....	24
Gambar 2.3 Sel darah putih (leukosit) pada beberapa spesies hewan .....	8
Gambar 2.4 Pembentukan sel darah merah (eritrosit) dan berbagai kelainan sel darah merah .....	30
Gambar 2.5 Skema pembentukan sel-sel darah.....	31

Gambar 2.6	Dua cara permulaan koagulasi pada hewan vertebrata tingkat tinggi .....	33
Gambar 2.7	Skema mekanisme zat antikoagulasi dalam mencegah pembekuan darah .....	35
Gambar 3.1	Skema sederhana jantung mamalia.....	39
Gambar 3.2	Pandangan anterior dari jantung yang terbuka .....	39
Gambar 3.3a	Peristiwa-peristiwa yang terjadi selama satu siklus jantung .....	42
Gambar 3.3b	Hubungan tekanan <i>ventricular</i> terhadap lektrokardiogram dan fonokardiogram .....	43
Gambar 3.4	Kejadian utama dari siklus jantung mamalia .....	43
Gambar 3.5	Diagram yang memperlihatkan letak daerah <i>pace-makers</i> pada jantung mamalia .....	44
Gambar 3.6	Skema lintasan utama dari sirkulasi darah pada vertebrata .....	50
Gambar 3.7	Skema sirkulasi darah mamalia.....	50
Gambar 3.8	Distribusi tekanan darah, kecepatan aliran darah, resistensi pembuluh dan volume darah pada bagian-bagian dari sistem kardiovaskular mamalia.....	51
Gambar 3.9	Pertukaran cairan tubuh pada tingkat kapiler .....	54
Gambar 3.10	Jaringan pembuluh kapiler.....	55
Gambar 3.11	Skema unsur-unsur regulasi kardiovaskular .....	58
Gambar 4.1	Prinsip mekanisme kerja hormon .....	64
Gambar 4.2	Prinsip kerja radioimmunoassay .....	68
Gambar 4.3	Skema berdasarkan kerja progesteron terhadap sel-sel oviduk pada ayam petelur .....	70
Gambar 4.4	Mekanisme kerja hormon protein .....	71
Gambar 5.1	Skema berbagai jenis sel saraf (neuron) reseptor dan efektor .....	89
Gambar 5.2	Diagram akson yang bermielin.....	91

Gambar 5.3	Penyebaran impuls saraf sepanjang akson.....	92
Gambar 5.4	Skema hubungan sistem saraf spinal dan sistem saraf simpatis.....	99
Gambar 6.1	Skema garis besar pertukaran oksigen dan karbonoksida pada hewan yang mempunyai sistem sirkulasi dengan lingkungan eksternal.....	105
Gambar 6.2	Diagram beberapa jenis alat pernapasan yang terdapat pada hewan .....	106
Gambar 6.3	Pertukaran darah yang miskin oksigen dengan darah yang kaya oksigen. ....	106
Gambar 6.4	Perubahan tekanan intrapulmo dan intrtorak selama proses respirasi .....	109
Gambar 6.5	Volume paru-paru dan beberapa pengukuran yang berhubungan dengan mekanisme pernapasan .....	111
Gambar 6.6	Kurva disosiasi hemoglobin dan mioglobin manusia.....	114
Gambar 6.7	Pengaruh keragaman pH terhadap afinitas dari pigmen pernapasan oksigen .....	114
Gambar 6.8	Pengaruh temperatur terhadap afinitas hemoglobin manusia untuk oksigen .....	115
Gambar 6.9	Pengaruh keragaman konsentrasi 2,3 diphosphoglycerat (DPG) terhadap afinitas hemoglobin terhadap oksigen .....	115
Gambar 6.10	Kurva kejenuhan darah terhadap CO <sub>2</sub> (ml per liter darah) pada manusia .....	116
Gambar 6.11	Transpor CO <sub>2</sub> pada hewan darat .....	117
Gambar 6.12	Skema umum unsur-unsur regulasi ventilasi paru-paru pada mamalia .....	120
Gambar 6.13	Pola gerakan penghisapan tunggal selama satu siklus pernapasan pada unggas .....	121

Gambar 9.1	Skema general metabolisme zat-zat nutrisi .....	
Gambar 9.2	Skema general metabolisme protein dan asam-asam amino .....	
Gambar 9.3	Skema umum degradasi protein di dalam rumen ternak ruminansia.....	
Gambar 10.1	Berbagai jenis serabut otot.....	167
Gambar 10.2	Skema pertautan otot pada tulang.....	168
Gambar 10.3	Diagram struktur otot kerangka .....	171
Gambar 10.4	Sistem tubulus/retikulum sarkoplasma trasversal dari otot katak.....	172
Gambar 10.5	Skema dari neuron <i>junction</i> dan hubungannya dengan saluran reseptor asetilkolin .....	179
Gambar 10.6	Fase-fase kontraksi otot pada saat dirangsang .....	180
Gambar 10.7	Skema perbedaan kontraksi otot isometrik dan isotonik .....	181
Gambar 10.8	Dua bentuk kontraksi otot tetanus.....	182
Gambar 10.9	Diagram yang memperlihatkan reaksi biokimia yang terlibat dalam proses metabolisme reaksi otot.....	185
Gambar 11.1	Struktur dan morfologi sperma .....	192
Gambar 11.2	Tahapan proses pembentukan sperma (spermatogenesis) .....	193
Gambar 11.3	Produksi steroid oleh sel-sel teka interna dan sel-sel granulosa satu folikel sedang tumbuh.....	197
Gambar 12.1	Perubahan-perubahan ukuran dan bentuk selama pertumbuhan pada ternak sapi dan babi	206
Gambar 12.2	Kurva pertumbuhan pada A: domba, B: kelinci, dan C: manusia	211
Gambar 12.3	Kurva pertumbuhan mutlak, kecepatan Pertumbuhan (pertambahan bobot badan harian) (gr/ekor/hari) dan laju pertumbuhan	

spesifik	212
Gambar 12.4 Kurva pertumbuhan ternak yang normal (1) dan pertumbuhan ternak yang mendapat perlakuan manipulasi pakan untuk mendapatkan pertumbuhan kompensatis	216
Gambar 12.5 Skema kontrol endokrin dan hormon-hormon yang terlibat selama pertumbuhan	220
Gambar 13.1 Hubungan antarkecepatan reaksi dan temperatur pada reaksi-reaksi biologis yang mempunyai nilai $Q_{10} = 2$	227
Gambar 13.2 Aktivitas enzim berdasarkan temperatur, terlihat bahwa pada temperatur 37–40 mencapai aktivitas yang maksimum	228
Gambar 13.3 Skema pertukaran energi antara hewan endoterm (burung) atau organisme ekototerm (telur) dan lingkungannya	230
Gambar 13.4 Konsumsi oksigen pada katak pada berbagai suhu, yang sebelumnya hidup pada habitat dengan suhu 5°C dan 25°C	234
Gambar 13.5 Skema keragaman ketebalan pembungkus yang melindungi permukaan kulit (pembungkus/ tegumen) pada hewan endoterm	235
Gambar 13.6 Karakteristik penggunaan energi yang berkaitan dengan termoregulasi hewan endoterm pada berbagai temperatur lingkungan	237
Gambar 14.1. Kontrol umpan balik negatif dari progesteron terhadap prolaktin yang menghambat keluarnya air susu pada saat sebelum melahirkan dan setelah melahirkan progesteron rendah	



# BAB I

## PENDAHULUAN

Fisiologi merupakan disiplin ilmu yang mempelajari fungsi-fungsi, baik pada tingkat sel maupun tingkat organ yang terjadi dalam tubuh suatu makhluk hidup. Bidang fisiologi merupakan gabungan berbagai disiplin ilmu seperti biokimia, fisika, kimia genetik, imunologi, dan pathologi dengan tujuan memahami secara jelas proses-proses yang menjamin kelangsungan hidup individu suatu organisme atau kelestarian suatu spesies.

Bab ini akan membicarakan sejarah dan aplikasi fisiologi, dasar-dasar fisiologi yang meliputi peranan sel dalam menunjang proses kehidupan dan sistem cairan tubuh, proses pengaturan fisiologis dalam tubuh ternak.

Setelah mempelajari bab ini, Anda diharapkan mampu mengikuti pelajaran bab-bab berikutnya dan mengembangkan garis besar kuliah pendahuluan. Secara khusus Anda akan memiliki kemampuan-kemampuan berikut.

1. Menyebutkan orang-orang yang berjasa dalam bidang fisiologi.
2. Menyebutkan bagian-bagian sel dan fungsi dari bagian tersebut.
3. Dapat menjelaskan perbedaan difusi, osmosis, Efek Donnan, transpor aktif, dan permeabilitas; dan menjelaskan pengaturan secara terpadu dan proses homeostasis.

### A. Sejarah Fisiologi

Disiplin ilmu fisiologi telah berkembang sejak lama, sejak Dokter Galen (131–201 SM), seorang Yunani yang pertama kali melakukan

percobaan dan pembedahan pada hewan untuk menentukan struktur dan fungsi tubuh. Sebagai seorang ahli fisiologi eksperimental, dia membuat penemuan mengenai fungsi dari otak dan saraf serta memperagakan bahwa arteri berisi darah bukan hawa. Deskripsinya mengenai tubuh manusia merupakan pedoman yang tidak dapat diragukan selama 1300 tahun, meskipun deskripsi itu mempunyai kesalahan yang menonjol karena didasarkan atas pembedahan pada babi dan kera, bukan pada manusia.

Selanjutnya Willian Harvey (1578–1657), seorang dokter bangsa Inggris telah meneliti sistem peredaran darah. Pada tahun 1628 ia menerbitkan *Exercitatio Anatomica de Motu Cordis et Sanguinis in Animalibus* (Studi Anatomi mengenai Gerakan Jantung dan Darah pada Hewan). Pada waktu itu dikira bahwa darah dibuat dalam hati dari makanan, kemudian mengalir sekali ke dalam alat-alat tubuh dan habis terpakai. Jantung dikira tidak berotot dan mengembang secara pasif karena darah yang masuk. Harvey dengan pengamatannya langsung menggambarkan bagaimana pertama kali atrium kemudian ventrikel terisi dan kosong karena kontraksi otot. Ia memerlihatkan bahwa jika sebuah arteri dipotong, darah akan tersembur dari arteri tersebut seiring dengan denyut jantung dan jika sebuah vena diikat akan penuh darah di bagian yang menjauhi jantung dan kosong di bagian yang mendekati jantung. Harvey memerlihatkan bahwa katup di dalam vena memungkinkan darah mengalir ke jantung tetapi tidak sebaliknya. Dari percobaan-percobaan ini ia menyimpulkan bahwa darah mengalir dari jantung melalui arteri dan kembali ke jantung melalui vena. Di samping itu, dengan mengukur jumlah darah yang keluar dari jantung tiap denyut dan menghitung jumlah denyut per menit, ia dapat menghitung jumlah darah yang mengalir melalui jantung tiap menit atau jam. Harvey menemukan bahwa aliran itu begitu besar sehingga tidak mungkin dapat dibuat baru oleh hati, tetapi harus diedarkan kembali, dipakai

berulang kali. Hal ini merupakan argumentasi kuantitatif pertama. Ia menyimpulkan bahwa harus ada pembuluh-pembuluh yang menghubungkan vena dan arteri untuk menyempurnakan jalur peredaran darah, tetapi karena tidak mempunyai mikroskop ia tidak dapat melihatnya. Pada tahun-tahun berikutnya ia melakukan penelitian mengenai perkembangan ayam yang dalam 1651 diterbitkan sebagai *Exercitationes de Generatione Animalum*. Dalam karya ini ia menegaskan bahwa mamalia sama seperti halnya dengan ayam, berkembang dari telur.

Setelah William Harvey, dengan ditemukannya mikroskop dan sel, fisiologi dimajukan oleh Rene Descartes (1596–1650) yang lebih dikenal sebagai ahli filsafat daripada ahli percobaan. Ia percaya bahwa 'jiwa hewan' timbul dalam jantung, disimpan dalam otak dan melalui saraf mengalir ke otot sehingga sesuai dengan jumlahnya menyebabkan kontraksi dan relaksasi. Charles Bell (1774–1842) dan Francois Megendie (1783–1855) memberi sumbangan-sumbangan penting pengertian kepada kita mengenai fungsi dari otak dan saraf tulang belakang. Johannes Muller (1801–1858) mempelajari sifat dari saraf dan kapiler-kapiler. Buku pelajarannya tentang fisiologi merangsang banyak perhatian dan penelitian dalam bidang ini. Claude Bernard (1833–1878) adalah salah satu penganjur yang gigih dari fisiologi eksperimental dan sumbangannya yang besar pada pengertian kita mengenai peranan hati, jantung, otak, dan plasenta. Henry Bowditch (1840–1911) menemukan prinsip "semua atau tidak sama sekali" dari kontraksi otot jantung dan mendirikan laboratorium untuk mengajar fisiologi di Amerika Serikat. Ernest Starling (1866–1927) memberi banyak sumbangan dalam fisiologi peredaran dan sifat dari limfa serta William Bayliss (1866–1924) menjelaskan kontrol hormonal dari sekresi cairan pankreas.

## B. Penerapan Fisiologi

Beberapa kegunaan praktis dari pengetahuan fisiologi akan menjadi jelas pada waktu mahasiswa mengikuti pelajaran dalam buku ini. Dalam banyak hal, fisiologi merupakan dasar dari ilmu kedokteran manusia, kedokteran hewan, kesehatan masyarakat, peternakan, perikanan, dan ilmu pengetahuan sosial tertentu. Sebagai contoh, pengetahuan praktis ilmu fisiologi banyak digunakan untuk peningkatan kemampuan atletik, seperti pelari maraton atau pelari jarak pendek, mengukur kesesuaian dalam beban peralatan dan makanan yang harus dibawa oleh tentara tempur (misalnya marinir), sesuai dengan tubuh orang Indonesia. Khusus untuk bidang peternakan, perikanan, dan biota laut, fisiologi merupakan pengetahuan dasar untuk memahami proses-proses pengaturan suhu tubuh, osmoregulasi, pencernaan dan penyerapan, pertumbuhan, proses-proses reproduksi, dan penggunaan energi untuk berbagai aktivitas. Dengan memahami proses-proses fisiologis dalam tubuh, kita dapat memanipulasi proses tersebut untuk tujuan meningkatkan produktivitas ternak, misalnya peningkatan tingkat ovulasi melalui penggunaan hormon dan mengurangi cekaman panas dari bangsa sapi impor asal daerah subtropis dipelihara di Indonesia.

Untuk mengetahui lebih lanjut perkembangan IPTEK di bidang fisiologi modern, Anda disarankan untuk membaca beberapa jurnal spesialis seperti *Journal of Cellular and Comparative Physiology*, *American Journal of Physiology*, *Physiological Reviews*, *Annual Reviews*, dan *Fish Physiology and Biochemistry*.

## C. Dasar-dasar Fisiologi

### 1. Sel sebagai Unit Dasar Kehidupan Organisme

Semua makhluk hidup tersusun dari sel yang merupakan ruang terkecil, dibatasi oleh satu membran dan diisi cairan kental yang berisi

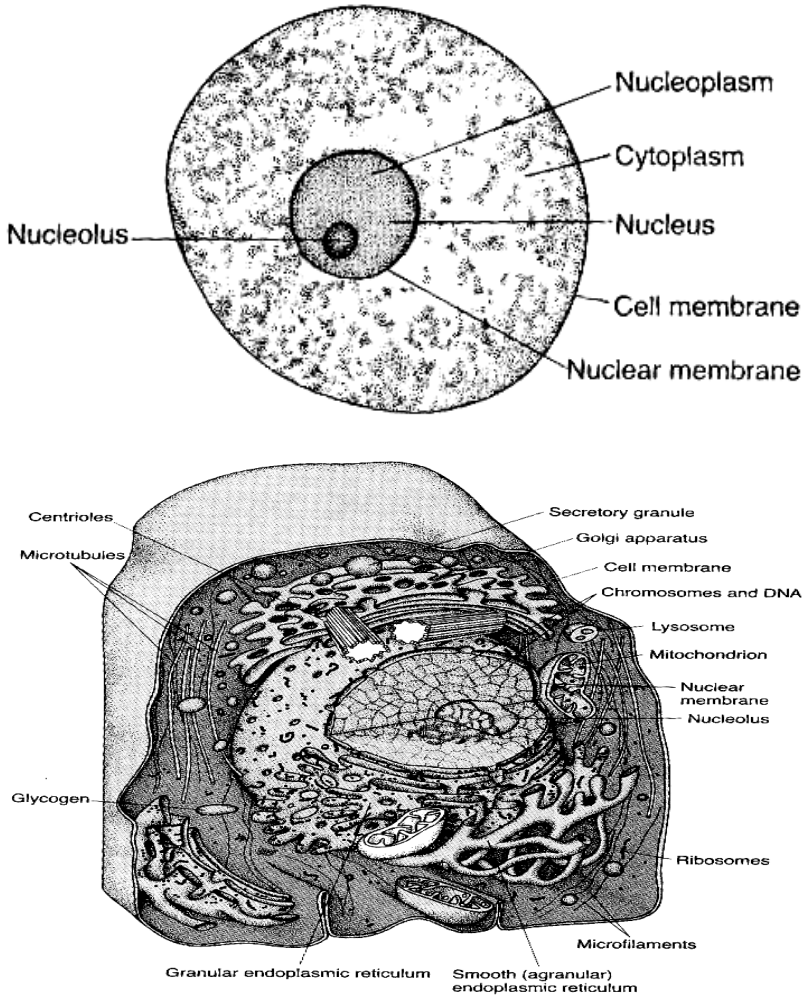
zat-zat kimia. Bentuk kehidupan yang paling sederhana adalah sel terisolasi yang berkembang membelah menjadi dua. Daya hidup sebuah sel sangat ditentukan oleh perbedaan komposisi antara medium yang merupakan lingkungan eksterior dengan lingkungan intraseluler. Bila satu sel dipelihara dalam keadaan yang didominasi oleh lingkungan ekstraseluler, sel akan mati dengan cepat. Untuk memelihara satu komposisi intersel yang berbeda jelas dengan lingkungannya, sel harus melakukan pertukaran dengan lingkungannya, seperti pengambilan makanan, pertukaran gas, pertukaran mineral, dan penolakan sisa-sisa metabolisme.

Pada organisasi sel tingkat tinggi seperti hewan ternak, sel-sel membentuk gugus yang berfungsi khusus dan dihubungkan dengan sistem komunikasi yang kompleks. Fungsi khusus gugus sel tersebut berperan dalam sistem saluran pencernaan untuk mencerna dan mengabsorpsi makanan, sistem pernapasan untuk menangkap  $O_2$  dan membuang  $CO_2$ , sistem urin untuk membuang sisa hasil metabolisme, sistem peredaran darah untuk meratakan zat-zat makanan.

oksigen dan hasil metabolisme, sistem reproduksi untuk kelestarian spesies, sistem persarafan dan hormonal mengoordinasikan serta memadukan fungsi-fungsi berbagai sistem. Sekelompok sel yang mempunyai bentuk sama dan mengkhususkan diri untuk melaksanakan satu atau lebih fungsi tertentu disebut jaringan. Sekelompok jaringan dapat bergabung membentuk satu organ dan organ-organ dapat membentuk sistem organ.

## **2. Struktur dan Fungsi Sel**

Sel terdiri dari tiga bagian besar yaitu membran, sitoplasma yang mengandung organel sel, dan inti sel yang mengandung material genetik "kromosom". Diagram struktur sel dan organel sel dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Struktur sel hewan yang biasa terlihat dalam mikroskop elektronik

## 2.1 Membran Plasma

Membran plasma merupakan selaput halus dan elastis yang membatasi sel dengan lingkungannya. Membran plasma berperan penting dalam pengaturan isi sel karena semua bahan yang keluar atau masuk sel harus melalui membran. Membran plasma tidak hanya

semipermeabel, membiarkan zat tertentu merembes melintasinya dan menahan zat-zat tertentu, tetapi daya perembesan dapat pula berubah-ubah.

## **2.2 Nukleus**

Nukleus berbentuk bundar atau lonjong. Letaknya dapat tetap di tengah sel, dapat juga pada tepi atau berpindah pada waktu sel bergerak atau berubah bentuk. Nukleus dipisahkan dari sitoplasma oleh membran nukleus yang mengendalikan pergerakan zat ke dalam atau ke luar nukleus. Nukleus adalah pusat yang penting untuk mengendalikan proses seluler dan diperlukan untuk pertumbuhan dan pembelahan sel. Di dalam nukleus, sel yang tidak membelah diri yang terdapat benang-benang halus disebut kromatin dan pada waktu sel membelah diri, benang tersebut memendek dan menebal disebut kromosom. Pada sel somatik nukleus mengandung dua perangkat kromosom lengkap yang disebut diploid dan pada sel gamet (spermatozoa dan sel telur) hanya mempunyai satu perangkat kromosom yang disebut haploid.

## **2.3 Organel Sitoplasma**

Organel Sitoplasma adalah organ-organ sel yang terdapat dalam plasma sel, terdiri atas sentriol, mitokondria, retikulum endoplasma, dan badan golgi.

## **2.4 Sentriol**

Sentriol merupakan benda kecil gelap dan silindris yang terdapat dalam sitoplasma dekat nukleus. Ia berperan pada waktu sel membelah diri, di mana sentriol bergerak ke bagian sel berlawanan dan di antara kedua sentriol terbentuk gelendong-gelendong yang terdiri atas benang-benang protein.

## **2.5 Mitokondria**

Mitokondria merupakan organel sitoplasma yang dapat berbentuk bundar, batang, dan benang, jumlahnya dapat mencapai 1.000 per sel.

Fungsi utama mitokondria adalah melepaskan energi kimia (ATP) yang secara biologis berguna untuk aktivitas sel dan disebut pula sebagai 'pembangkit tenaga' dari sel.

## **2.6 Retikulum Endoplasma**

Terdapat dua macam yaitu retikulum endoplasma granular atau retikulum endoplasma kasar yang banyak mengikat ribosom dan retikulum endoplasma agranular atau retikulum endoplasma halus yang hanya terdiri atas membran saja. Retikulum endoplasma merupakan tempat berbagai macam reaksi enzimatik yang berfungsi sebagai transpor dari substrat dan hasil-hasil dari sitoplasma ke luar sel ke nukleus.

## **2.7 Ribosom**

Ribosom berbentuk bundar dan terikat pada membran retikulum endoplasma atau bebas terdapat pada matriks sitoplasma. Ribosom berperan dalam sintesis protein.

## **2.8 Badan Golgi**

Badan golgi terdapat di dalam semua sel kecuali sperma dewasa dan sel darah merah, terdiri atas anyaman saluran yang tidak teratur. Perannya sebagai tempat sementara penimbunan protein dan zat-zat lain yang dibuat dalam retikulum endoplasma.

## **3. Komposisi Kimia Sel**

Sel mengandung sekitar 75–80% air dan 10–20% protein. Sebagian besar air diabsorpsi ke permukaan molekul-molekul protein. Fungsi protein dalam sel sebagai penyusun enzim adalah bahan struktur sel yang membantu pemeliharaan tekanan osmotik sel. Lemak ditemukan dalam membran sel dan jumlahnya hanya 2–3% dari total bahan penyusun sel, sedangkan karbohidrat dan bahan-bahan organik menyusun sekitar 1%.

#### **4. Susunan Cairan Tubuh**

Sel-sel dalam tubuh dikelilingi cairan ekstraseluler, di mana dari cairan ini sel menerima oksigen dan zat-zat makanan ke dalam cairan sel yang membuang sampah hasil metabolisme sel. Cairan ekstraseluler (CES) mempunyai dua komponen, yaitu cairan interstisial dan plasma darah yang bersirkulasi. Cairan interstisial adalah bagian dari CES yang berada di luar sistem vaskular dan merendam sel-sel. Plasma darah dan unsur-unsur sel darah mengisi sistem vaskular yang merupakan volume total darah.

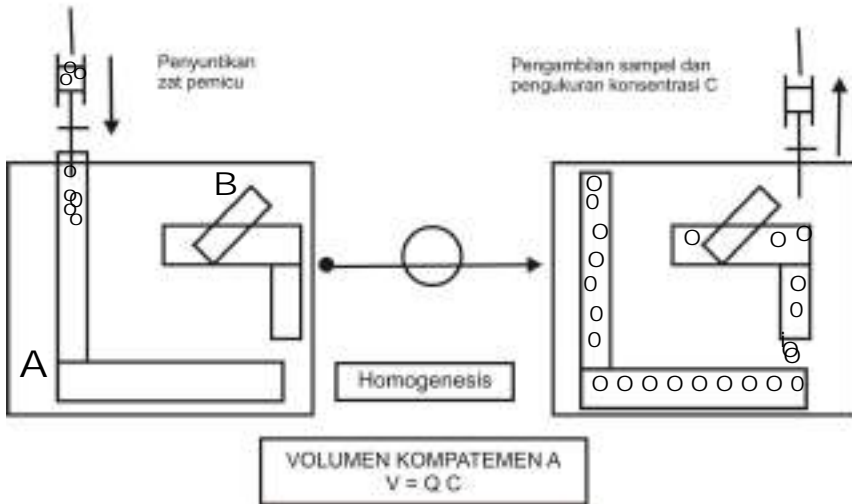
Volume suatu ruang petak (kompartemen) cairan tubuh dapat diukur menggunakan teknik pencairan suatu zat perunut (*tracer*) dan menyuntikan zat perunut tersebut dalam jumlah tertentu (Gambar 1.2), misal "Q" yang dapat menyebar secara homogen, kemudian menghitung volume cairan yang menerima zat disuntikkan dan dihitung konsentrasinya (C). Jadi volume distribusi ini sama dengan jumlah yang disuntikkan (dikurangi bagian yang disingkirkan dari tubuh karena metabolisme atau ekskresi selama waktu yang diperlukan untuk pembaurannya) dibagi dengan kadar zat di dalam contoh cairan sesudah pembauran atau dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$V = Q/C$$

Contoh: 150 mg sukrosa disuntikkan pada orang dengan bobot badan 70 kg. Kadar sukrosa dalam plasma sesudah pembauran adalah 0,01 mg/ml, sedangkan 10 mg telah diekskresikan atau dimetabolisir selama waktu pembauran. Volume distribusi sukrosa adalah  $(150 \text{ mg} - 10 \text{ mg})/0,01 \text{ mg/ml} = 14.000 \text{ ml}$ . Volume ini merupakan ruang petak distribusi sukrosa.

Zat-zat yang digunakan harus memenuhi persyaratan: (1) tinggal berdiam dalam satu kompartemen saja, (2) tidak beracun, (3) tidak dirusak atau dikeluarkan cepat oleh organisme, (4) menyebar dan

merata dalam kompartemen yang diteliti, dan (5) mudah dianalisis dalam ukuran sampel kecil.



Gambar 1.2 Prinsip penentuan volume kompartemen A pada satu organisme hidup dengan metode pencairan ; Sumber: M. Rieutort (1982)

Beberapa contoh zat yang digunakan untuk pengukuran adalah H<sup>3</sup> untuk mengestimasi volume total cairan tubuh; inulin (polimer fruktosa berasal dari tanaman), manitol, dan sulfat radioaktif untuk mengukur cairan interstisial (zat-zat tersebut tidak masuk ke dalam sel tetapi menyebar ke seluruh cairan ekstraseluler); sel darah diberi label dengan *chrome* (51Cr), besi (59Fe) radioaktif, albumin ditandai dengan yodium radioaktif (125I atau 131I), *evans* biru (zat pewarna terikat pada protein serum) untuk mengukur plasma darah. Volume cairan intraseluler tidak dapat diukur langsung, tetapi dapat dihitung dengan mengurangi total air tubuh dan cairan ekstraseluler. Pada ternak dewasa, air diperkirakan 70% dari bobot badan, 50% dari bobot badan adalah cairan intraseluler, 15% cairan interstisial, dan 5% plasma.

## **5. Komposisi Cairan Tubuh**

Larutan kompartemen intraseluler dan ekstraseluler berbeda dalam komposisi elektrolitnya (Tabel 1.1). Perbedaan yang jelas dari kedua cairan tersebut adalah ion  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , dan glukosa yang memiliki konsentrasi lebih tinggi pada cairan ekstraseluler, sedangkan ion  $\text{K}^+$  dan  $\text{Mg}^{++}$  lebih banyak pada intraseluler. Konsentrasi anion protein dan asam amino pada cairan ekstraseluler lebih rendah dibanding pada cairan intraseluler.

Perbedaan dalam komposisi berbagai kompartemen cairan tubuh dapat terpelihara dengan adanya membran sel yang memisahkan intraseluler dan cairan interstisial, serta dinding kapiler yang memisahkan plasma dari cairan interstisial.

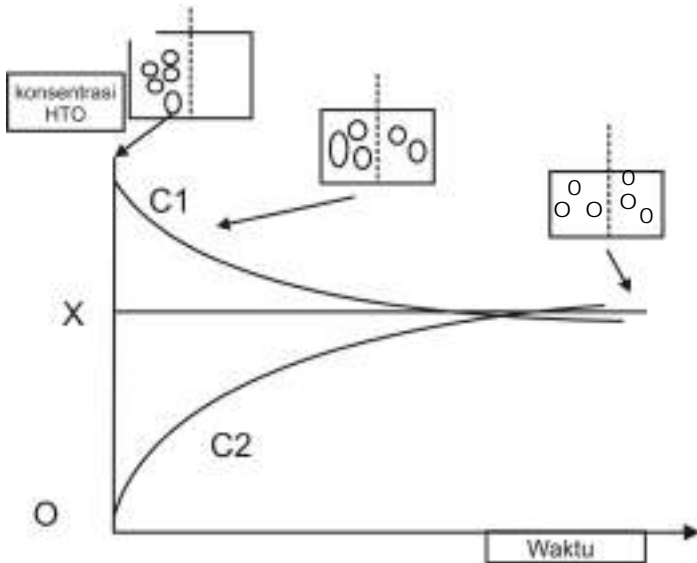
Kekuatan yang menghasilkan gerakan larutan dan molekul-molekul kecil melewati penghalang ini adalah difusi yang disebabkan oleh perbedaan konsentrasi dan perbedaan muatan listrik, perbedaan tekanan osmotik dan hidrostatis, perbedaan dalam permeabilitas membran dan transpor aktif beberapa molekul atau ion melewati membran. Mekanisme pemeliharaan perbedaan komposisi mineral antara cairan ekstraseluler dan intraseluler melibatkan berbagai proses di atas dan berlangsung secara sinergi dan kompleks.

## **6. Gerakan Larutan yang Melewati Membran**

### **6.1 Difusi**

Difusi didefinisikan sebagai gerakan molekul dari suatu daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah lain dengan konsentrasi lebih rendah yang disebabkan oleh energi kinetik molekul-molekul tersebut. Laju difusi adalah fungsi dari perbedaan konsentrasi, ukuran molekul, dan suhu. Sebagai contoh, sedikit gula pasir ditaruh dalam segelas air, gula itu akan larut dan molekul berdifusi dan tersebar merata dalam cairan. Difusi ion juga dipengaruhi oleh muatan listriknya. Bila terdapat

perbedaan potensial antara dua daerah, ion positif akan bergerak menuju gradien listrik, menuju daerah yang bermuatan lebih negatif, ion-ion yang bermuatan negatif bergerak dengan arah yang berlawanan.



Gambar 1.3 Konsentrasi air tritium (HTO) antardua kompartemen teoretis dengan volume sama (C1 dan C2)

Gambar 1.3 memperlihatkan keseimbangan evolusi waktu konsentrasi air tritium (HTO) antardua kompartemen, salah satunya tanpa HTO pada waktu permulaan. Konsentrasi C1 dan C2 akan sama pada kedua kompartemen di bawah pengaruh difusi. Terlihat bahwa perubahan sistem keseimbangan konsentrasi semakin lama semakin lambat: aliran HTO sedikit demi sedikit menurunkan perbedaan konsentrasi. Fenomena ini menjelaskan mengapa difusi dapat menyebarkan molekul-molekul terlarut pada jarak sangat dekat, berkisar beberapa mikrometer, sebaliknya kurang efektif pada jarak yang sangat panjang.

Tabel 1.1 Komposisi kimia cairan ekstrasel dan intrasel

Zat Kimia	Cairan Ekstrasel	Cairan Intrasel
Na <sup>+</sup> (mEq/l)	142.0	10.0
K <sup>+</sup> (mEq/l)	4.0	140.0
Ca <sup>++</sup> (mEq/l)	2.4	0.0
Mg <sup>++</sup> (mEq/l)	1.2	58.0
Cl <sup>-</sup> (mEq/l)	103.0	4.0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mEq/l)	28.0	10.0
Fosfat (mEq/l)	4.0	75.0
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mEq/l)	1.0	2.0
Glukosa (mg/dl)	90.0	0 – 20
Asam amino (mg/dl)	0.0	200.0
Kolesterol		
Fosfolipid	0.5	2 - 95.0
Lemak netral		
PO <sub>2</sub> (mm Hg)	35.0	20.0
PCO <sub>2</sub> (mm Hg)	46.0	50.0
pH	7.4	7.0
Protein (gr/dl)	2.0	16.0
(meq/l)	5.0	40.0

Sumber: Guyton AC (1991)

Difusi bebas suatu molekul yang melewati pemisah, dalam kasus perbedaan konsentrasi konstan kedua larutan secara kuantitatif dihitung berdasarkan hukum pertama “FICK”.

$$dn/dt = - D.S dc/dx$$

di mana: dn/dt adalah jumlah molekul larut (dhi, HTO) yang berdifusi dari daerah 1 ke daerah 2 selama waktu dt (mol. s-1).

Tanda kurang menunjukkan aliran diarahkan dari daerah lebih pekat (1) ke daerah lebih encer (2). D adalah koefisien difusi (cm<sup>2</sup> S-1), merupakan fungsi pelarut dari molekul yang berdifusi (zat terlarut) dan bervariasi menurut suhu dan tekanan. S adalah permukaan larutan (cm<sup>2</sup>), dc/dx adalah perbedaan konsentrasi, keragaman konsentrasi per unit jarak, tegak lurus pada permukaan (mol. cm-4).

Jika suatu molekul (misalnya HTO) berdifusi lewat suatu membran darah, perbedaan konsentrasi HTO merupakan perbedaan konsentrasi ( $C_1 - C_2$ ) yang terdapat antara dua membran dibagi oleh ketebalan membran sel darah ( $x$ ), sehingga rumusnya menjadi:  $dn/dt = -D.S.(C_1 - C_2)/x$ .

Ketebalan  $x$  suatu membran umumnya tidak diketahui, tetapi nilainya konstan dan biasanya dikelompokkan menjadi koefisien permeabilitas difusi, yaitu  $P_d = D/x$  ( $cm.s^{-1}$ ), sehingga aliran zat terlarut HTO dari daerah 1 ke 2 menjadi:

$$F_n(12) = dn/dt = -P_d.S.(C_1 - C_2)$$

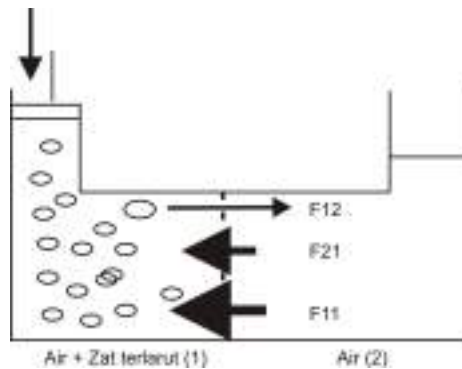
## 6.2 Osmosis

Osmosis adalah gerakan molekul pelarut (air) melalui membran (yang hanya permeabel untuk air, tetapi tidak untuk zat terlarut) ke arah daerah yang mengandung kadar zat terlarut yang lebih pekat. Molekul-molekul pelarut yang lebih encer cenderung bergerak ke arah daerah yang mempunyai kadar zat terlarut lebih tinggi. Tekanan yang dibutuhkan untuk mencegah perpindahan pelarut disebut tekanan osmosis dari sebuah larutan.

Pergerakan air berhubungan erat dengan adanya perbedaan konsentrasi air pada kedua daerah yang dibatasi suatu membran. Konsentrasi air murni dinyatakan dalam molaritas adalah  $55,5 \text{ mol.l}^{-1}$  (1 liter air = 1000 g dan satu mol air = 18 g), semakin banyak zat terlarut dalam satu kompartemen, semakin sedikit kandungan air. Penurunan konsentrasi air pada kompartemen ini disebabkan aliran air menuju kompartemen yang sama. Penurunan konsentrasi air disebabkan oleh penambahan suatu zat terlarut yang merupakan fungsi dari jumlah partikel-partikel dalam larutan (Tabel 1.2), bukan karena sifat kimiawinya.

Tabel 1.2 Berbagai mode ekspresi konsentrasi suatu zat dalam larutan.  
 Dengan  $N =$  bilangan avogadro ( $6,02 \cdot 10^{23}$ ),  $1 \text{ mol} = N$  molekul,  
 $1 \text{ ekuivalen} = N$  muatan,  $1 \text{ osmol} = N$  partikel

Contoh	Glukosa $18 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$	NaCl $5,85 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$	CaCl <sub>2</sub> $(11,1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1})$
Massa molekul	180	58,5	111
Konsentrasi molar ( $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ )	0,1	0,1	0,1
Konsentrasi ionik ( $\text{Eq} \cdot \text{l}^{-1}$ )	0	0,1 Eq.Na <sup>+</sup> 0,1 Eq.Cl <sup>-</sup>	0,2 Eq.Cl <sup>-</sup> 0,2 Eq.Ca <sup>2+</sup>
Osmolaritas konsentrasi osmotik (Osmol, l <sup>-1</sup> )	0,1	0,2 1 ion Na+ 1 ion Cl-	0,3 1 Ca 2+ 1 Cl-



Gambar 1.4 Teknik yang dapat mengukur tekanan hidrostatik

Gambar 1.4 memperlihatkan percobaan mengukur tekanan hidrostatik yang berkembang pada kompartemen larutan pekat dan terpisah oleh membran semi permeabel dari kompartemen yang mengandung air. Tekanan bekerja pada piston dapat mengembangkan tekanan hidrostatik dan menghambat aliran air tersebut. Tekanan osmotik  $\pi$  yang menyebabkan gerakan air mengikuti hukum Van't Hoff merupakan lanjutan hukum gas sempurna terhadap larutan yang dicairkan.

$$v = nRT$$

di mana  $\Delta$ : tekanan osmotik (Pa)

V: volume kompartemen bermuatan zat terlarut

n: osmolaritas zat terlarut (mol<sup>-1</sup>)

R: konstanta gas (8,31 joule. mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

T: temperatur absolut (K)

Berdasarkan hal tersebut, sistem tekanan osmotik  $\Delta_1$  dan  $\Delta_2$  dapat ditulis:

$$\Delta = R.T. (C_1 - C_2)$$

di mana  $\Delta$  : perbedaan tekanan osmotik

$C_1 - C_2$  : perbedaan osmolaritas zat terlarut

Tekanan osmosis efektif sebuah larutan dibebankan pada plasma yang dinyatakan sebagai tonisitas. Jika sel darah merah ditempatkan dalam cairan yang mempunyai tekanan osmotik sama, tidak akan terjadi kelebihan air yang masuk atau keluar dan sel tidak akan membengkak atau larutan demikian disebut isotonik (isoosmotik) terhadap cairan intraseluler sel. Jika larutan selulernya mempunyai tekanan lebih besar disebut hipertonik (hiperosmotik) terhadap sel, sebaliknya jika larutan selulernya mempunyai tekanan lebih kecil disebut hipotonik (hipoosmotik).

Untuk lebih jelasnya perhatikan percobaan berikut: sel darah merah ditempatkan dalam suatu larutan NaCl hipotonik (misalnya 0,075 mol.l<sup>-1</sup>), meningkat sedikit demi sedikit volumenya dan menjadi membesar (sferik). Jika NaCl ditambahkan ke dalam lingkungan eksterior untuk mencapai keadaan isotonik (0,15 mol. l<sup>-1</sup>), sel darah merah menurun volumenya menjadi bentuk semula bikonkaf (Gambar 1.5). Penggunaan isotop radioaktif Na dan Cl telah memperlihatkan permeabilitas membran kedua ion tersebut menjadi nol (tidak ada pergerakan larutan) dan keragaman volume sel darah, hanya mencirikan pergerakan air melewati membran.

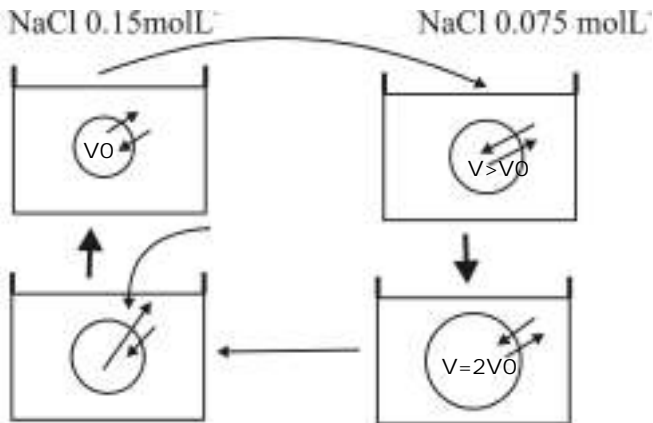
Keragaman volume dapat diikuti dengan mengukur perbandingan volume endapan sel darah terhadap volume total (plasma + sel-sel darah). Pada kondisi tersebut zat terlarut tidak dapat melewati membran, aliran air (*flux net*) dapat ditulis sebagai berikut:

$$F_n = -P_o \cdot S(C_1 - C_2)$$

$F_n$  dalam mol s<sup>-1</sup>,  $S$  : permukaan membran (cm<sup>2</sup>)

$C_1 - C_2$  : perbedaan konsentrasi zat terlarut

$P_o$  : koefisien permeabilitas osmotik suatu membran cm s<sup>-1</sup>



Gambar 1.5 Keragaman volume sel darah, setelah pergerakan air antarmembran

### 6.3 Dialisis

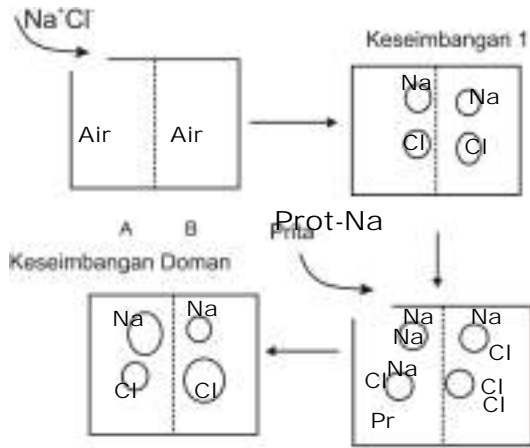
Difusi suatu zat melalui membran yang permeabel diferensial (membran yang hanya dilalui oleh beberapa zat).

### 6.4 Efek Donnan

Apabila terdapat sejumlah ion yang tidak dapat berdifusi pada suatu membran, distribusi ion-ion lainnya yang dapat melintasi

membran pemisah dari kedua sisi dapat ditentukan dan diramalkan secara teratur. Sebagai contoh, pada sebuah bak yang berisi air terdapat membran yang memisahkan dua kompartemen A dan B. Jika dalam bak ditambahkan larutan NaCl pada kompartemen A, difusi ion Na<sup>+</sup> dan Cl<sup>-</sup> akan menyebabkan keseimbangan konsentrasi ion Ca<sup>+</sup> dan Cl<sup>-</sup> dalam kedua kompartemen adalah identik. Kemudian ditambahkan larutan protein natrium (PrNa) yang terurai menjadi anion Pr<sup>-</sup> dan ion Na<sup>+</sup> pada kompartemen A. Anion protein (Pr<sup>-</sup>) tidak dapat merembes pada membran (semipermeabel), tetapi membran tersebut mudah dilintasi oleh Na<sup>+</sup> dan Cl<sup>-</sup> (Gambar 1.6). Jika larutan tersebut adalah isotonik, pada membran kompartemen A konsentrasi ion Cl<sup>-</sup> akan rendah. Pada mulanya Cl<sup>-</sup> akan bergerak dari kanan ke kiri mengikuti perbedaan konsentrasi, sedangkan Pr<sup>-</sup> akan tetap pada kompartemen A. Untuk memelihara netralitas elektrolit (jumlah ion positif dan ion negatif seimbang pada setiap sisi membran), ion Na<sup>+</sup> juga cenderung pindah dari kanan ke kiri. Hal ini akan menimbulkan perbedaan konsentrasi untuk natrium yang akhirnya akan membatasi gerakan ion Na<sup>+</sup>. Muatan negatif akan berakumulasi pada sisi di mana Pr<sup>-</sup> berada. Bila perbedaan elektrolit dipelihara ion Cl<sup>-</sup> di luar keseimbangan dengan perbedaan konsentrasi dalam membran, gerakan Cl<sup>-</sup> akan mengakhiri ketidakseimbangan tersebut (Gambar 1.6).

Pada keseimbangan akan terdapat kelebihan sedikit anion di membran sisi kiri di mana protein berada dan kelebihan sedikit kation pada sisi kanan membran. Perbedaan ini sangat kecil dalam hubungannya terhadap jumlah total yang ada. Jadi pada sisi kanan membran  $[K^+] = [Cl^-]$  dan pada sisi kiri membran  $[K^+] = [Cl^-] + [Protein^-]$ . Jadi apabila terdapat sebuah ion tidak berdifusi, ion-ion sanggup berdifusi akan membagi diri sedemikian rupa hingga pada keadaan seimbang.



Gambar 1.6 Efek Donnan membran

Redistribusi dari ion-ion yang memerlukan suatu perbedaan potensial kecil melewati membran dikenal sebagai Efek Donnan. Efek Donnan ini bertanggung jawab untuk perbedaan dalam komposisi ion antara plasma darah dan cairan interstisial.

### 6.5 Tekanan Hidrostatik

Perbedaan dalam tekanan hidrostatik melewati membran fisiologis menyebabkan filtrasi cairan. Jumlah cairan yang disaring dalam periode tertentu adalah proporsional terhadap perbedaan dalam tekanan dan terhadap luas permukaan membran. Molekul-molekul yang lebih kecil diameternya dari pori-pori membran lewat bersama cairan, sedangkan molekul-molekul yang lebih besar tertinggal.

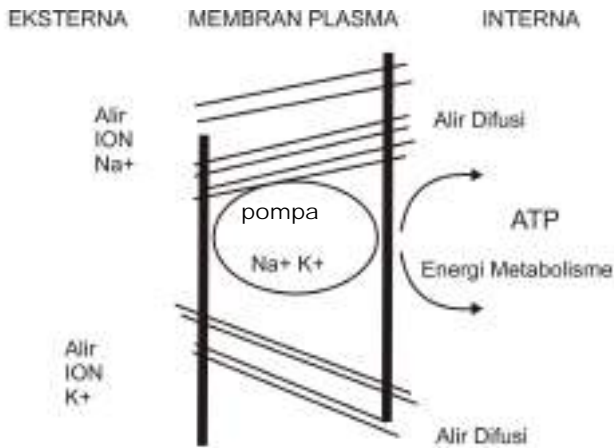
### 6.6 Transpor Aktif

Difusi, filtrasi, dan osmosis adalah semua proses pasif dalam pengertian proses tersebut tidak membutuhkan suplai energi. Molekul-molekul yang terlibat bergerak menurut perbedaan konsentrasi atau perbedaan elektrik.

Sebagai contoh difusi, molekul bergerak dari konsentrasi tinggi ke daerah yang konsentrasinya lebih rendah karena tidak dibutuhkan energi. Sebaliknya, apabila molekul bergerak dari konsentrasi rendah ke konsentrasi tinggi akan membutuhkan energi, proses ini disebut transpor aktif. Transpor aktif dilakukan oleh 'pompa' protein dalam membran sel dan energi biasanya disuplai oleh metabolisme sel melalui ATP. Berbagai zat yang melakukan transpor aktif adalah ion-ion natrium, kalium, kalsium, klorida, jod, beberapa gula, dan sebagian besar asam amino.

Transpor aktif dibagi menjadi dua tipe berdasarkan sumber energi yang digunakan untuk transpor aktif, yaitu transpor aktif primer dan transpor aktif sekunder. Pertama, energi berasal langsung dari pemecahan adenosin trifosfat (ATP) atau senyawa lain kaya energi fosfat. Energi transpor aktif sekunder tidak langsung berasal dari perbedaan konsentrasi ion-ion yang terjadi setelah transpor aktif primer. Pada keduanya, transpor bergantung kepada protein pembawa (*carrier*) yang menetrasi sepanjang membran sel mampu memberikan energi untuk membawa zat-zat bergerak melawan perbedaan elektrokimiawi.

Mekanisme transpor aktif yang telah banyak dipelajari secara mendetail adalah pompa kalium-natrium. Pompa kalium-natrium merupakan sebuah proses memompa ion natrium keluar melalui membran sel dan pada waktu yang sama memompa ion kalium dari luar sel ke dalam sel. Pemompaan ini terdapat pada semua sel tubuh yang bertanggung jawab untuk pemeliharaan perbedaan konsentrasi ion natrium dan kalium di luar dan di dalam membran sel dan menciptakan potensial listrik muatan negatif di dalam sel. Proses pemompaan ini merupakan dasar fungsi sel saraf menyalurkan impuls saraf sepanjang sistem saraf.



Gambar 1.7 Aliran ion-ion Na<sup>+</sup> dan K<sup>+</sup> yang melewati membran plasma pada kondisi basal

Gambar 1.7 menjelaskan komponen dasar dari pompa Na<sup>+</sup> dan K<sup>+</sup>. Protein pembawa terdiri dari dua globular protein kompleks yang besar dengan berat molekul 100.000 dan yang kecil berat molekulnya 55.000.

Meskipun fungsi protein kecil belum diketahui, protein bermolekul besar sangat penting untuk fungsi dari pompa: (1) protein mempunyai tiga tempat reseptor untuk mengikat ion-ion natrium pada sebagian protein menuju ke dalam interior sel, (2) mempunyai dua tempat reseptor untuk ion kalium pada bagian luar, dan (3) bagian dalam protein berdekatan dengan tempat pengikatan natrium yang mempunyai aktivitas ATP ase.

#### D. Pengertian Homeostasis

Cl Bernard (1865) menyatakan bahwa semua sel suatu organisme memerlukan suatu lingkungan yang konstan (konsep lingkungan interior). W Cannon memperluas konsep ini dan mengusulkan istilah konsep ini dengan sebutan homeostasis yang artinya "tetap konstan". Homeostasis merupakan suatu keadaan stabil yang dipelihara oleh

semua proses aktif dalam tubuh untuk mengantisipasi terhadap perubahan proses fisiologis.

Ketahanan terhadap perubahan ini mungkin merupakan karakteristik semua organisme dalam pengaturan proses fisiologis. Sifat pendapar (*buffer*) cairan tubuh, pengaturan-pengaturan oleh ginjal dan pernapasan apabila terjadi kelebihan asam merupakan contoh-contoh mekanisme homeostatis. Beberapa mekanisme pengaturan ini atas dasar umpan balik negatif penyimpangan dari keadaan normal yang akan dideteksi oleh sebuah sensor dan isyarat dari sensor untuk mencetuskan perubahan kompensasi yang berlangsung terus sampai normal kembali.

## E. Pengaturan Proses Fisiologis

Untuk mencapai keadaan homeostasis tersebut diperlukan sistem yang memadukan berbagai proses analogi dan suatu pusat penyatuan. Sebenarnya sukar sekali untuk menangani semua proses fisiologis yang menjamin keadaan homeostasis pada suatu organisme. Diagram pengaturan proses fisiologis dapat dilihat pada Gambar 1.8.

Sebagai contoh, pengaturan temperatur tubuh pada hewan menyusui. Produk (*output*) adalah temperatur sentral organisme yang dapat berhubungan dengan temperatur darah pada daerah permukaan tubuh. Detektor terdiri atas sejumlah sel saraf yang terdapat pada *hypothalamus* dan sel sumsum tulang belakang. Pembanding (komparator) pada tingkat *encephalon* dalam menetapkan suatu nilai sebagai standar adalah  $37 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Jika temperatur menurun, mekanisme efektor memainkan peranan, ternak akan menurunkan kehilangan panasnya dan meningkatkan produksi panas melalui berbagai mekanisme.

Di sini terdapat mekanisme umpan balik negatif. Pada contoh tersebut komparator mempunyai peranan integrasi yang dapat

melewati keadaan nilai yang telah ditetapkan pada waktu pertama. Komparator dapat memilih prioritas lain menurut kebutuhan untuk sementara waktu. Jika organisme mendapat infeksi mikroba, sistem saraf pusat tidak mengetahui nilai yang telah ditetapkan sebelumnya dan berganti menuju 39 atau 40°C (demam panas).

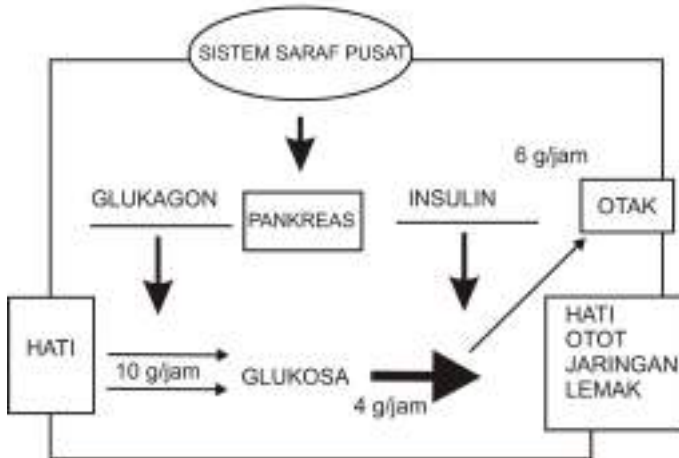
Umpan balik positif juga terdapat dalam proses fisiologis, tetapi sangat jarang. Pada akhir siklus berahi, kadar estrogen mencapai maksimum sejalan dengan pertumbuhan dan pematangan folikel. Pematangan tersebut akan menyebabkan rangsangan positif terhadap hipotalamus dan hipofisa untuk mensekresikan hormon gonadotropin (FSH dan LH) sehingga terjadi ovulasi.

Pengaturan fisiologis berpartisipasi terhadap koordinasi fungsi-fungsi sel dan terhadap terpeliharanya homeostasis. Pengaturan tersebut dijamin oleh proses-proses yang dilakukan oleh sistem persarafan dan sistem endokrin sebagai alat integrasi dan komunikasi.

Gambar 1.9 menggambarkan pengaturan fisiologis kadar glukosa yang mengikutsertakan sistem susunan saraf pusat dan sistem hormonal (khususnya sekresi insulin dan glukagon). Gambar ini menjelaskan pengaturan aliran glukosa di antara lingkungan interior tubuh dan berbagai organ pada manusia ketika otot istirahat dan di luar periode pencernaan (keadaan basal).



Gambar 1.8 Siklus pengaturan proses fisiologis ; Sumber: M Rieurtot (1982)



Gambar 1.9 Model yang disederhanakan dari pengaturan konsentrasi gula dalam lingkungan internal tubuh manusia dalam keadaan istirahat. Sumber: RH Unger (1981)

## Ringkasan

1. Fisiologi ialah ilmu yang mempelajari faal, baik pada tingkat sel maupun tingkat organ yang terjadi pada makhluk hidup.

Perkembangan ilmu fisiologi dimulai sejak orang melakukan fisiologi eksperimental untuk membuktikan peranan fungsi dari organ-organ sampai kontrol terpadu semua proses fisiologis.

2. Unit struktural dari semua benda hidup adalah sel. Suatu sel yang khas mempunyai suatu membran plasma luar, suatu nukleus yang mengandung satu atau lebih nukleolus dan berbagai organel dalam sitoplasma, seperti sentriol, mitokondria retikulum endoplasma, dan badan golgi.
3. Cairan tubuh terdiri atas cairan ekstraseluler dan intraseluler, di mana cairan ekstraseluler terdiri atas cairan interstisial dan plasma darah yang bersirkulasi. Cairan ekstraseluler merupakan tempat di mana sel mengambil zat-zat makanan dan membuang hasil-hasil metabolismenya. Pengukuran volume cairan tubuh dapat dilakukan dengan teknik pencairan zat perunut atau zat yang diberi label radioaktif, kemudian disuntikkan dan dihitung volume distribusi zat perunutnya.
4. Gerakan cairan melewati membran sel dilakukan dengan berbagai cara, antara lain difusi, osmosis, dialisis, filtrasi, dan transpor aktif.
5. Homeostasis merupakan suatu keadaan stabil yang dipelihara oleh semua proses aktif dalam tubuh untuk mengantisipasi terhadap perubahan proses fisiologis. Untuk mencapai keadaan homeostasis dalam tubuh diperlukan pengaturan proses-proses fisiologis yang memadukan dan mengoordinasikan semua sistem melalui sistem endokrin dan sistem saraf.

Latihan berikut ini sengaja disusun untuk memantapkan Anda terhadap materi yang telah dibicarakan, kerjakan latihan berikut dengan sungguh-sungguh.

1. Apa yang dimaksud dengan fisiologi dan sebutkan kegunaan fisiologi dalam kehidupan sehari-hari.

2. Apa dasarnya sel merupakan unit dasar kehidupan organisme?
3. Jelaskan fungsi dari membran plasma, nukleus, dan organel sitoplasma!
4. Jelaskan bagaimana cara mengukur suatu kompartemen organ dalam tubuh!
5. Jelaskan perbedaan difusi, osmosis, Efek Donnan, dan tranpor aktif!
6. Berikan dua contoh pengaturan proses fisiologis pada ternak!

# BAB II DARAH

## A. Pendahuluan

Darah terdiri atas bagian cair (plasma) dan bahan-bahan interseluler. Plasma darah dan sel-sel darah dapat terpisah dan bebas bergerak dalam cairan interseluler. Beberapa sel darah seperti leukosit dapat berpindah melalui pembuluh darah untuk melawan infeksi. Total sirkulasi volume darah diperkirakan sekitar 5–8% dari total bobot badan dan angka ini bervariasi menurut umur, spesies, besar tubuh, aktivitas, status kesehatan, status gizi, dan kondisi fisiologis (bunting, laktasi).

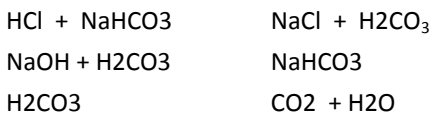
Darah mempunyai beberapa fungsi yang penting untuk tubuh. Darah mengangkut zat-zat makanan dari alat pencernaan ke jaringan tubuh, hasil limbah metabolisme dari jaringan tubuh ke ginjal, dan hormon dari kelenjar endokrin ke target organ tubuh. Darah juga berpartisipasi dalam pengaturan kondisi asam-basa, keseimbangan elektrolit dan temperatur tubuh, serta sebagai pertahanan suatu organisme terhadap penyakit. Semua itu adalah fungsi yang berhubungan dengan pemeliharaan lingkungan internal yang konstan (homeostasis).

## B. Sifat Fisik dan Kimia Darah

Berat jenis darah adalah 1,04–1,05. Tekanan osmosis bergantung pada konsentrasi protein plasma dan viskositas/kekentalan darah sebagai cairan suspensi. Derajat keasaman (pH) berkisar antara 7–7,8,

mempunyai sistem *buffer* melalui ion  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , dan  $\text{H}^+$ . Darah mengandung sekitar 80% air dan 20% bahan organik, sedangkan bahan anorganik kurang dari 1%. Warna darah bervariasi sesuai dengan kandungan oksigen. Darah arteri kaya oksigen mempunyai warna merah darah, sedangkan darah vena miskin oksigen mempunyai warna merah gelap sampai cokelat. Pada manusia, volume darah kira-kira 6–7,5 % atau 1/13 berat tubuh, mempunyai masa jenis 1,050–1,064 dengan pH dalam keadaan normal berkisar 7,35–7,45, sedikit berada di daerah yang biasanya netral.

Kemampuan mempertahankan pH darah di dalam batas-batas relatif sempit karena adanya *buffer* kimia, terutama natrium bikarbonat. *Buffer* bereaksi dengan asam kuat atau basa kuat sehingga menghasilkan garam netral dan asam atau basa lemah. Sebagai contoh sistem karbonat:



## C. Komposisi Darah

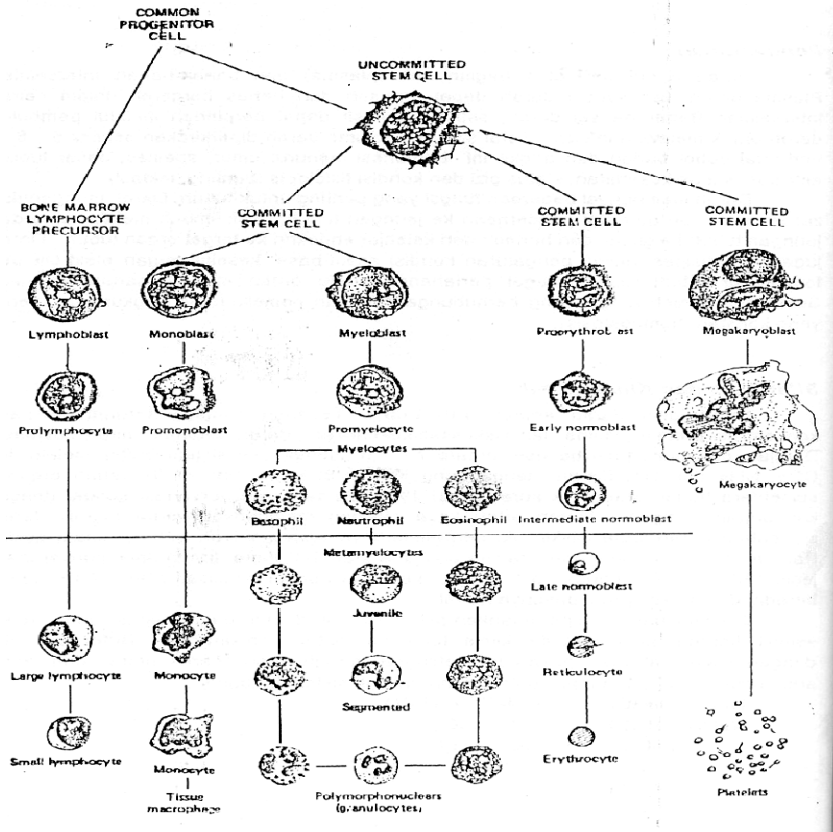
Komponen seluler dari darah termasuk sel darah merah (eritrosit), sel darah putih (leukosit), dan keping-keping (platelet) darah dapat dilihat pada Gambar 2.1.

### 1. Eritrosit (Sel Darah Merah)

Eritrosit mengandung hemoglobin dan berfungsi sebagai transpor oksigen. Eritrosit berbentuk bikonkaf dengan lingkaran tepi tipis dan tebal di tengah, eritrosit kehilangan intinya sebelum masuk sirkulasi.

Pembentukan sel darah merah ("erithropoiesis") terjadi di sumsum tulang merah. Pada fetus, eritrosit dibentuk juga di dalam hati dan limfa.

Erithropoiesis merupakan suatu proses yang kontinu dan sebanding dengan tingkat perusakan sel darah merah. Erithropoiesis diatur oleh mekanisme umpan balik di mana prosesnya dihambat oleh peningkatan level sel darah merah yang bersirkulasi dan dirangsang oleh anemia. Bila ternak dipindahkan dari dataran rendah ke dataran tinggi yang kekurangan oksigen, maka akan terjadi peningkatan 'kompensatori' jumlah sel darah merah. Erithropoiesis dikontrol juga oleh hormon yang disebut "Erithro-poitin" yang disekresikan oleh ginjal.



Gambar 2.1 Struktur morfologi sel-sel darah pada hewan mamalia  
 Sumber: Guyton (1991)

Perusakan eritrosit terjadi setelah tiga sampai empat bulan dalam sirkulasi. Sel-sel disintegrasikan dan dipindah dari sirkulasi sistem retikuloendothelium yang mengandung sel-sel khusus dalam hati, limfa, sumsum tulang, dan *node limpa*. Produk yang dihasilkan dari perusakan sel darah merah adalah pigmen bilirubin dan biliverdin yang disekresikan oleh kelenjar hati ke empedu. Besi bebas digunakan untuk meresintesis hemoglobin.

Hemoglobin adalah protein dengan berat molekul sekitar 65.000. Molekul terdiri atas 4 sub-unit, setiap sub-unit mengandung besi dalam bentuk gugus hemo yang berkonjugasi dengan polipeptida. Adanya hemoglobin dalam eritrosit berfungsi untuk membawa oksigen dan warna sel darah merah. Dengan adanya hemoglobin, darah dapat membawa oksigen yang berasal dari udara 60 kali lebih banyak bila dibandingkan dengan oksigen yang berasal dari air pada kondisi yang sama. Hemoglobin mengabsorpsi oksigen darah udara melalui paru-paru, membentuk suatu ikatan longgar yang disebut oksihemoglobin di mana senyawa ini siap memberikan oksigen ke jaringan. Satu molekul hemoglobin akan mengikat 4 molekul oksigen:

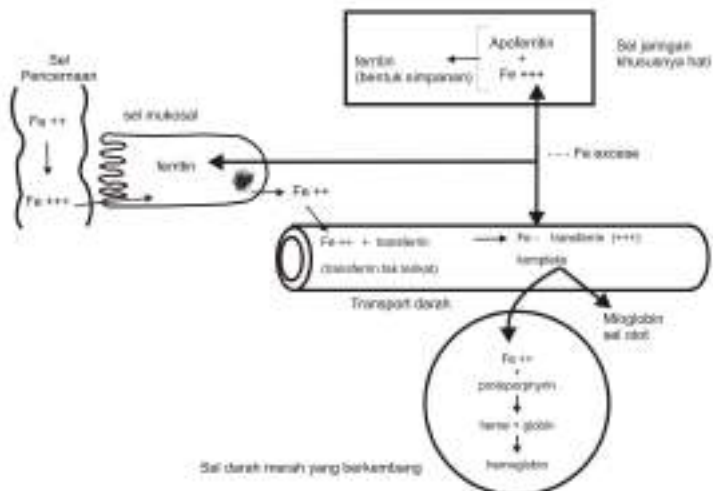


Proses ini disebut oksigenasi, bukan oksidasi yang sebenarnya. Proses ini memerlukan besi dalam bentuk *ferro* di dalam molekul hemoglobin. Oksigen yang terikat jumlahnya proporsional terhadap jumlah besinya, dengan dua atom oksigen bergabung dengan tiap atom besi. Setiap gram hemoglobin akan mengangkut sekitar 1,34 ml oksigen. Bila darah mencapai jaringan kekurangan oksigen, ikatan oksigen terlepas dari oksihemoglobin dan siap memberikan oksigen ke jaringan.

Besi diserap dari makanan melalui sel-sel epitel mukosa duodenal setelah makanan itu meninggalkan perut (Gambar 2.2). Kemudian zat besi masuk ke kapiler darah di dalam mukosa, di mana transferin b-

globulin bergabung dengan membawa zat besi. Sebagian besar zat besi menuju ke sumsum tulang sehingga menjadi molekul heme untuk membentuk eritrosit. Sebagian kecil juga digunakan untuk membentuk mioglobin di dalam otot. Sekitar 25%, zat besi tersebut bergabung dengan apoferritin di dalam sel-sel jaringan sehingga membentuk feritin yang merupakan cadangan sementara dari zat besi di dalam hati dan limfa.

Methemoglobin adalah produk oksidasi dari hemoglobin. Methemoglobin ini tidak mampu membawa oksigen karena besi dalam methemoglobin berbentuk ion ferri ( $Fe^{+++}$ ) yang afinitas terhadap oksigen rendah dibandingkan dengan ferro ( $Fe^{++}$ ) pada hemoglobin. Pembentukan methemoglobin pada sapi mungkin hasil dari keracunan nitrat pada sapi yang merumput di padang rumput yang baru dipupuk.



Gambar 2.2 Distribusi Fe mulai dari saluran pencernaan sampai terjadi pembentukan sel darah

Karboksi hemoglobin adalah senyawa stabil yang dibentuk ketika karbonmonoksida bergabung dengan hemoglobin. Hal ini disebabkan

afinitas hemoglobin untuk karbon dioksida sekitar 250 kali dibanding untuk oksigen dan kandungan karbon dioksida 0,1% di udara merupakan konsentrasi yang membahayakan ternak. *Myoglobin* merupakan suatu pigmen pengikat oksigen yang terdapat dalam otot merah (otot lambat) dan dalam enzim pernapasan. *Myoglobin* menyerupai hemoglobin, tetapi mengikat satu molekul  $O_2$  tidak 4 molekul  $O_2$ , kurva disosiasinya bukan kurva sigmoid, tetapi hiperbola bujur sangkar karena ia hanya melepas  $O_2$  pada  $PO_2$  rendah.

## 2. Leukosit (Sel Darah Putih)

Perbedaan sel darah putih dengan eritrosit adalah leukosit yang selalu mempunyai inti sel dan sitoplasma, serta mampu bergerak bebas. Jumlah leukosit lebih sedikit dari eritrosit yaitu 5.000–9.000/mm<sup>3</sup>. Leukosit diklasifikasikan berdasarkan ada tidaknya granula di dalam sitoplasma dibagi menjadi granulosit dan agranulosit. Granulosit terdiri atas netrofil, basofil, dan eosinofil, sedangkan agranulosit terdiri atas limfosit dan monosit (Tabel 2.1). Di dalam peredaran darah, jumlah total sel darah putih pada manusia maupun hewan adalah jauh lebih sedikit daripada jumlah total sel darah merah. Jumlah total sel darah putih dinyatakan dengan 10<sup>9</sup>/L, sedangkan jumlah total darah merah dinyatakan dengan 10<sup>12</sup>/L. Sel darah putih yang terdiri atas beberapa jenis sel seperti neutrofil, limfosit, eosinofil, basofil, monosit, dan trombosit dapat dinyatakan masing-masing dalam % apabila jumlah total sel darah putih tersebut dihitung dalam 100%.

**Netrofil:** granulosit yang berwarna biru atau merah dalam pewarnaan basa. Netrofil merupakan garis pertahanan tubuh untuk melawan infeksi dengan bermigrasi ke daerah yang dikuasai bakteri untuk memusnahkannya. Pada banyak kasus, netrofil juga mencerna jaringan mati pada daerah dan menghasilkan bahan semi cair yang disebut sebagai "pus". Sifatnya amoeboid granulosit dan pagositik.

Jumlahnya meningkat (netrofilia) pada waktu stres, estrus (fisiologis), dan pada waktu infeksi (patologis). Jumlahnya menurun (netropenia) pada ternak yang menderita penyakit kronis.

**Eosinofil:** leukosit yang mengandung granula berwarna dengan pewarnaan asam. Jumlahnya sangat sedikit, tetapi meningkat pada kasus investasi dengan parasit.

**Granulosit basofil:** mengandung granula berwarna biru, sangat jarang ditemukan dalam darah.

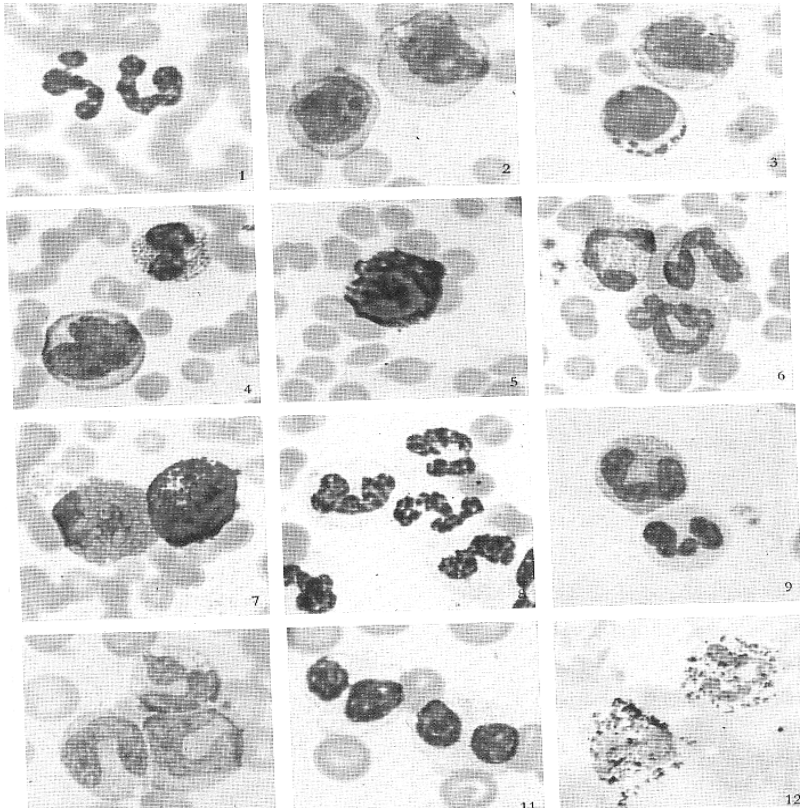
**Monosit:** seperti halnya netrofil bersifat pagositik dan aktif bergerak. Jumlahnya meningkat pada kondisi infeksi kronis seperti TBC.

Tabel 2.1 Nilai perkiraan untuk kandungan leukosit dalam darah pada berbagai jenis ternak

Ternak	Total ( $10^3 / \text{mm}^3$ )	Distribusi dalam persen				
		Netrofil	Eosinofil	Basofil	Limfosit	Monosit
Kuda	7–10	60	6	0,5	30	4
Sapi	5–12	35	8	0,1	53	4
Domba	6–11	30	7	0,5	60	3
Kambing	5–14	35	6	0,5	55	1
Babi	10–20	55	2	1,0	40	2

**Limfosit:** dibuat dalam limfa, nodus limfatikus, *thymus*, dan sumsum tulang. Limfosit sangat penting untuk melawan kondisi penyakit lokal dan perkembangan kekebalan tubuh (imunitas) terhadap infeksi. Dua limfosit yang dikenal oleh imunologis yaitu B-limfosit dan T-limfosit. B-limfosit bereaksi terhadap protein asing (antigen) dengan menghasilkan antibodi. Pembentukan kompleks antigen-antibodi dapat melemahkan serangan bakteri dan sejumlah antibodi yang menjamin perlindungan terhadap infeksi berikutnya. T-limfosit menyerang protein asing pada permukaan sel virus atau cendawan. T-limfosit juga terlibat dalam berbagai reaksi alergi dan membatasi pertumbuhan tumor.

### 3. Trombosit (Keping-keping Darah)



Gambar 2.3 Sel darah putih (leukosit) pada beberapa spesies hewan  
Sumber: Frandson (1993)

Trombosit merupakan fragmen sel yang berdiameter 2–4  $\mu$ . Dibentuk dalam sumsum tulang dan limfa, mempunyai masa hidup 8–10 hari. Keping-keping darah berkerut pada pembuluh darah luka di mana trombosit melepaskan satu bahan yang membatasi pembuluh darah dan beragregasi untuk membentuk gumpalan. Reaksi cepat ini membatasi kehilangan darah sebelum koagulasi (pembekuan darah) terjadi. Pada kuda jumlahnya berkisar antara 110.000–300.000 per  $\text{mm}^3$  dengan rata-rata 176.000.

## D. Faktor-faktor yang Memengaruhi Sel-sel Darah

Beberapa faktor yang memengaruhi jumlah sel-sel darah adalah faktor internal (genetik, bangsa ternak, dan status fisiologis) dan faktor eksternal lingkungan (kualitas pakan, kondisi daerah, pemeliharaan, dan penyakit). Penelitian tentang status hematologi sapi pada peternakan rakyat menunjukkan adanya pengaruh perbedaan daerah terhadap gambaran darah (jumlah sel darah merah dan putih, kadar HB, dan PCV) sapi-sapi di Indonesia (Ginting 1984, 1987; Iskandar 1986). Namun hasil penelitian Wahyuni dan Matram (1983) memperlihatkan tidak adanya perbedaan nilai parameter darah sapi Bali pada tujuh kabupaten di Provinsi Bali. Perbedaan hasil ini mungkin disebabkan adanya perbedaan faktor kualitas pakan dan keragaman daerah, baik dalam ketinggian maupun daya dukungnya. Telah dibuktikan juga bahwa terdapat hubungan yang nyata antara parameter darah dengan penampilan produksi sapi (Thahar dan Moran 1978).

Penelitian status hematologis sapi Bali jantan yang akan dikirim dari Sulawesi Selatan berasal dari peternakan rakyat dataran tinggi dan rendah, memperlihatkan nilai komponen-komponen darah yang rendah dibandingkan dengan sapi Bali dari daerah lain (Jatman, 1993). Perbaikan tata laksana pemeliharaan dapat meningkatkan status hematologis sapi Bali jantan yang berasal dari peternakan rakyat di Sulawesi Selatan. Hal itu telah dilaporkan oleh Sonjaya, Jatman, dan Mahi (1993). Perubahan status hematologis sapi Bali jantan asal peternakan rakyat terjadi selama dipelihara pada kondisi percobaan, rata-rata jumlah sel darah merah yang meningkat dari  $4,644 \times 10^6$  sel (pada kondisi awal umur 12 bulan) menjadi  $5 - 6 \times 10^6$  pada kondisi pemeliharaan intensif umur 13 sampai dengan 15 bulan (Tabel 2.2). Peningkatan yang sama terjadi juga pada kadar PCV (nilai hematokrit) dan kadar hemoglobin darah.

Sebaliknya, rataan sel darah putih terjadi penurunan yang mungkin disebabkan oleh adanya perbaikan kondisi kesehatan selama pemeliharaan intensif.

Jumlah total sel darah putih beserta masing-masing jenisnya banyak dipengaruhi oleh beberapa faktor. Jumlah total sel darah putih pada hewan mempunyai variasi yang berbeda daripada manusia, yaitu bergantung pada jenis hewan, bangsa (*breed*), umur, jenis kelamin, dan kondisi hewan tersebut (Medway *et al.* 1969; Breazile 1971; Schalm 1975; Benjamin 1978; Archer dan Jeffcott 1979; Coles 1980). Beberapa hewan mempunyai sifat yang karakteristiknya tidak dipunyai hewan lain dalam memberikan reaksi terhadap suatu rangsangan, sehingga mengakibatkan kenaikan jumlah sel darah putih yang berbeda pula (Breazile, 1971).

Pada umumnya semakin meningkat umur hewan, semakin berkurang jumlah total sel darah putihnya dibandingkan dengan semasa awal hidupnya, kecuali pada kuda dan domba, bahkan semakin meningkat jumlahnya sampai pada umur tertentu (Schalm, 1975; Benjamin, 1978).

## **E. Sistem Peredaran Darah Mamalia**

Sistem peredaran darah adalah sistem yang mempunyai sangkut paut dengan pergerakan darah di dalam pembuluh darah dan juga perpindahan darah dari satu tempat ke tempat lain. Fungsi peredaran darah adalah mengangkut zat-zat makanan dari saluran pencernaan ke seluruh jaringan tubuh, mengangkut O<sub>2</sub> dari alat pernapasan ke seluruh jaringan tubuh dan CO<sub>2</sub> dari seluruh jaringan ke alat pernapasan, mengangkut hormon dari kelenjar endokrin ke target organ dan mendistribusikan panas dari sumbernya ke seluruh bagian tubuh. Dengan adanya peredaran darah, akan tercapai suatu lingkungan yang sesuai bagi jaringan tubuh. Kondisi yang konstan dari medium dalam

merupakan syarat mutlak bagi kehidupan jaringan. Kondisi yang konstan ini dapat tercapai bila ada pemindahan zat melintasi dinding pembuluh kapiler yang arahnya baik dari darah menuju cairan jaringan atau dari cairan jaringan menuju darah. Fenomena ini dikenal sebagai konsep “Homeostasis” yang dicetuskan oleh ahli ilmu faal bangsa Perancis, Claude Bennard.

Sistem sirkulasi pada mamalia secara umum terdiri dari tiga jalur, yaitu (1) jalur sistemik, (2) jalur pulmonari, dan (3) jalur portal.

Jalur sistemik dimulai dengan aorta yang berasal dari ventrikel kiri. Jalur ini membawa darah kaya akan oksigen dengan semua zat nutrisi yang dibutuhkan sel-sel. Darah dari ventrikel kiri dipompa ke aorta dan kemudian melalui cabang-cabangnya menuju ke setiap organ dalam tubuh, kecuali paru-paru. Setelah lewat pada berbagai organ darah masuk ke atrium kanan melalui vena cava superior dan vena cava inferior. Sirkulasi darah menuju ke seluruh jaringan, sehingga darah membawa oksigen untuk sel dan mengambil karbon dioksida dari sel. Jadi jalur sistemik meliputi pembuluh-pembuluh darah yang membawa darah dari ventrikel kiri menuju organ dan dari organ menuju atrium kanan.

Jalur pulmonari dimulai dengan jalur paru-paru yang berasal dari ventrikel kanan dan membawa darah miskin oksigen menuju paru-paru. Darah arteri mengalir dari paru-paru menuju ke atrium kiri melalui vena pulmonari. Jadi jalur pulmonari adalah pembuluh-pembuluh darah yang memindahkan darah dari ventrikel kanan ke paru-paru dan dari paru-paru menuju atrium kiri.

Jalur portal adalah jalur kembalinya darah dari organ saluran pencernaan, limfa dan pankreas menuju hati, dari hati kembali ke jantung. Pada mamalia, darah yang berasal dari jaringan tiba di jantung kanan, diarahkan menuju sirkulasi yang kecil (paru-paru), kembali ke

jantung kiri di mana dia akan dikeluarkan menuju sirkulasi sistemik (jaringan lain).

## **F. Sistem Peredaran Darah Burung**

Burung mempunyai jantung yang terdiri atas 4 ruang seperti pada mamalia. Darah vena dari seluruh tubuh mengalir ke atrium kanan kemudian mengalir menuju ke ventrikel kanan. Dari ventrikel kanan darah dialirkan melalui arteri pulmonalis menuju paru-paru, dari paru-paru ke vena pulmonalis dan ke ventrikel kiri. Pada waktu darah melalui paru-paru terjadi proses oksigenasi, yaitu proses di mana  $O_2$  dari paru-paru berdifusi ke dalam darah sehingga darah yang meninggalkan paru-paru kaya akan oksigen. Darah yang banyak mengandung oksigen dan sedikit karbon dioksida adalah darah arteri, sebaliknya darah yang miskin  $O_2$  dan kaya  $CO_2$  adalah darah vena. Dari ventrikel kiri darah mengalir ke atrium kiri yang selanjutnya dipompa keluar menuju aorta dan disebarkan ke kepala, hati, usus, dinding tubuh, dan ginjal. Perbedaan burung dengan mamalia, pada burung terdapat sistem porta ginjal, sedangkan pada mamalia tidak mempunyai sistem itu.

## **G. Fisiologi Pembuluh Darah**

### **1. Sistem Pembuluh Darah**

Kecepatan aliran darah suatu organisme bergantung pada berbagai faktor seperti tekanan arteri sistole, resistensi arteriol, keadaan aktivitas organisme, dan viskositas darah. Kecepatan mengalirnya darah berkaitan dengan jumlah luas penampang sayatan melintang pembuluh darah dari setiap sistem sirkulasi. Setiap cairan pembuluh didorong oleh jantung yang harus terbagi antara cabang arteri secara berurutan, kemudian arteriol dan kapiler-kapiler ini melibatkan suatu perkembangan yang semakin lama semakin lambat melewati suatu volume pembuluh yang besar.

Tabel 2.2 Rataan jumlah sel darah merah, sel darah putih, kadar hemoglobin, dan nilai hematokrit (PCV) pada sapi Bali jantan muda

Parameter Darah	Daerah Asal	Umur Sapi Jantan Muda (Bulan)*			
		12	13	14	15
Sel darah Merah	Barru	4.759 ±0,574	6.584 ±1.721	5.547 ±0,765	6.337 ±0,946
(x 10 <sup>6</sup> )	Bone	4.456 ±0,539	5.133 ±0,703	5.905 ±0,364	6.812 ±0,985
	Maros	4.718 ±0,451	6.743 ±0,946	5.547 ±0,622	5.990 ±0,842
	RATAAN	4.644 ±0,164	6.153 ±0,885	5.881 ±0,323	6.380 ±0,412
Sel darah putih	Barru	14.220±2.175	5.479 ±1.474	8.864 ±1.559	8.993 ±1.925
(x 10 <sup>3</sup> )	Bone	11.840±2.024	5.733 ±2.316	8.744 ±2.434	8.679 ±3.423
	Maros	12.260±2.841	4.107 ±1.080	10.190 ±1.722	8.982 ±3.494
	RATAAN	12.773±1.274	5.106 ±0,874	9.266 ±0,802	6.885 ±0,078
PCV (%)	Barru	27,57 ±3,55	29,29 ±5,82	25,86 ±3,39	22,57 ±4,65
	Bone	22,57 ±4,65	25,71 ±2,56	29,00 ±4,32	25,86 ±1,95
	Maros	24,57 ±3,65	29,29 ±5,22	27,29 ±1,79	26,86 ±5,55
	RATAAN	24,90 ±2,51	28,10 ±2,07	27,38 ±1,57	25,09 ±2,24
Hb (g/dl)	Barru	5,44 ±0,25	7,14 ±0,97	5,90 ±0,78	5,29 ±0,32
	Bone	5,29 ±0,32	6,16 ±0,76	5,94 ±0,48	6,37 ±0,24
	Maros	6,77 ±1,94	7,03 ±1,15	5,83 ±0,44	6,34 ±0,42
	RATAAN	5,83 ±0,81	6,77 ±0,54	5,89 ±0,56	6,00 ±0,61

Ket: \* Umur 12 bulan merupakan periode awal sebelum sapi dipelihara secara intensif  
 Sumber: Sonjaya H dkk. (1995)

Pada manusia, kecepatan darah berkisar 40 cm/detik keluar dari ventrikel kanan, dalam pembuluh aorta di mana permukaannya 5 cm<sup>2</sup>. Sebaliknya, pada kapiler permukaannya mencapai 3.500 cm<sup>2</sup> dengan kecepatan 70 mikrometer per detik.

Aspek lain yang penting dalam hemodinamika adalah berkaitan dengan sifat tidak dapat ditekan oleh tekanan dari suatu cairan. Jika suatu modifikasi volume pembuluh datang ke suatu tempat, darah akan

dikirim kembali ke dalam sirkulasi yang ada. Suatu vasodilatasi perototan yang berhubungan dengan aktivitas latihan harus diganti oleh vasokonstriksi pada daerah lain, tetapi jika tidak tekanan arteri akan turun secara drastis.

Peningkatan jumlah total sel darah putih disebut leukositosis. Keadaan ini dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu faktor fisiologis yang nampak jelas pada anjing dan kucing seperti adanya kenaikan jumlah total sel darah putih, terutama neutrofil. Apabila kedua jenis hewan tersebut mengalami stres atau ketakutan, keadaan ini lebih terkenal dengan sebutan emosional leukositosis. Demikian pula pada sapi, terjadi kenaikan jumlah total sel darah putih terutama neutrofil pada saat menjelang partus (Schalm, 1975). Sementara faktor patologis, contohnya pada keadaan hewan terserang infeksi lokal ataupun infeksi umum yang disebabkan bakteri.

Leukopenia atau berkurangnya jumlah total sel darah putih dari harga normal biasanya lebih cenderung bersifat patologis. Pada anjing yang menderita penyakit distemper, terjadi penurunan jumlah sel darah putih jauh dari harga normalnya.

Bakteri atau virus (umumnya organisme yang telah mati atau diinaktifkan). Jika seekor hewan telah berulang kali disuntik dengan suatu antigen yang spesifik, akan dihasilkan antibodi dalam tubuhnya untuk melawan antigen tertentu. Serum yang berasal dari hewan tersebut dapat disuntikkan kepada hewan yang peka terhadap penyakit yang sama untuk memberikan perlindungan pasif selama antibodi itu masih berada di tubuh hewan yang peka.

Total tekanan osmotik dari plasma disebabkan oleh garam-garam, yaitu sekitar 7 atmosfer, 0,9% larutan NaCl mempunyai tekanan osmotik yang sama dan dikatakan isotonik terhadap darah.

Dinding kapiler adalah permeabel terhadap garam-garam tetapi tidak permeabel terhadap protein plasma. Oleh karena itu, protein mempunyai kekuatan osmotik sekitar 25 mm Hg dan dinamakan tekanan osmotik koloid. Jika konsentrasi protein dalam plasma turun di bawah 30–40 gr/liter, tekanan osmotik koloid juga akan rendah sehingga air tidak akan mengisi kembali ke dalam ujung vena dari kapiler dan akan menghasilkan *oedema* (bengkak).

Tabel 2.3 Komposisi plasma protein (g/100 ml plasma) pada berbagai jenis ternak

Ternak	Total Plasma Protein	Fibrinogen	Total serum Protein	Albumin	Globulin
Kuda	6,84	0,34	6,50	3,25	3,25
Sapi	8,32	0,72	7,60	3,63	3,97
Domba	5,74	0,36	5,38	3,07	2,31
Kambing	7,27	0,60	6,67	3,96	2,71
Anjing	6,72	0,52	6,20	3,57	2,63

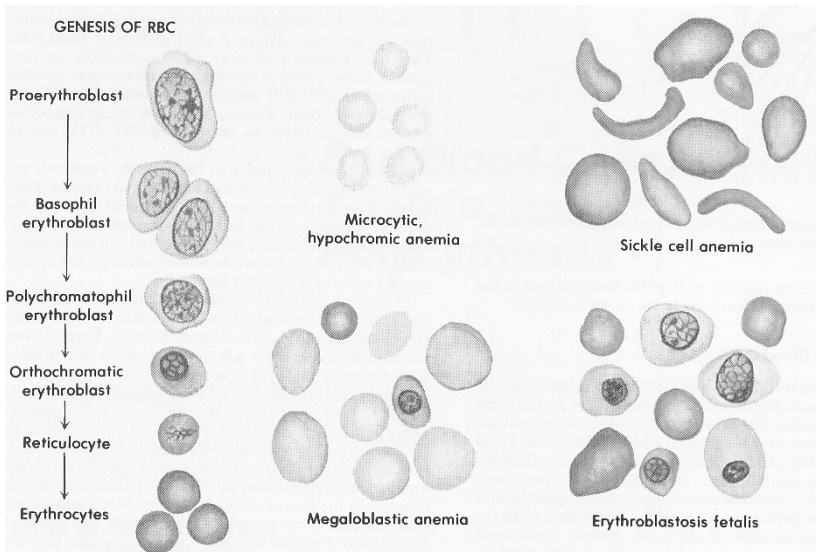
Sumber: Duker HH (1958)

Protein plasma terdiri atas dua jenis protein utama, albumin dan globulin. Fraksi globulin dapat dibagi menjadi alfa, beta, dan gamma globulin ( $\alpha$ -1,  $\alpha$ -2,  $\beta$ -1,  $\beta$ -2). Alfa dan beta globulin disintesis di dalam hati, gamma globulin disintesis oleh sel plasma dan limfosit pada saat sel-sel ini dirangsang oleh antigen. Umumnya antibodi yang telah diketahui termasuk dalam fraksi gamma globulin. Fibrinogen (salah satu faktor pembekuan darah) adalah suatu  $\beta$ -1 globulin yang disintesis di dalam hati. Albumin adalah protein paling melimpah di dalam plasma yang merupakan protein utama dihasilkan oleh hati. Albumin berperan penting di dalam pengikatan dan transpor berbagai zat di dalam darah dan bertanggung jawab pada sekitar 80% tekanan osmotik potensial dari plasma.

Protein plasma bertanggung jawab untuk sebagian dari kapasitas penyangga darah karena ionisasi lemah dari gugus molekul -COOH dan -NH<sub>2</sub>. Protein plasma juga penting sebagai pembawa antibodi (gamma globulin), sebagai pembawa hormon (misal tiroksin dan kortisol), zat-zat yang tidak larut dalam air seperti asam-asam lemak, zat besi, dan kalsium, serta berfungsi sebagai *buffer*.

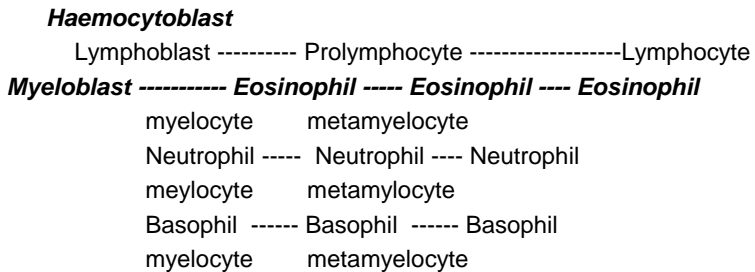
## 2. Hemopoiesis

Hemopoiesis adalah proses terbentuknya eritrosit, leukosit, dan platelet. Semua sel darah pada hewan dewasa berasal dari sumber yang sama, yaitu sel-sel batang primordia yang terdapat di dalam sumsum tulang. Proses pembentukan eritrosit disebut eritropoiesis, sedangkan proses pembentukan leukosit disebut leukopoiesis.



Gambar 2.4 Pembentukan sel darah merah (eritrosit) dan berbagai kelainan sel darah merah ; Sumber: Guyton (2000)

**Megakaryoblast** ---- **Megakaryocyte** ----- **Platelet**  
 Proerythroblast ---- Normoblast ---- Reticulocyte ---- Erythrocyte  
 Monoblast ----- Promonocyte ----- Monocyte



Gambar 2.5 Skema pembentukan sel-sel darah

### 3. Pembekuan Darah

Bila seekor hewan luka, kehilangan darah atau hemolimfe karena luka dapat mengganggu distribusi zat-zat ke dan dari sel. Hewan yang mempunyai sistem sirkulasi telah mengembangkan untuk hemostasis, yaitu menghentikan aliran darah setelah terjadi luka. Hemostasis menyangkut penutupan sementara pembuluh darah yang diikuti dengan pembentukan sumbat yang dengan kontraksinya menyatukan jaringan luka sampai terjadi penyembuhan.

#### 3.1 Mekanisme

Jika pembuluh darah seekor ternak terpotong atau rusak, pertama-tama akan terjadi penyempitan bagian yang terluka. Hal ini terjadi karena (1) kontraksi miogenik dari otot polos sebagai suatu spasme lokal dan (2) refleks saraf simpatetik yang merangsang serabut-serabut adrenergik.

Reaksi selanjutnya adalah pembentukan senyawa yang disebut tromboplastin. Pembekuan ini dapat terjadi baik oleh kerusakan jaringan atau hasil rangkaian reaksi yang kompleks dalam darah, melibatkan keping-keping darah dan rangkaian yang panjang dari faktor-faktor pembeku darah.

Pelepasan tromboplastin hasil dari perubahan protrombin yang ada dalam plasma menjadi trombin. Proses ini membutuhkan adanya ion kalsium. Protrombin dan faktor pembeku dibutuhkan untuk kegiatan yang dibuat dalam hati dan vitamin K sangat penting untuk

proses ini. Ketika agregasi keping-keping darah, faktor *plaquettaire* 3 (FP 3: kompleks membran phospho lipoprotein kaya akan phosphatidylserine) mempercepat aktivasi dari faktor X (faktor stuart) dan terjadi transformasi protrombin menjadi trombin.

### 3.2 Reaksi Kompleks Aktivasi Enzimatis

Koagulasi merupakan hasil rangkaian cepat dari aktivasi enzimatis, berdasarkan urutan yang tepat dan dengan suatu fenomena pengembangan tanda awal setiap tahap. Setiap enzim terdapat dalam plasma dengan bentuk prekursor tidak aktif dan kehilangan suatu molekul cukup untuk mengaktifkan. Faktor-faktor antihemofilik A (faktor VIII-C) dan akselerin (faktor V) merupakan satu-satunya kofaktor, tanpa diaktifkan oleh enzim.

Tabel 2.4 Faktor-faktor koagulasi darah

Faktor	Sinonim	Faktor	Sinonim
I	Fibrinogen	II	Protrombin
III	Tromboplastin	IV	Kalsium
V	Proakselerin, faktor labil, Ac-globilin	VII	Prokonvertin, Faktor stabil, Akselerator konversi serum protrombin (SPCA)
VIII	Antihemofilik globulin (AHG), faktor antihemofilik A	IX	Faktor christmas, komponen tromboplastin plasma (PTC), faktor antihemofilik B
X	Faktor Stuart-Prower	XI	Anteseden tromboplastin plasma (PTA), faktor antihemofilik C
XII	Faktor Hageman	XIII	Faktor stabilisasi fibrin

Telah dibuktikan secara in-vitro bahwa terdapat dua sistem yang mungkin untuk memulai koagulasi (Gambar 2.6).

- Cara endogen (berbagai zat yang terlibat khususnya berasal dari darah). Kontak darah dengan permukaan kasar atau elektronegatif menyebabkan koagulasi dalam beberapa menit akibat aktivasi faktor Hageman (faktor XII) yang berhubungan dengan *phospholipid* membran *plaquettaire* (FP3).

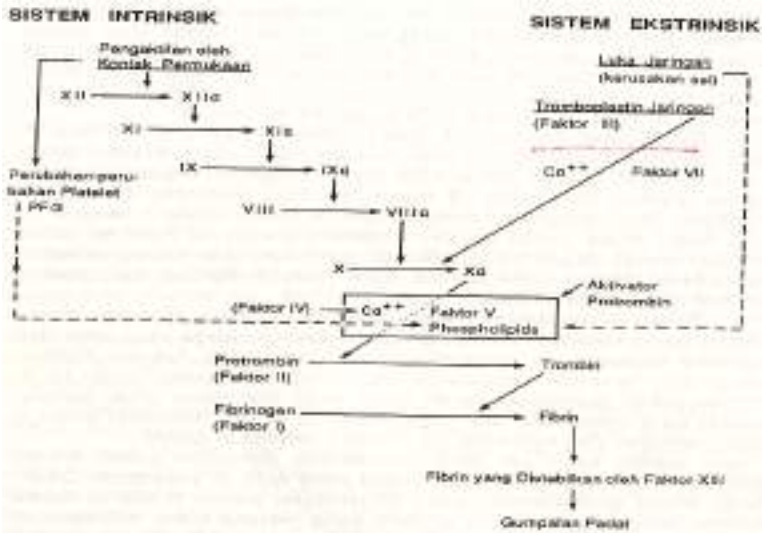
- Cara eksogen (benda-benda asing tertentu pada darah mengaktifkan cara ini). Ketika darah sedang kontak dengan phospholipid tertentu berasal dari membran jaringan (tromboplastin) atau faktor III, koagulasi terjadi dalam 10–15 detik.

Pada individu sehat, dua cara ini sering terjadi dan sangat sulit membedakan mana yang paling berperan dalam koagulasi darah. Berbagai faktor koagulasi berasal dari hati (kecuali faktor VIIIc dan III). Vitamin K dikenal sebagai antihemoragi yang berperan dalam sintesis berbagai faktor (seperti faktor II, VII, IX, dan X). Vitamin K juga mengontrol sintesis protein C.

Berbagai faktor yang dihilangkan pada waktu koagulasi darah dan tidak terdapat pada serum (fraksi cairan yang keluar dari darah menggumpal):

- fibrinogen ditransformasi ke fibrin;
- protrombin memberikan thrombin, dengan cepat tidak diaktifkan;
- accelerine dan faktor antihemophili A (VIIIc) tidak diaktifkan oleh thrombin; dan
- faktor stabilisator fibrin (XIII) tidak aktif.

Ion kalsium sangat penting dalam pembekuan darah, sehingga dapat dicegah dengan menghilangkan ion kalsium dari plasma. Hal ini dilakukan di laboratorium dengan penambahan asam sitrat, asam oksalat, atau EDTA ke dalam contoh darah. Ketiga bahan kimia tersebut mengikat ion kalsium.



Gambar 2.6 Dua cara permulaan koagulasi pada hewan vertebrata tingkat tinggi  
Sumber: Rieurtort (1982)

Bahan-bahan lain yang mencegah aktivitas vitamin K dalam hati dapat terlibat dalam mekanisme pembekuan darah. Terdapat beberapa zat kimia seperti dikumarol (C<sub>19</sub>H<sub>22</sub>O<sub>6</sub>) yang mempunyai aktivitas ini. Di alam, dikumarol sering terdapat pada beberapa tanaman dan ditemukan pada sapi yang sedang tumbuh tetapi mempunyai penyakit perdarahan setelah merumput di padang rumput.

Waktu pembekuan darah yang dibutuhkan untuk menggumpal sangat bervariasi untuk berbagai spesies (Tabel 2.5)

Tabel 2.5 Waktu koagulasi pada temperatur 25°C untuk berbagai jenis hewan

Hewan	Waktu (menit)	Hewan	Waktu (menit)
Kelinci	4	Kambing	2,5
Anjing	2,5	Sapi	6,5
Ayam	4,5	Kuda	11,5
Babi	3,5	Domba	2,5

Waktu perdarahan kulit adalah waktu yang dibutuhkan kulit berdarah untuk berhenti setelah penusukan kulit. Darah dihapus setiap 30 detik atau luka direndam dalam larutan fisiologis.

### 3.3 Limfa

Banyak cairan yang lewat melalui membran kapiler ke dalam jaringan, kemudian direabsorpsi. Kelebihan cairan jaringan diambil oleh sistem terbuka dari pembuluh-pembuluh halus yang disebut limfatik. Cairan limfa adalah jernih, tidak berwarna, mengandung sedikit protein tetapi zat-zat lainnya mempunyai komposisi yang sama seperti plasma. Semua limfa dikembalikan ke dalam darah vena melalui toraks dan saluran limfatik kanan. Pembuluh limfatik mengandung katup dan arus limfa diatur oleh kontraksi otot kerangka, terjadi tekanan negatif pada rongga torak.

Limfa yang membasahi saluran alat pencernaan mungkin mengandung sejumlah besar lemak. Limfa dalam saluran limfa torak sesudah makan biasanya kandungan lemaknya tinggi seperti susu. Limfosit dihasilkan dalam nodul-nodul limfa yang masuk ke sirkulasi melalui limfatik.

## 4. Regulasi Pembekuan Darah

Faktor-faktor koagulasi masuk ke dalam darah dalam jumlah yang banyak, misalnya jumlah protrombin yang ada dalam volume darah akan cukup memproduksi trombin yang diperlukan untuk koagulasi 100 kali volumenya. Berdasarkan sifat autokatalitik reaksi koagulasi,

peranan mekanisme pengaturan yang ketat sangat diperlukan untuk mencegah berlebihnya pembekuan.

Faktor inhibitor plasma yang berlawanan terhadap aksi faktor-faktor aktif koagulasi darah adalah:

- fibrin menginaktifkan trombin;
- kegiatan antitrombin III yang memiliki pengaruh pada sebagian enzim-enzim aktif untuk koagulasi (misalnya heparin);
- makroglobulin plasma mempunyai kemampuan sebagai antitrombin; dan
- protein C (hasil penemuan baru) menginaktifkan faktor V (accelerin) dan faktor antihemophilik A, aktivitasnya dikontrol oleh suatu penghambat sirkulasi.

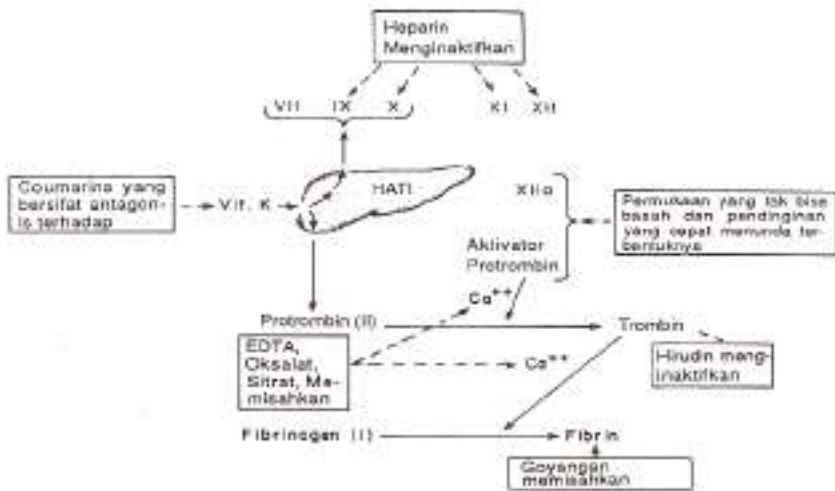
## **5. Golongan Darah**

Golongan darah pada manusia dan hewan didefinisikan sebagai jumlah dari semua antigen serologial, faktor golongan darah yang melekat pada membran sel darah merah. Antigen (aglutinogen) adalah senyawa kimia dan biasanya protein, bila disuntikkan ke suatu individu yang kekurangan antigen tersebut akan menyebabkan pembentukan senyawa khusus yang menetralisasi antigen, disebut antibodi (aglutinin). Bila antigen dilekatkan terhadap sel darah merah, reaksi antigen/antibodi menyebabkan kerusakan membran sel dan melepaskan haemoglobin. Proses ini disebut hemolisis atau penggumpalan sel-sel yang disebut aglutinasi. Hal ini diketahui sebagai awal pembentukan antibodi golongan darah, dapat ditentukan dengan mencampur sel darah merah dalam larutan garam isotonik dan serum yang diketahui mengandung antibodi. Jika terjadi aglutinasi atau hemolisis, golongan darah yang sesuai dapat ditentukan.

Faktor golongan darah dari sistem golongan darah diturunkan secara bebas satu sama lain. Beberapa sistem hanya mempunyai satu

gen atau satu faktor, sedangkan yang lainnya mempunyai lebih faktor. Seorang individu hanya dapat mempunyai dua gen dengan satu golongan khusus, satu dari setiap pasang kromosom diturunkan dari orang tuanya (Tabel 2.7).

Pada manusia, pengetahuan golongan darah memudahkan penggunaan darah dalam transfusi darah. Hal ini disebabkan jumlah yang banyak dari golongan darah, sehingga jumlah kombinasinya sangat besar. Hal ini juga membuat penggunaan golongan darah dijadikan sebagai identifikasi yang dilihat dari aspek keturunan golongan darah. Golongan darah dapat ditentukan untuk menentukan keturunan, baik kepentingan manusia maupun dalam pemuliaan ternak.



Gambar 2.7 Skema mekanisme zat antikoagulasi dalam mencegah pembekuan darah

Tabel 2.7 menunjukkan bahwa darah dari golongan darah A hanya dapat diberikan kepada orang yang tidak mempunyai antibodi a, yaitu golongan darah A dan AB. Hal yang sama, golongan darah B hanya dapat diberikan kepada orang yang tidak mempunyai antibodi b, yaitu orang bergolongan darah B dan AB. Golongan darah AB hanya dapat

diberikan kepada resipien darah AB karena golongan darah lainnya mempunyai antibodi. Orang yang bergolongan darah O disebut Donor Universal, sedangkan AB disebut Resipien Universal. Selain dari golongan darah klasik yaitu A, B, dan O, masih ada klasifikasi golongan darah baru seperti RH, MNS, P, Lutheran, Kell, Lewis, Dffy, dan Kidd. Di antara klasifikasi golongan darah tersebut, yang penting adalah golongan darah RH karena berhubungan dengan reaksi transfus hemolitik dan penyakit hemolitik pada anak yang baru lahir.

## RINGKASAN

1. Darah terdiri atas sel-sel yang terdapat dalam cairan plasma yang meliputi air, sel darah merah, beberapa jenis sel darah putih, keping darah, elektrolit, dan zat-zat yang transit. Sel darah merah mengandung hemoglobin serta mengangkut oksigen dan karbon dioksida. Sel-sel darah putih yaitu limfosit, monosit, neutrofil, eosinofil, dan basofil yang bergerak membungkus bakteri serta terlibat dalam proses kekebalan tubuh. Keping-keping darah berperan dalam koagulasi darah.
2. Plasma darah merupakan cairan kekuning-kuningan dan mengandung banyak protein, seperti fibrinogen, albumin, dan globulin. Protein plasma bertanggung jawab sebagai dapar (sistem *buffer*) dan pembawa antibodi, hormone, dan zat-zat yang tidak larut dalam air.

3. Pembekuan darah merupakan proses hemostasis yang menghentikan aliran darah setelah terjadi luka. Proses pembekuan darah dilakukan dengan dua cara, yaitu endogen dan eksogen. Cara endogen melibatkan zat-zat yang berasal dari darah itu sendiri, sedangkan cara eksogen melibatkan benda asing tertentu yang mengaktifkan pembekuan darah.
4. Golongan darah didefinisikan sebagai sejumlah antigen serologi partikel darah yang melekat pada membran sel darah merah. Golongan darah individu hewan atau manusia dapat ditentukan berdasarkan terjadi atau tidaknya aglutinasi antara sel darah merah dari antibodi serum.

Latihan berikut ini sengaja disusun untuk memantapkan Anda terhadap materi yang dibicarakan, kerjakan latihan berikut dengan sungguh-sungguh.

1. Jelaskan struktur dan fungsi darah!
2. Sebutkan sifat fisik dan kimia darah!
3. Jelaskan mekanisme fisiologis terjadinya pembekuan darah!
4. Apa yang menyebabkan ternak kalau luka darahnya tidak mengalami pembekuan?
5. Mengapa golongan darah O disebut sebagai golongan darah universal, sedangkan golongan darah AB sebagai resipien universal?



## **BAB III**

# **FISIOLOGI JANTUNG DAN SISTEM SIRKULASI DARAH**

Semua jenis hewan yang mempunyai sistem peredaran memiliki suatu bentuk pompa berotot yang mendorong darah atau limfa. Bentuk yang paling sederhana adalah pembuluh yang berdenyut di mana darah didorong oleh gelombang kontraksi peristaltik, tidak terdapat katup-katup, dan biasanya terdapat pada beberapa cacing primitif. Bentuk lain adalah jantung berkamar dengan dinding berotot dan katup-katup di antara kamar-kamar yang menyebabkan darah mengalir hanya dalam satu arah. Jantung terletak dalam suatu rongga, seperti sinus perikardial pada arthropoda atau selom perikardial pada moluska dan vertebrata yang memudahkan kontraksi dan ekspansi.

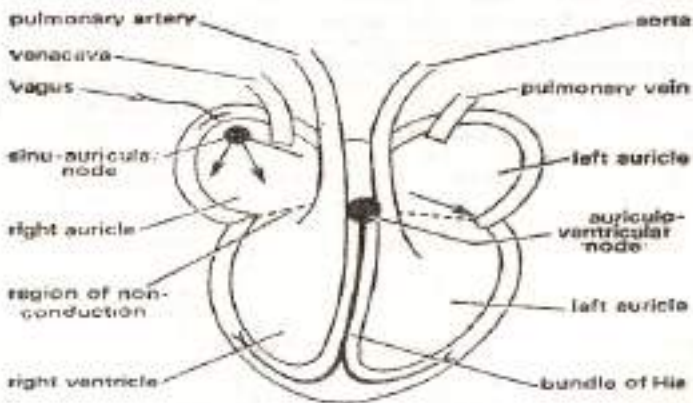
Studi fisiologi jantung dapat dilakukan dengan menganalisis fungsi jantung secara *in situ*, jantung diisolasi atau bagian dari otot jantung/sel-sel otot jantung diisolasi dan ditempatkan dalam kultur sel. Pencatatan tekanan intraventrikel dan intra-atrium dilakukan dengan bantuan mikromanometer dimasukkan melalui pembuluh darah jantung yang merupakan metode praktis untuk mempelajari jantung di tempat. *Echocardiography* atau pencatatan elektrokardiografi merupakan alat yang berguna untuk mempelajari jantung secara *in situ*. Sel-sel jantung yang diisolasi dapat membuat pencatatan aksi potensial intraseluler dengan cara memasukkan mikro-elektroda yang peka pada organ jantung yang sedang berdenyut.

Bab ini akan membahas mengenai struktur anatomi jantung, siklus kontraksi jantung, dan kontrol kardiovaskular. Pembahasan dalam

sistem sirkulasi darah difokuskan pada sistem peredaran darah tertutup di dalam tubuh mamalia, mekanisme pertukaran zat nutrisi dan oksigen pada sistem darah kapiler. Diharapkan setelah membaca bab ini, pembaca mampu memahami peranan jantung dalam mendistribusikan darah ke seluruh bagian tubuh, faktor-faktor yang mengatur sistem kardi-ovaskular, perbedaan sistem peredaran darah terbuka dan tertutup, tekanan darah pada pembuluh darah, sistem pengaturan sirkulasi darah, serta mekanisme pertukaran zat pada pembuluh darah kapiler.

## A. Struktur Anatomi Jantung

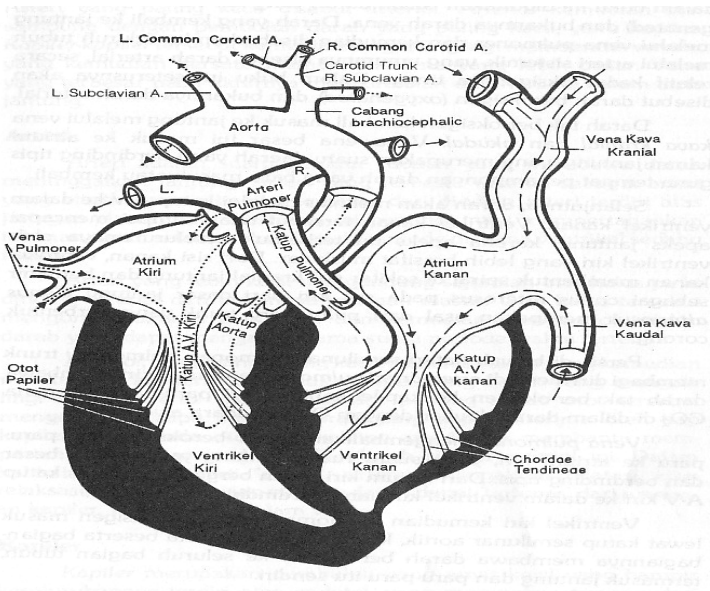
Jantung mamalia mempunyai 4 ruangan, simpul sinusatrium (SA) terletak pada perbatasan vena cava superior dengan atrium kanan. Simpul atrioventrikuler (AV) terletak pada bagian posterior kanan septum interatrial (Gambar 3.1).



Gambar 3.1. Skema sederhana jantung mamalia ; Sumber: Verma *et al.* (1996)

Terdapat 3 berkas serabut-serabut atrium yang mengandung serabut *purkinje* dan menghantarkan impuls dari simpul SA ke simpul AV, traktus internodal Bachman, traktus internodal media Wenkebach,

dan traktus internodal posterior Thorel. Serabut-serabut ini berkumpul menjadi satu dan saling menjalin dengan serabut-serabut dalam simpul AV. Simpul AV dilanjutkan dengan berkas His yang memberi cabang kiri pada puncak septum interventrikular dan melanjutkan diri sebagai cabang kanan. Berkas cabang kiri bercabang menjadi fasciculus anterior dan fasciculus posterior.



Gambar 3.2 Pandangan anterior dari jantung yang terbuka  
 Sumber: Crouh Je (1985)

Jantung terletak dalam rongga perikardial dan diselaputi dengan epitel selom yang licin, perikardium viseral. Jantung dilapisi oleh epitel skuama sederhana dan endotel yang melapisi semua bagian sistem sirkulasi. Sebaliknya, dinding terdiri atas jaringan ikat padat yang membentuk suatu kerangka fibrosa dan otot jantung. Otot jantung (*myocardium*) merupakan otot kerangka yang serabut-serabutnya bercabang dan beranastomosis secara erat. Permukaan luar dan dalam jantung ditutup oleh lapisan sel-sel epitel, masing-masing disebut

*endocardium* dan *epicardium*. Seluruh bagian jantung dikelilingi oleh lapisan transparan yang disebut *pericardium*.

Jantung diinervasi oleh sistem saraf simpatik dan parasimpatik. Saraf parasimpatik menuju sel-sel ganglia dekat sino-atrium dan simpul atrioventrikuler. Serabut-serabut saraf dari ganglia menuju simpul-simpul dan ke otot jantung. Saraf simpatik mengikuti pembuluh arteri pada jantung untuk mencapai semua sel-sel otot.

Jantung terdiri atas empat pompa kamar, jantung, dan sistem pembuluh di mana darah bersirkulasi. Pembuluh darah yang membawa darah keluar dari jantung adalah pembuluh arteri, sedangkan pembuluh yang membawa darah menuju jantung adalah pembuluh vena. Di antara arteri dan vena adalah pembuluh kapiler yang merupakan tempat pertukaran darah dan jaringan. Darah berasal dari daerah *periphery* tubuh, selain dari paru-paru yang kembali ke dinding tipis atrium kanan. Dari sini darah melewati ventrikel kanan yang memompa ke dalam sirkulasi pulmonar. Vena pulmonar mengembalikan darah ke atrium kiri dan masuk ke ventrikel kiri yang akhirnya dipompa ke dalam aorta. Karakteristik fisiologis otot jantung dicirikan oleh beberapa sifat fungsional jantung.

1. **Excitability (eksitabilitas)** adalah kemampuan jantung untuk berkontraksi (mengadakan respons) bila mendapat rangsangan dengan intensitas yang cukup besar. Respons jantung berupa perambatan potensial aksi dan kontraksi mekanik. Potensial aksi jantung mempunyai bentuk seperti plateau dan berlangsung cukup lama (beberapa detik), sedangkan pada saraf ordenya dalam milidetik.
2. **Conductivity (daya hantar)** adalah kemampuan jantung untuk merambatkan impuls. Meskipun semua bagian jantung mampu menghantarkan atau merambatkan impuls, tetapi kemampuan

rambatan impuls sangat berkembang pada jaringan purkinje dan berkas His.

3. **Contractility (daya kontraksi)** adalah kemampuan jantung untuk berkontraksi. Kontraksi otot jantung dikenal dengan sistol, kemudian relaksasi atau pengendoran disebut diastole. Kecepatan kontraksi jantung lebih lambat daripada kontraksi otot polos. Diastol sama pentingnya dengan sistol karena diastole yang berlangsung lama menyebabkan lebih banyak darah dapat ditampung di dalam jantung sehingga kerja jantung lebih efektif.
4. **Automaticity (keotomatisan)** adalah kemampuan jantung untuk berdenyut dengan sendirinya tanpa ada impuls yang datang dari luar jantung. Denyut jantung ditimbulkan oleh otot jantung sendiri, sedangkan frekuensi denyut jantung dipengaruhi oleh aktivitas saraf dan hormon. Pada mamalia, yang pertama menimbulkan denyut adalah **nodus sinoauricularis**, sedangkan pada katak adalah **sinusvenosus**.
5. **Hukum Starling pada jantung:** otot jantung tidak berkontraksi bila kekuatan rangsangan tidak cukup kuat, tetapi akan berkontraksi secara maksimal jika kekuatan rangsangan cukup kuat. Sifat dari otot jantung ini dikenal sebagai '*all and none law*'.
6. **Aksi vagus terhadap jantung:** saraf vagus jantung akan menghambat gerakan jantung dan diimbangi dengan saraf simpatetik yang mempercepat denyut jantung.
7. **Jantung mempunyai periode refrakter (*refractory period*) yang lama.** Periode refrakter adalah saat yang menunjukkan bahwa jaringan hidup kehilangan sifat eksitabilitas untuk sementara, jadi pada saat itu jaringan tersebut tidak memberikan respons bila dirangsang. Periode refrakter pada jantung berlangsung selama

*systole* dan terjadi cukup lama (dalam orde detik). Terdapat dua periode refrakter pada jantung, yaitu periode refrakter absolut (PRA) dan periode refrakter relatif (PRR). PRA adalah periode yang menunjukkan tidak timbulnya respons terhadap jantung bagaimanapun besarnya rangsangan yang ada. PRA bertepatan dengan periode sistol. PRR adalah periode yang menunjukkan jantung masih dapat menimbulkan respons asal rangsangan yang diberikan cukup besar. PRR bertepatan dengan periode diastol. Respons yang timbul pada waktu jantung dirangsang pada periode diastol disebut **ekstrasistol**.

## B. Siklus Jantung

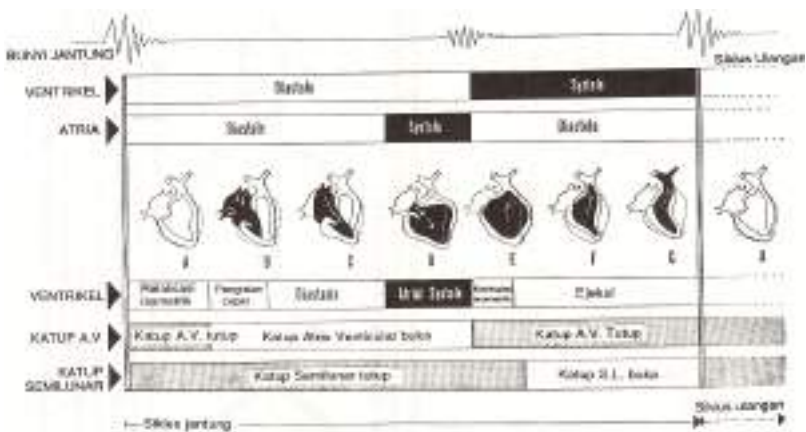
Siklus kontraksi jantung dapat dibagi menjadi tiga periode, yaitu presistol, sistol, dan diastol. Presistol adalah waktu permulaan kontraksi atrium sampai ke permulaan kontraksi ventrikel. Sistol bekerja dari permulaan sampai dengan akhir kontraksi ventrikel. Diastol adalah periode di mana atrium dan ventrikel dalam keadaan istirahat. Urutan kontraksi (sistol) dan relaksasi (diastol) dari berbagai bagian alat jantung berasal dari variasi tekanan intern atrium dan ventrikel (Gambar 3.3).

Cara bekerja katup-katup jantung bergantung seluruhnya pada perbedaan tekanan yang melewati atrium dan ventrikel. Perubahan tekanan dalam kamar-kamar jantung dapat diukur dengan alat kateter yang dimasukkan melalui vena dan arteri siklus jantung bagian kiri (Gambar 3.3a dan 3.3b). Ventrikel berelaksasi sesudah denyut terakhir, sehingga tekanan turun sampai di bawah tekanan dalam atrium, katup atrioventrikuler terbuka, dan darah tambahan ke dalam ventrikel. Hal yang penting dicatat adalah tidak adanya katup yang menjaga pemasukan atrium, boleh karena merupakan pompa yang tidak efektif, berhenti pada simpul atrioventrikuler sehingga ventrikel berkontraksi baik sesudah atrium. Setelah kontraksi ventrikel dimulai, tekanan dalam

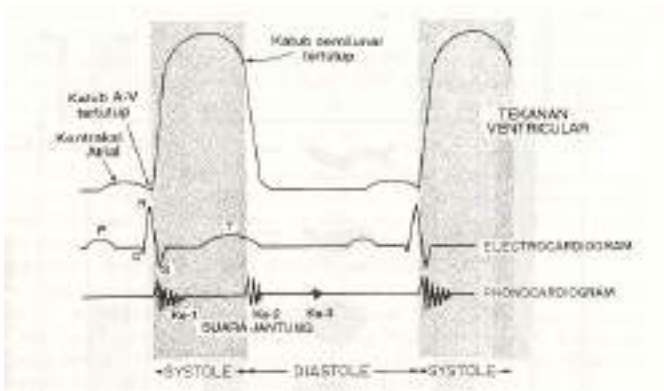
ventrikel meningkat dan katup atrioventrikuler menutup fase pengisian berakhir dengan kontraksi yang meningkatkan tekanan di dalam ventrikel, tetapi tidak ada darah yang dikeluarkan sampai katup aorta terbuka. Hal ini terjadi bila tekanan ventrikel meningkat dari dalam aorta, kemudian darah masuk ke dalam aorta lebih cepat daripada yang tinggal melalui pembuluh ventrikel (Gambar 3.4). Oleh karena itu, tekanan pada aorta meningkat. Bila ventrikel berelaksasi, katup aorta tidak segera membuka. Pemompaan berlangsung terus, tetapi pada tingkat terendah karena tekanan aorta turun lebih cepat dibandingkan dengan tekanan ventrikel. Akhirnya, tekanan ventrikel turun drastis di bawah tekanan aorta dan katup tertutup. Kontraksi diikuti oleh relaksasi seluruh jantung dan pembukaan katup atrioventrikuler.

### C. Denyut Jantung dan Integrasinya

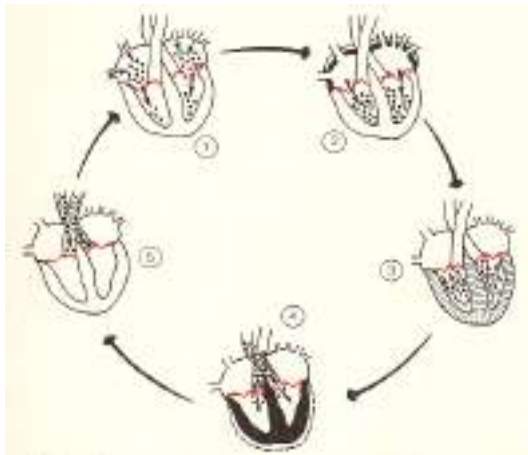
Jantung yang dipisahkan dari tubuh, jika diperlakukan dengan cara yang baik akan berdenyut terus. Suatu sistem integrasi di dalam jantung memulai denyutan dan merangsang kamar yang berurutan secara bergantian.



Gambar 3.3a Peristiwa-peristiwa yang terjadi selama satu siklus jantung. Sumber: Frandson (1993)



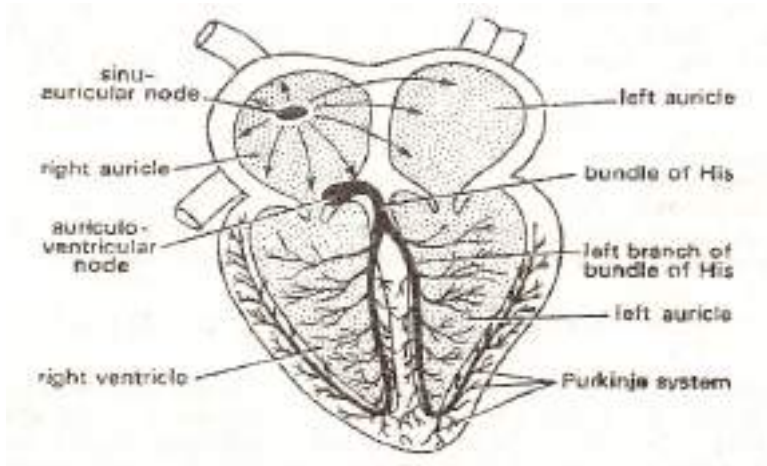
Gambar 3.3b Hubungan tekanan *ventricular* terhadap elektrokardiogram dan fonokardiogram



Gambar 3.4. Kejadian utama dari siklus jantung mamalia

Pada mamalia, tiap kontraksi dimulai dengan simpul sinoatrium atau "pemacu" yaitu suatu simpul yang terdiri atas otot jantung khusus (serabut *purkinje*) yang terletak dalam bagian dinding atrium kanan tempat sinus venosus digabungkan (Gambar 3.5). Impuls-impuls ini menyebar ke seluruh bagian atrium dan ke simpul serabut *purkinje* lainnya, yaitu simpul atrioventrikel, dari impuls yang diteruskan melalui jalur serabut *purkinje* ke semua bagian ventrikel. Tingkat denyut jantung juga diatur oleh sistem saraf otonom. Denyut jantung diturunkan oleh

impuls-impuls dalam serabut saraf vagal jantung dan ditingkatkan oleh muatan saraf simpatik jantung.



Gambar 3.5 Diagram yang memperlihatkan letak daerah *pacemakers* pada jantung mamalia ; Sumber: Verma *et al.* (1996)

## D. Output Jantung (*Cardiac Output*)

Volume darah yang dipompa keluar dari setiap ventrikel dalam satu menit didefinisikan sebagai *output* jantung. Hal ini sama dengan hasil dari volume *stroke* dan denyut jantung. Volume *stroke* bergantung pada kekuatan denyut jantung. Kontraksi meningkat di bawah pengaruh sistem saraf simpatik atau hormon adrenalin. *Output* jantung dapat dinyatakan dengan rumus berikut:

$$OJ = DJ \times VS$$

di mana: OJ = *output* jantung

DJ = denyut jantung

VS = volume stroke

*Output* jantung juga dapat didefinisikan sebagai jumlah darah atau hemolimfa yang dipompa per unit waktu, harus disesuaikan dengan

kebutuhan yang berbeda-beda. *Output* jantung dapat ditingkatkan dengan: (1) adanya jantung yang lebih besar, (2) peningkatan laju denyut jantung (denyut nadi), dan (3) peningkatan volume *output* per denyut atau detak (volume detak).

Tabel 3.1 Ritme jantung dan volume darah per menit pada berbagai spesies vertebrata

Spesies Vertebrata	Ritme (denyut /menit)	Volume Darah (ml/kg/menit)
Ikan morue (18°C)	30	9–10
Reptil: Iguana (20°C)	20	40
Kura-kura (22°C)	40	60
Unggas: Itik	240	500
Burung unta (80 kg)	60–70	
Burung colibri (4 g)	615	
Mamalia: Tikus putih	350	200
Anjing (istirahat)	100	150
Manusia (istirahat)	70	85
Manusia (aktivitas)	180	510

Sumber: Gordon *et al.* (1972)

Penyesuaian *output* jantung untuk kebutuhan metabolisme ditentukan oleh perubahan laju denyut jantung. Laju denyut jantung meningkat selama latihan, tetapi laju peningkatan tidak sebanding dengan peningkatan kebutuhan oksigen. Darah itu memberi lebih banyak oksigen karena tekanan oksigen dalam jaringan yang aktif akan menurun dan oksigen dilepaskan oleh darah dalam jumlah yang lebih besar.

Volume detak jantung juga akan meningkat sedikit pada waktu latihan karena peningkatan tekanan dan lebih cepat kembalinya darah vena merenggangkan otot jantung. Hal ini menyebabkan jantung berkontraksi lebih kuat dan mengeluarkan volume darah yang lebih

besar, diterima pada tiap periode diastol atrium. Kemampuan jantung untuk menyesuaikan *output* per detak terhadap jumlah darah yang diterimanya disebut hukum jantung dari Starling.

*Output* jantung diatur oleh otak yang menjamin tekanan darah arteri tetap konstan dan jaringan-jaringan disuplai cukup dengan darah. Baroreseptor pada dinding aorta dan arteri karotis dihilangkan pada peningkatan denyut jantung bila tekanan darah meningkat. Saraf aferen dari baroreseptor melewati pusat penghambat jantung (kardioinhibitor) impuls-impuls dihasilkan dalam baroreseptor yang memengaruhi pusat kardioinhibitor yang menghasilkan penurunan denyut jantung dan turunya tekanan darah.

## E. Nutrisi Jantung

Otot jantung menerima darah melalui dua arteri koroner yang berasal dari aorta sesudah katup aorta. Vena sistem koroner terbuka ke dalam atrium kanan. Pada waktu ternak sedang istirahat, sekitar 3–5% darah dipompa dari jantung masuk ke sirkulasi koroner. Latihan fisik meningkatkan jumlah ini secara nyata.

## F. Kontrol Kerja Jantung

Kerja jantung di bawah kontrol saraf dan kontrol hormon. Kedua kontrol ini bisa bekerja sendiri-sendiri maupun bekerja secara sinergi.

### 1. Kontrol Saraf

Jantung banyak diinervasi oleh saraf parasimpatetik (saraf vagus) dan serabut saraf simpatetik. Sebagian besar jantung vertebrata adalah miogenik (tersusun dari otot jantung). Oleh karena itu, rangsangan kontraksi berasal dari jantung dan serabut saraf simpatetik yang menginervasi jantung agar dapat meningkatkan atau menurunkan

aktivitas jantung, sedangkan serabut saraf parasimpatetik menghambat aktivitas jantung.

Rangsangan kuat saraf simpatetik dapat meningkatkan denyut jantung pada manusia sampai 200 kali per menit, bahkan sampai 250 kali per menit pada orang muda. Rangsangan saraf simpatetik meningkatkan kerja jantung, juga meningkatkan volume darah yang dipompa sekaligus tekanan untuk mendorong darah keluar dari jantung. Jadi rangsangan simpatetik dapat meningkatkan kardiak *output*. Sebaliknya, rangsangan kuat saraf parasimpatetik (saraf vagus) dapat menghentikan denyut jantung beberapa detik, kemudian bila rangsangan berhenti denyut jantung akan berkurang sampai 20–30 kali per menit. Rangsangan kuat saraf parasimpatetik dapat menurunkan kerja jantung sebanyak 20–30%.

## 2. Kontrol Hormonal

Aktivitas jantung juga dikontrol oleh hormon-hormon tertentu, seperti noradrenalin dan adrenalin, asetilkolin dan catecholamine. Hormon noradrenalin dan adrenalin meningkatkan ritme kontraksi jantung dengan meningkatkan daya hantar natrium (Na<sup>+</sup>) dan konsekuensinya meningkatkan depolarisasi sel-sel nodus jantung. Asetilkolin dihasilkan oleh serabut saraf parasimpatetik yang memperlambat ritme denyut jantung dengan meningkatkan daya hantar ion kalium (K<sup>+</sup>) yang menyebabkan hiperpolarisasi membran dan akhirnya memperlambat depolarisasi spontan. Pada konsentrasi tinggi, asetilkolin juga dapat memblokir daya hantar atrioventrikuler dan autoritmik ventrikel. Katekolamin dapat meningkatkan kekuatan semua sel-sel jantung.

## RINGKASAN

1. Jantung mamalia berkamar dan mempunyai katup-katup untuk mencegah darah mengalir balik. Jalinan serabut otot-otot jantung

memungkinkan otot-otot atrium dan ventrikel mengadakan respons satu unit dengan cara "semua atau tidak sama sekali".

2. Irama kontraksi yang terdapat di dalam otot jantung itu sendiri berasal dari simpul sinoatrial dan menyebar melalui otot-otot dan serabut *purkinje* khusus ke dalam bagian lainnya. Saraf yang berakhir pada simpul sinoatrial dan serabut otot jantung meningkatkan atau menurunkan laju dan kekuatan kontraksi.

Latihan berikut ini sengaja disusun untuk memantapkan Anda terhadap materi yang baru dibicarakan. Kerjakanlah latihan berikut dengan sungguh-sungguh!

1. Apa yang dimaksud dengan *diastole*, *systole*, dan *output* jantung?
2. Jelaskan mengapa jantung yang dikeluarkan dari tubuh dalam kondisi fisiologis masih bisa berdenyut!
3. Jelaskan siklus kontraksi jantung!
4. Jelaskan salah satu mekanisme sistem kontrol kardiavaskular yang Anda ketahui!

## G. Sistem Sirkulasi Cairan Tubuh

Berbagai tingkat organisasi dari sistem yang menjamin sirkulasi lingkungan ekstraseluler dapat ditemukan pada berbagai jenis hewan seperti yang terlihat pada Gambar 3.6. Pada dasarnya sistem transpor internal dapat dibagi menjadi 4 bagian.

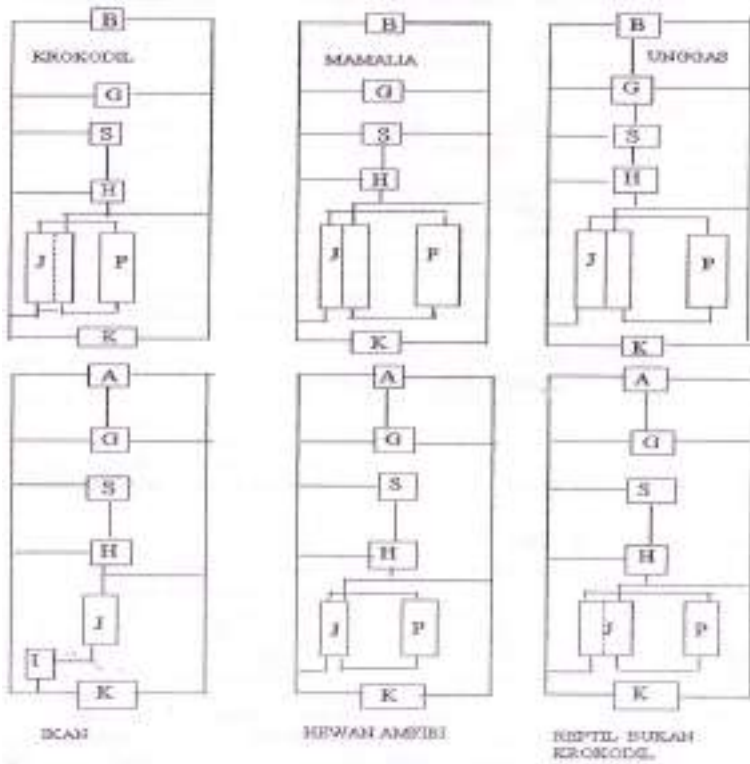
**Pergerakan pada lingkungan eksterior** seperti pada spon dan canidae di mana transpor zat-zat makanan dan pertukaran metabolisme dijamin oleh aktivitas sel-sel silia, flagela, atau otot.

**Pergerakan larutan internal yang dijamin oleh sistem perototan.** Maksudnya adalah gerakan internal yang menjamin sirkulasi cairan interstitial dalam pseudocolumn seperti pada nematoda dan rotifera atau alat sirkulasi dan sinus pada anelida.

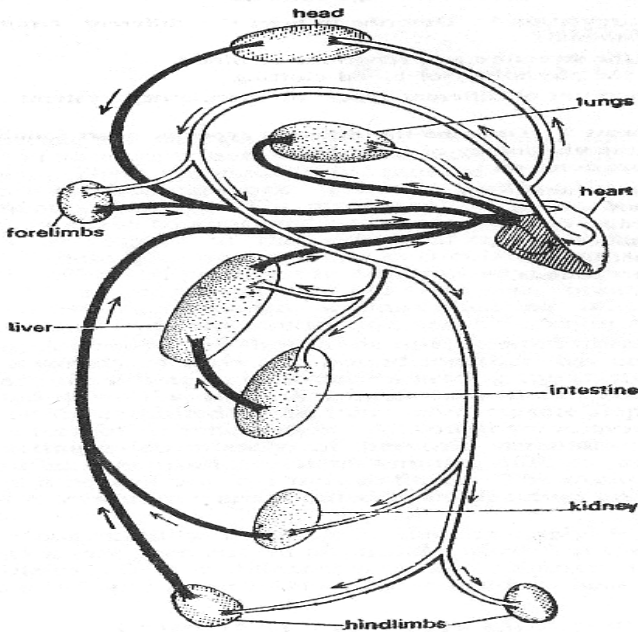
**Pergerakan hemolimf atau darah dalam sistem sirkulasi terbuka.**

Sistem sirkulasi (peredaran darah) terbuka merupakan suatu sistem di mana hemolimf, juga sering disebut darah, oleh jantung kemudian beredar melalui rangkaian pembuluh arteri menuju ke ruang terbuka yang dikenal dengan nama hemocoel atau blastocoel. Ruang terbuka ini pada umumnya terletak di antara ektoderm dan endoderm. Cairan yang terdapat di dalam hemocoel disebut hemolimf. Hemolimf ini tidak beredar melalui pembuluh kapiler, tetapi langsung menggenangi sel-sel jaringan. Sebagian besar arthropoda dan moluska mempunyai sistem sirkulasi yang disebut hemolimf, di mana kandungan hemolimf diatur dengan gerakan suatu pompa jantung. Hemolimf bergerak lewat pembuluh darah menuju ruang interstisial dan kembali ke jantung melalui sinus.

**Pergerakan darah pada sirkulasi tertutup.** Satu atau beberapa jantung melakukan sirkulasi darah dalam suatu sistem pembuluh darah yang kompleks. Sistem ini banyak terdapat pada vertebrate, tetapi juga ditemukan pada kelompok invertebrata. Misalnya pada ikan yang tidak mempunyai paru-paru, darah yang berasal dari jaringan melewati jantung terus memasuki insang dan selanjutnya menuju seluruh jaringan.



Gambar 3.6 Skema lintasan utama dari sirkulasi darah pada vertebrata  
 Sumber: Gordon *et al.* (1972)



Gambar 3.7 Skema sirkulasi darah mamalia

## H. Sistem Peredaran Darah Mamalia

Sistem peredaran darah adalah sistem yang mempunyai sangkut paut dengan pergerakan darah di dalam pembuluh darah dan juga perpindahan darah dari satu tempat ke tempat lain. Fungsi peredaran darah adalah mengangkut zat-zat makan dari saluran pencernaan ke seluruh jaringan tubuh, mengangkut  $O_2$  dari alat pernapasan ke seluruh jaringan tubuh dan  $CO_2$  dari seluruh jaringan ke alat pernapasan, mengangkut hormon dari kelenjar endokrin ke target organ dan mendistribusikan panas dari sumbernya ke seluruh bagian tubuh. Dengan adanya peredaran darah, maka akan tercapai suatu lingkungan yang sesuai bagi jaringan tubuh. Kondisi yang konstan daripada medium dalam merupakan syarat mutlak bagi kehidupan jaringan. Kondisi yang konstan ini dapat tercapai bila ada pemindahan zat melintasi dinding pembuluh kapiler yang arahnya baik dari darah menuju cairan jaringan

atau dari cairan jaringan menuju darah. Fenomena ini dikenal sebagai konsep “homeostasis” yang dicetuskan oleh ahli ilmu faal bangsa Perancis, Claude Benhard.

Sistem sirkulasi pada mamalia secara umum terdiri atas tiga jalur, yaitu (1) jalur sistemik, (2) jalur pulmonary, dan (3) jalur portal. Jalur sistemik dimulai dengan aorta yang berasal dari ventrikel kiri. Jalur ini membawa darah kaya akan oksigen dengan semua zat nutrisi yang dibutuhkan sel-sel. Darah dari ventrikel kiri dipompa ke aorta dan kemudian melalui cabang-cabangnya menuju ke setiap organ dalam tubuh kecuali paru-paru. Setelah lewat pada berbagai organ darah masuk ke atrium kanan melalui vena cava superior dan vena cava inferior. Darah membawa oksigen untuk sel dan mengambil karbondioksida dari sel karena sirkulasi darah menuju seluruh jaringan. Jadi jalur sistemik meliputi pembuluh-pembuluh darah yang membawa darah dari ventrikel kiri menuju organ dan dari organ menuju atrium kanan.

Jalur pulmonari dimulai dengan jalur paru-paru yang berasal dari ventrikel kanan dan membawa darah miskin oksigen menuju paru-paru. Darah arteri mengalir dari paru-paru menuju ke atrium kiri melalui vena pulmonari. Jadi jalur pulmonari adalah pembuluh-pembuluh darah yang memindahkan darah dari ventrikel kanan ke paru-paru dan dari paru-paru menuju atrium kiri.

Jalur portal adalah jalur kembalinya darah dari organ saluran pencernaan, limfa, dan pankreas menuju hati, dari hati kembali ke jantung. Pada mamalia, darah yang berasal dari jaringan tiba di jantung kanan diarahkan menuju sirkulasi yang kecil (paru-paru), kembali ke jantung kiri di mana dia akan dikeluarkan menuju sirkulasi sistemik (jaringan lain) (Gambar 3.6).

## **I. Sistem Peredaran Darah Burung**

Burung mempunyai jantung yang terdiri atas 4 ruang seperti pada mamalia. Darah vena dari seluruh tubuh mengalir ke atrium kanan kemudian mengalir menuju ke ventrikel kanan. Dari ventrikel kanan

darah dialirkan melalui arteri pulmonalis menuju paru-paru dari paru-paru ke vena pulmonalis dan ke ventrikel kiri. Pada waktu darah melalui paru-paru terjadi proses oksigenasi, yaitu proses di mana  $O_2$  dari paru-paru berdifusi ke dalam darah sehingga darah yang meninggalkan paru-paru kaya oksigen. Darah yang banyak mengandung oksigen dan sedikit karbondioksida adalah darah arteri, sebaliknya darah yang miskin  $O_2$  dan kaya  $CO_2$  darah vena. Dari ventrikel kiri darah mengalir ke atrium kiri yang selanjutnya dipompa keluar menuju aorta dan disebarkan ke kepala, hati, usus, dinding tubuh, dan ginjal. Perbedaannya dengan mamalia, pada burung terdapat sistem porta ginjal, sedangkan pada mamalia tidak mempunyai.

## 1. Fisiologi Pembuluh Darah

### 1.1 Sistem Pembuluh Darah

Kecepatan aliran darah suatu organisme bergantung pada berbagai factor, seperti tekanan arteri sistole, resistensi arterioli, keadaan aktivitas organisme, viskositas darah. Kecepatan mengalirnya darah berkaitan dengan jumlah luas penampang sayatan melintang pembuluh darah dari setiap sistem sirkulasi. Setiap cairan pembuluh yang didorong oleh jantung harus terbagi antara cabang arteri secara berurutan, kemudian arterioli dan kapiler-kapiler. Hal ini melibatkan suatu perkembangan yang makin lama makin lambat melewati suatu volume pembuluh yang besar.

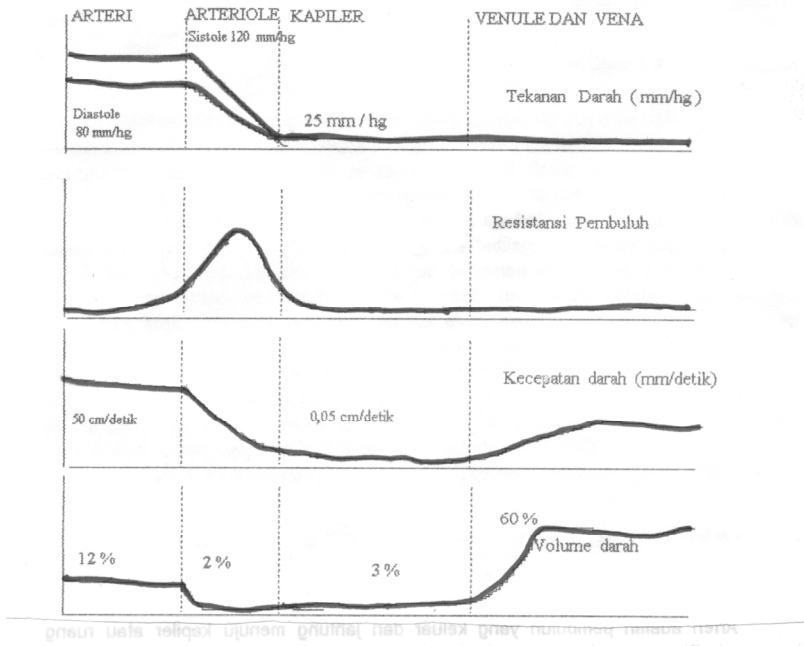
Pada manusia, kecepatan darah berkisar 40 cm/detik ke luar dari ventrikel kanan, dalam pembuluh aorta di mana permukaannya  $5 \text{ cm}^2$ . Sebaliknya, pada kapiler permukaannya mencapai  $3.500 \text{ cm}^2$  dengan kecepatan 70 mikron meter per detik. Aspek lain yang penting dalam hemodinamika adalah berkaitan dengan sifat tidak dapat ditekan oleh tekanan dari suatu cairan. Jika suatu modifikasi volume pembuluh datang dari suatu tempat, darah akan dikirim kembali ke dalam sirkulasi yang ada. Suatu vasodilatasi perototan yang berhubungan dengan aktivitas latihan harus diganti oleh vasokonstriksi pada daerah lain, jika tidak tekanan arteri akan turun secara drastis.

## **2. Sistem Arteri dan Tekanan Arteri**

### **2.1 Nilai Tekanan Arteri**

Arteri adalah pembuluh yang keluar dari jantung menuju kapiler atau ruang hemocoel. Biasanya cairan yang ada di dalamnya kaya akan oksigen dan miskin akan karbon dioksida, tetapi kadar gas-gas pembuluh tergantung pada tempat pertukaran gas. Arteri pulmoner mamalia dewasa mengandung sedikit oksigen karena darah berada dalam perjalanan menuju membran pernapasan. Dinding arteri besar yang keluar dari jantung vertebrata mengandung banyak sekali jaringan ikat. Kekuatan tiap sistole ventrikel mendorong darah ke dalam arteri dan melebarkannya agar dapat menampung darah tersebut. Pada waktu diastole, kelenturan dinding bagian pertama arteri tersebut membantu mendorong darah ke bagian berikut dari arteri yang kemudian menjadi lebar. Elastisitas arteri yang besar itu mengubah arus darah menjadi mantap dan tenang. Jika tidak demikian akan merupakan aliran terputus-putus. Peregangan dan kontraksi arteri yang terjadi bergantian itu dengan sangat cepat ke perifer (7,5 m per detik) dan dapat dirasakan sebagai denyut nadi, tetapi darah itu sendiri tidak mengalir secepat itu.

## Dasar Fisiologi Ternak



Gambar 3.8 Distribusi tekanan darah, kecepatan aliran darah, resistensi pembuluh dan volume darah pada bagian-bagian dari sistem kardiovaskular mamalia

Pada jaringan, arteri akan bercabang-cabang. Setiap cabang, rongga salurannya menjadi semakin sempit, tetapi jumlah luas penampang melintang cabang ini menjadi lebih besar. Oleh karena itu, kecepatan arus darah berkurang karena darah tersebut bergerak dalam suatu daerah yang semakin luas. Tekanan rata-rata darah juga menurun terus karena pergesekan darah yang bergerak di dalam pembuluh (Gambar 3.8).

Tekanan darah terus menurun pada waktu mengalir melalui kapiler dan vena. Namun ketika darah pindah dari kapiler ke vena dan ketika vena-vena kecil menjadi vena yang besar, laju arus meningkat. Pada manusia usia 3 tahun dalam keadaan istirahat, tekanan sistol berkisar 16

kPa (120 mm Hg) dan tekanan diastol 10 kPa (75 mm Hg). Setiap kontraksi jantung, tekanan yang ditingkatkan oleh jantung ditransfer dengan nilai yang tidak berubah dalam semua arteri utama jika tenaga gravitasi tidak terlibat (manusia berbaring). Sebaliknya, lemahnya tekanan sangat penting pada tingkat arteri kecil dan arteriol, sehingga tekanan mencapai nilai 4 kPa pada manusia. Tekanan turun lagi pada tingkat kapiler untuk menjamin dalam sistem kembali ke vena.

## 2.2 Tekanan Arteri dan Postur

Tekanan yang ada pada suatu arteri merupakan hasil kegiatan jantung dan kegiatan gaya berat dalam pembuluh-pembuluh utama. Pada manusia yang sedang berdiri, tekanan arteri tidak sama tingkatannya pada kaki (20 kPa) atau pada kepala (7 kPa) setelah berat dari saluran darah yang berasal dari jantung diperhatikan. Berat darah bertambah terhadap tekanan sistol jika organ terletak di bawah jantung, sebaliknya darah menurunkan tekanan jika organ terletak di atas jantung. Fenomena ini dapat terlihat lebih jelas pada hewan lain. Jerapah mempunyai tekanan sistol 35 kPa yang menjamin peredarannya cocok untuk kepala dengan tinggi 2 meter lebih. Perubahan postur (ternak menempatkan badannya di atas kaki) secara umum tidak menghasilkan gangguan yang berarti dalam tekanannya.

## 3. Kapiler, Vena, dan Pembuluh Limfatik

Kapiler adalah pembuluh-pembuluh kecil, berjumlah besar, dan berdinding sangat tipis (Gambar 3.10). Diameternya kira-kira sama dengan diameter sel darah dan seringkali terletak dekat satu sama lain. Vena adalah pembuluh yang menyalurkan darah kembali ke jantung. Pada vertebrata, vena pada dasarnya sama dengan arteri, meskipun vena lebih besar, mempunyai dinding yang lebih tipis dan lebih lembek. Vena dapat memuat darah lebih banyak yang merupakan tempat persediaan darah penting karena lebih besar dari

arteri. Pembuluh limfa mempunyai dinding yang lebih tipis. Katup yang terdapat baik dalam vena maupun pembuluh limfa hanya memungkinkan arus ke arah jantung.

### 3.1 Irigasi Kapiler

Semua sel yang aktif tidak jauh jaraknya dengan pembuluh kapiler atau suatu sel aktif diberi makan oleh suatu sel yang berhubungan langsung dengan kapiler (sebagai contoh ovosit dan spermatozoa pada mamalia). Pada kasus sebaliknya, sel tersebut akan mati apabila sel-sel tidak mempunyai sistem distribusi cepat dalam pemberian zat makanan dan tidak dapat menghilangkan hasil metabolismenya. Sebagai contoh, sel epidermis pada mamalia ketika tumbuh menuju peri-peri dan diganti oleh perkembangan sel-sel yang lebih muda. Kepadatan kapiler sangat penting pada jaringan apa pun. Sistem arteri tersebar kurang lebih  $5 \times 10^9$  pada manusia. Kapiler yang sedang berukuran sekitar 1 mm panjang untuk diameter 10–25  $\mu\text{m}$ . Hasil perhitungan menunjukkan bahwa volume kumulatif kapiler lebih besar dari volume total darah, semua kapiler tetap tidak berfungsi secara permanen. Hanya terdapat 5% volume kapiler yang berfungsi pada daerah yang berbeda berdasarkan kebutuhan sementara. Suatu otot yang sedang aktif mempunyai sekitar 30 kali kapiler terbuka daripada otot yang sedang istirahat.

### 3.2 Pertukaran Kapiler

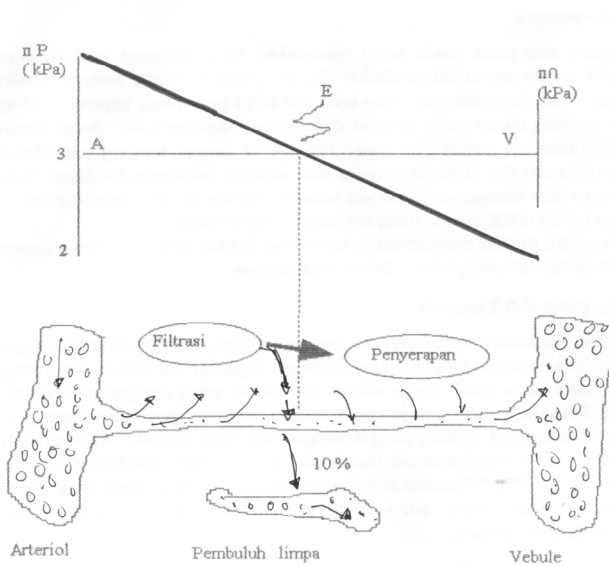
Dinding kapiler adalah permeabel terhadap zat-zat larut dengan berat molekul rendah (meskipun demikian beberapa molekul protein melewati endotelium) dan membiarkan dilewati oleh leukosit pada tingkat pertemuan antara sel-sel endotelium. Filtrat terbentuk menghasilkan cairan interstisial (Gambar 3.9).

Pergerakan cairan yang mengambil tempat pada endotelium kapiler diatur oleh evolusi keseimbangan tekanan dengan adanya tekanan hidrostatik menurun antara ujung arteriol dan ujung venul kapiler.

Tekanan onkotik (pengaruh osmotik berkaitan dengan adanya protein) dan tekanan plasma cenderung meningkat pada waktu transit dalam kapiler (Gambar 3.9). Hasil bersih (keluar-masuk) dan pertukaran cairan yang disaring ini lebih sering kelebihan cairan yang menyebar dalam ruang interstisial. Cairan limfa terbentuk oleh fraksi cairan yang dialiri oleh pembuluh-pembuluh limfatik dan dibawa menuju darah sistem vena pada tekanan rendah.

Pada laki-laki dewasa diduga 20 liter volume plasma disaring, 18 liter direabsorpsi, dan 2 liter tinggal pada sirkulasi limfatik. Debit harian ini hanya menjamin persentase sangat rendah pada pertukaran limbah metabolisme, zat-zat makanan, dan ion-ion yang mengambil tempat di jaringan-jaringan antara darah dan cairan interstisial.

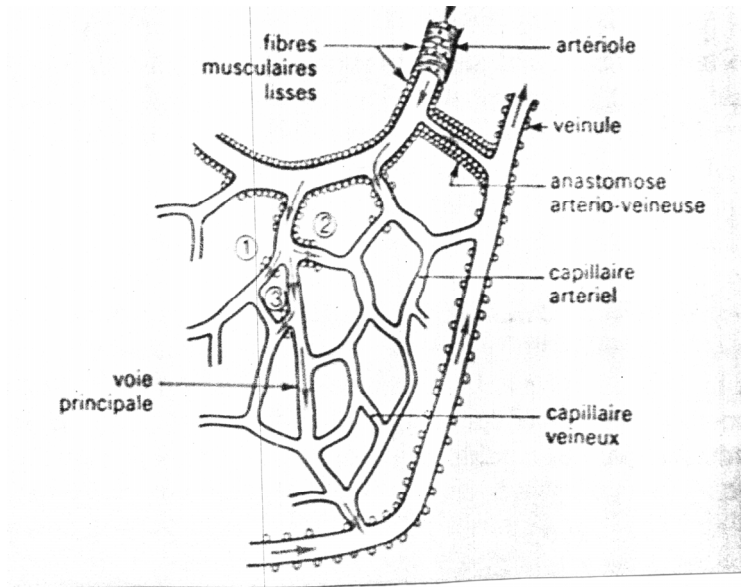
Ketika konsentrasi protein plasma menurun, tekanan onkotik hanya cukup untuk dapat mereabsorpsi filtrat kapiler dan pengumpulan terlalu cepat cairan ekstrasvaskuler adalah penyebab odema (busung), misalnya malnutrisi dan kerusakan hati.



Gambar 3.9 Pertukaran cairan tubuh pada tingkat kapiler

### 3.3 Sistem Sirkulasi Darah pada Vena

Sistem vena dapat mengembalikan darah menuju jantung dan memperlihatkan tekanan yang rendah, dari 1,2 kPa untuk venul sampai 0,2 atau 0,3 kPa pada vena manusia. Pembuluh vena berpartisipasi secara tidak langsung kembalinya darah berkat adanya tekanan yang dilakukan oleh gerakan perototan tertentu (misalnya gerakan anggota tubuh, gerakan kontraksi diafragma), selanjutnya darah diarahkan menuju jantung dengan adanya katup-katup. Vena mempunyai sistem simpatik yang banyak, dapat menyebabkan vasokonstriksi masif dan kembalinya venul normal.



Gambar 3.10 Jaringan pembuluh Kapiler ; Sumber: Wiliam dan Wilkin (1972)

### 3.4 Sistem Limfatik

Pembuluh-pembuluh limfatik adalah kapiler-kapiler yang ujungnya buntu, memusat untuk membentuk pembuluh yang lebih besar diameternya, sehingga perototan licin menjamin kontraksi ritmik. Katup-katupnya dapat menghasilkan aliran satu arah pada limfa. Kemudian pembuluh-pembuluh darah menggabungkan kembali pada suatu tempat dengan tekanan rendah (vena jugularis pada manusia). Sistem ini dapat mengembalikannya menuju darah dari cairan yang disaring dan protein cairan interstitial, transpor kilomikron dan mengalir ganglion limfatik di mana kaya akan limfosit.

### 4. Prinsip-prinsip Sirkulasi

Tekanan darah turun sepanjang berbagai bagian sistem sirkulasi. Pada ternak, perbedaan tekanan ditemukan: aorta 180–100 mmHg, Arteriol 80–40 mmHg, kapiler 30–10 mmHg, vena 10–1 mmHg, dan

dalam vena pusat, tekanan negatif ringan mempunyai pengaruh tekanan negatif di dalam rongga dada. Tekanan-tekanan ini lebih rendah pada sirkulasi pulmonari. Hubungan antara aliran tekanan dan resistensi dalam pembuluh darah dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\text{Aliran} = \text{tekanan perfusi/resistensi}$$

Darah selalu mengalir dari tekanan tinggi ke tekanan rendah. Pengaliran pada berbagai bagian vaskular adalah sama dengan tekanan efektif perfusi, di mana rata-rata tekanan intraluminal pada akhir arteri dikurangi rata-rata tekanan pada akhir vena.

Ventrikel kiri dipompa untuk mengeluarkan darah ke dalam aorta selama sistol darah tidak dapat meninggalkan aorta dan arteri utama secepatnya dipompa ke dalam. Oleh karena itu, aorta dan arteri mempunyai dinding elastis sehingga pembuluh menjadi memanjang dan meluas. Selama diastol bila jantung tidak memompa darah, elastisitas aorta dan arteri memelihara aliran darah dan tekanan darah. Tekanan tertinggi pada arteri terjadi selama sistol disebut tekanan darah sistol dan tekanan terendah terjadi selama diastol disebut tekanan diastol peningkatan tekanan darah yang mungkin disebabkan oleh penurunan elastisitas arteri atau peningkatan muatan simpatik yang menyebabkan kontraksi arteri dan peningkatan resistensi.

## **5. Pengaturan Sirkulasi Darah**

Pada beberapa mamalia, mekanisme pengaturan untuk sistem kardiovaskular telah di ketahui. Mekanisme ini meningkatkan suplai darah ke jaringan aktif dan meningkatkan atau menurunkan hilangnya panas dari tubuh. Pengaturan penyesuaian sirkulasi dipengaruhi oleh neural dan mekanisme kimia yang mengubah ukuran arterior, meningkatkan atau menurunkan penyimpanan darah pada cadangan vena, dan berbagai tingkat dan *output* jantung.

Perubahan kimia pada jaringan aktif melebarkan arterior yang bekerja langsung terhadap otot licinnya. Penurunan tekanan oksigen dan pH menyebabkan vasodilatasi, sehingga meningkatkan dalam tekanan CO<sub>2</sub>. Peningkatan temperatur yang disebabkan oleh panas metabolisme memengaruhi langsung vasodilatasi. Vasokonstriksi lokal dilihat pada pembuluh darah yang luka. Vasokonstriksi mungkin disebabkan oleh pelepasan lokal zat-zat dari keping-keping darah, di mana mereka menyumbat dinding pembuluh di daerah yang luka.

Noradrenalin dan adrenalin adalah zat vasomotor yang sering ditemukan dalam darah. Noradrenalin mempunyai aktivitas vasokonstriktor, sedangkan adrenalin mengembangkan pembuluh pada otot rangka dan jantung.

Meskipun arteriol banyak diinervasi secara padat, semua pembuluh darah kecuali kapiler mempunyai otot licin dan menerima serabut saraf motor dari sistem saraf simpatik, serabut pada arteriol mengatur aliran darah jaringan dan tekanan arteri dengan mengubah resistensi pada arteriol. Serabut-serabut pada pembuluh venul bervariasi dan volume darah disimpan dalam vena.

Konstriksi pembuluh vena dihasilkan oleh rangsangan yang sama mengaktifkan serabut vasokonstriktor pada arteriol. Penurunan kapasitas vena meningkatkan vena kembali ke jantung, sehingga memindahkan darah samping arteri dari sistem sirkulasi reseptor untuk mendeteksi tekanan darah arteri yang ditemukan pada dinding sinus karotid dan lengkungan aorta. Reseptor ini dikenal sebagai baroreseptor, dirangsang oleh tegangan peningkatan tegangan yang menyebabkan peningkatan muatan impuls pada saraf sensor menuju pusat kontrol dari sistem saraf pusat yang kemudian mengaktifkan berbagai mekanisme efektor. Impuls-impuls dari baroreseptor menghambat muatan tonik serabut vasokonstriktor, menghasilkan dari

arterior dan memengaruhi pusat kardio inhibitori yang menyebabkan turunnya denyut jantung.

Bila tekanan darah turun di bawah level tertentu, muatan-muatan dari baroreseptor juga turun. Hal ini merangsang saraf vasokonstriktor yang menyebabkan peningkatan tekanan darah arteri dan meningkatkan kembali vena.

## **6. Kontrol Kardiovaskular**

Aktivitas suatu organisme, perubahan postur, keragaman lingkungan termik, dan periode pencernaan adalah situasi yang diekspresikan oleh modifikasi dari sistem kardiovaskular (Gambar 3.11).

### **6.1 Pengaturan Debit Darah Kapiler**

Dinding kapiler adalah dinding tanpa unsur motor dan kapiler hanya buka atau tutup bila kapiler tersebut dimasuki atau tidak dilewati oleh darah. Pembuluh arteriol yang terletak di daerah hulu dan pembuluh venula kapiler pada daerah hilir mengatur lewatnya darah ke dalam jaringan lokal dengan membentuk besaran saluran (*sphincters*) yang membuka dan menutup secara periodik dan menyebabkan jaringan kapiler baru secara permanen. Sphincters prekapiler berada di bawah kontrol lokal, sirkulasi, dan sistem saraf.

### **6.2 Kontrol Lokal**

Kontrol lokal aliran darah kapiler berkaitan dengan aktivitas sementara dari jaringan dan keterpaduannya.

### **6.3 Produk Metabolisme**

Sel-sel sedang metabolisme sangat aktif bernapas menggunakan oksigen dan melepaskan  $\text{CO}_2$ , ion  $\text{H}^+$ , dan berbagai molekul atau ion (sebagai contoh  $\text{K}^+$ ). Peningkatan konsentrasi hasil metabolisme lokal, penurunan pH, dan penurunan konsentrasi oksigen juga merangsang vasodilatasi lokal arteriol, dilanjutkan relaksasi serabut-serabut halus yang terkandung pada dindingnya, dan kemudian suatu dilatasi kapiler

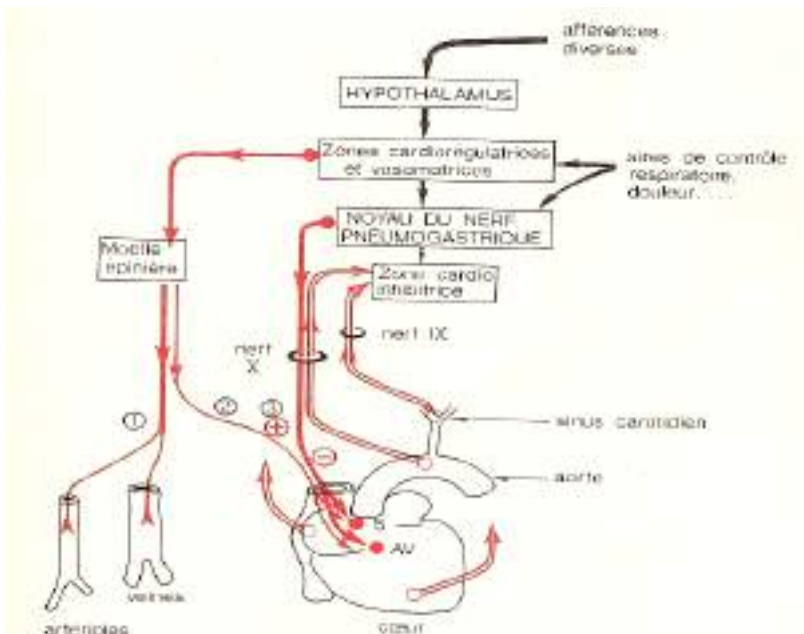
dengan peningkatan aliran darah lokal. Peningkatan temperatur yang berhubungan dengan bertambahnya aktivitas adalah sama-sama faktor vasodilatasi arterioler. Kapiler-kapiler pulmoner di luar dari mekanisme ini.

**7. Faktor Lokal Lainnya**

Gangguan-gangguan lokal memodifikasi sirkulasi kapiler. Satu vasodilatasi kapiler ditimbulkan oleh pembebasan zat yang disebut histamin. Serotonin yang disekresikan oleh keping-keping darah pada saat luka mempunyai pengaruh vasokonstriktor yang lebih sering dan berpartisipasi pada hemostasis.

**8. Kontrol Saraf**

Kontrol saraf merupakan suatu modulasi dari debit kapiler global, disesuaikan dengan debit jantung yang menjamin tekanan arteri cukup untuk perfusio otak atau jantung (vaskularisasi serebral dan koroner).



Gambar 3.11. Skema unsur-unsur regulasi kardiovaskular

Arterioli diinervasi oleh sistem simpatik. Setiap eksitasi arterioli menyebabkan noradrenalin yang berpengaruh terhadap reseptor  $\alpha$  serabut-serabut otot licin serta menyebabkan kontraksi dan vasokonstriksi. Satu aktivitas tonik simpatik terdapat dalam sebagian besar daerah pembuluh darah yang mengikuti pelepasan neurotransmiter. Pada daerah tertentu, arterioli-arterioli diinervasi oleh saraf parasimpatik sehingga pelepasan asetilkolin diikuti vasodilatasi, seperti jantung dan paru-paru.

### **9. Zat-zat Vasomotris yang Bersirkulasi**

Kinin adalah peptida kecil yang dibentuk dalam plasma (bradikinin) atau jaringan (lisilbradikinin) melalui kerja suatu enzim. Kalikrein mengaktifkan plasma atau jaringan terhadap prekursor peptidik (kininogen) yang ada dalam plasma. Hal ini menyebabkan vasodilatasi melalui relaksasi serabut-serabut licin pembuluh darah, sebaliknya kinin menyebabkan kontraksi serabut licin alat pencernaan. Senyawa ini juga mempunyai pengaruh atraktif terhadap leukosit.

Noradrenalin berasal dari kelenjar adrenal atau berkaitan dengan pelepasan saraf simpatik dan mempunyai pengaruh vasokonstriksi, sebaliknya adrenalin (berasal dari medula adrenal) mempunyai pengaruh vasodilatasi terhadap pembuluh hati dan otot serta pengaruh vasokonstriksi pada daerah lain (Tabel 3.2).

Angiotensin II adalah oktapeptida yang bersirkulasi, merupakan vasokonstriktor sangat kuat (lima kali lebih aktif dari noradrenalin pada konsentrasi yang sama) sehingga waktu paruh dalam plasma sangat singkat.

Keluarga baru peptida dari jantung yang dikenal sebagai arterioli peptida natriuretik mempunyai kegiatan terhadap pengaturan tekanan arterioli yang sekarang banyak dilakukan penelitian.

Tabel 3.2 Reseptor adrenergik dari beberapa jaringan yang berkaitan dengan sistem kardiovaskular

Jaringan	Reseptor	Pengaruh
Jantung	$\beta$	Peningkatan ritme, kontraksi, dan konduksi arteriol
Kulit	$\alpha$	Konstriksi
Lendir	$\alpha$	Konstriksi
Otot-otot Rangka	$\alpha$	Konstriksi
Alat-alat pencernaan	$\alpha$	Konstriksi
	$\beta$	Dilatasi
Pembuluh Vena	$\alpha$	Konstriksi

Sumber: Cryer PE (1981)

## 10. Integrasi Saraf dalam Pengaturan Kardiovaskular

Kontrol intrinsik lainnya (berdasarkan keragaman kembalinya vena atau resitensi perik-perik) dan aktivitas jantung diatur melalui suatu pengaturan pusat tekanan arterier sistemik.

### 10.1 Reseptor-reseptor

Baroreseptor didistribusikan pada berbagai titik dari sistem sirkulasi. Terdapat ujung saraf halus yang masuk ke dalam membran pembuluh dan aktivitasnya bervariasi berdasarkan rentangan, mereka sangat peka terhadap variasi tekanan arteriol. Frekuensi pelepasan baroreseptor karotid sangat bergantung pada tekanan arteriol. Aksi potensial asal dari baroreseptor diarahkan melalui saraf depresor yang bergabung dengan saraf-saraf otak dari pasangan ke-9 dan ke-10 yang menuju ke daerah kardioinhibitor atau vasometris. Pusat-pusat juga diberitahukan keadaan tekanan arteriol pada berbagai titik strategis secara permanen.

Kemoreseptor terlibat dalam kontrol ventilasi dan berpartisipasi juga dalam penyesuaian kardiovaskular. Bila  $PO_2$  menurun dan bila  $PCO_2$

(konsentrasi ion  $H^+$ ) meningkat pada tingkat badan karotid dan aorta, pelepasan kemoreseptor akan meningkat dengan melibatkan neuron-neuron sentral vasomotor yang menyebabkan vasokonstriksi perik-perik yang dapat menyebabkan tekanan arteriol.

## 10.2 Integrasi Pusat

Daerah encephal yang terlibat kontrol kardiovaskular terletak di daerah *bulbare*. Pembatasan secara anatomi kurang baik karena neuron-neuron yang berpartisipasi terhadap integrasi kardiovamotris membentuk seluruhnya melewati neuro kardioinhibitor (pelepasannya menurunkan ritme jantung) dan neuron-neuron vasomotor (pelepasannya menyebabkan vasokonstriksi atau vasodilatasi).

Aferen datang di neuron-neuron pusat yang berasal dari zona-zona peka terhadap baroreptor atau kemoreseptor melalui jalur parasimpatik dan simpatik menuju ke jantung dan pembuluh-pembuluh darah (Gambar 3.4). Saraf-saraf simpatik meningkatkan ritme dan kekuatan kontraksi jantung, serta vasokonstriksi arteriol dan vena. Saraf-saraf parasimpatik mempunyai efek global yang berlawanan dengan saraf simpatik.

## RINGKASAN

1. Sistem transpor merupakan sarana distribusi dari zat-zat antara cairan interstitium yang mengelilingi sel dan tempat-tempat di mana zat-zat itu masuk dan keluar dari tubuh. Sistem ini juga membantu memelihara keseimbangan lingkungan internal yang konstan (homeostasis).
2. Kecepatan aliran darah pada suatu organisme dapat dipengaruhi oleh besarnya arteri sistol, resistensi arteriol, aktivitas suatu organisme, dan viskositas darah. Ekspansi dan kontraksi yang elastis membuat arteri memegang peranan penting dalam membawa

darah ke jaringan. Arteriol-arteriol mengatur jumlah darah yang masuk ke dalam jaringan tertentu dan bersama dengan pengaturan laju denyut jantung serta mengatur tekanan dan laju arus darah.

3. Pertukaran zat di dalam kapiler berlangsung secara difusi dengan melewati zat-zat berat molekul ringan melalui pori-pori antara sel-sel dinding kapiler.
4. Gerakan air diatur oleh interaksi dari tekanan hidrostatik dan tekanan osmosis darah.
5. Pengaturan sistem sirkulasi darah diatur melalui mekanisme neural dan kimia. Perubahan kimia dalam jaringan seperti penurunan  $PO_2$  dan derajat keasaman, peningkatan  $PCO_2$  dan peningkatan temperatur menyebabkan vasodilatasi, sedangkan zat yang dihasilkan keping-keping darah pada waktu luka menyebabkan vasokonstriksi pembuluh darah. Neurotransmitter (noradrenalin dan adrenalin) berperan juga dalam mengatur sirkulasi darah.
6. Pengaturan kardiovaskular merupakan proses yang kompleks, melibatkan pengaturan debit darah kapiler dan integrasi saraf. Perubahan-perubahan hasil metabolisme dan eksitasi dari saraf simpatik dan parasimpatik merupakan faktor pengendali lokal yang mengatur debit darah kapiler. Integrasi saraf melibatkan pengaruh reseptor-reseptor yang ada di jantung dan pusat-pusat pengaturan di hipotalamus dalam mengatur sistem kardiovaskular.

Latihan berikut ini sengaja disusun untuk memantapkan Anda terhadap materi yang dibicarakan. Kerjakan latihan berikut dengan sungguh-sungguh!

1. Sebutkan dan jelaskan berbagai tipe transpor internal!
2. Jelaskan perbedaan sistem sirkulasi terbuka dengan sirkulasi tertutup!
3. Jelaskan peredaran darah pada mamalia dibandingkan dengan unggas!

4. Apa fungsi dari pembuluh arteri, arteriol, kapiler, venula, dan vena?
5. Jelaskan hubungan antara kecepatan aliran darah dengan tekanan darah pada berbagai sistem pembuluh darah!
6. Jelaskan bagaimana terjadinya proses pertukaran zat-zat nutrisi maupun gas antara jaringan dan pembuluh darah kapiler!
7. Jelaskan bagaimana kontrol saraf dan hormonal terhadap sistem sirkulasi darah!

## **BAB IV**

# **SISTEM KELENJAR ENDOKRIN DAN HORMON**

Untuk menjamin seluruh fungsi organisme multiseluler secara optimal, sangat penting untuk memelihara suatu sistem kontrol terhadap seluruh kondisi internal tubuh. Sebagai contoh, suatu perubahan kecil dalam keasaman darah akan membuat banyak enzim tidak aktif. Jumlah energi yang dibutuhkan untuk memelihara pH darah konstan lebih kecil dibandingkan dengan jumlah energi yang akan dibuang oleh jalannya sistem enzim tidak efisien pada pH tidak sesuai. Sistem kontrol juga diperlukan untuk menjaga stabilitas internal tubuh (homeostasis) agar tetap konstan.

Meskipun demikian, terdapat suatu kendala yang membatasi penciptaan suatu kondisi stabil dan dinamis, yaitu adanya keragaman sel-sel yang berbeda dalam berbagai organ tubuh. Keragaman ini menimbulkan perbedaan karakteristik sel-sel dalam hal pH yang optimal, temperatur, komposisi ion, dan kebutuhan metabolisemenya bervariasi dari satu gugus sel ke sel lainnya. Akibatnya terdapat suatu kebutuhan untuk mengoordinasikan dan memadukan semua aktivitas dalam bagian-bagian tubuh. Untuk itu, diperlukan komunikasi di dalam dan antara bagian-bagian tubuh melalui sistem endokrin dan sistem saraf. Sistem saraf mengatur aktivitas bagian-bagian tubuh yang mengalami perubahan-perubahan relatif cepat, seperti pergerakan otot rangka, pergerakan otot polos pada *visceral*, dan sekresi beberapa kelenjar. Sebaliknya, sistem hormonal mengatur aktivitas seperti metabolisme, reproduksi, pertumbuhan, perkembangan, reaksi-reaksi kimia dalam sel, transpor zat-zat melalui membran sel dan sekresi.

Beberapa hormon dampaknya dapat terjadi beberapa detik, sebagian lagi membutuhkan beberapa hari untuk memulai aktivitasnya,

bahkan ada yang memerlukan waktu beberapa minggu, bulan, dan tahun.

Terdapat hubungan yang nyata antara sistem hormon dan sistem saraf. Sebagai contoh, pada dua kelenjar yaitu medula adrenal dan kelenjar hipofisa dalam menyekresikan hormonnya hampir sebagian besar merupakan respons terhadap rangsangan saraf yang datang pada kedua kelenjar tersebut. Sebaliknya, sekresi beberapa hormon hipofisa dikontrol oleh hasil sekresi yang sebagian besar kelenjar endokrin lain.

Pada bab ini Anda akan dibawa untuk membahas tentang sistem kelenjar endokrin dan hormon, perbedaan kerja hormon protein dan steroid, integrasi kontrol saraf dan endokrin. Setelah mempelajari bab ini, Anda diharapkan akan mampu menjelaskan integrasi sistem endokrin dan hormon dalam mengoordinasikan dan memadukan fungsi-fungsi fisiologis dalam tubuh. Secara khusus Anda akan memiliki kemampuan-kemampuan berikut.

1. Menjelaskan proses sekresi hormon dan sekresi hormon diangkut dalam darah.
2. Menjelaskan proses sekresi hormon dengan reseptor dalam sel sasaran untuk mengubah metabolisme sel-sel.
3. Menjelaskan berbagai jenis hormon yang disekresikan oleh berbagai kelenjar endokrin dan fungsi dari hormon-hormon tersebut.
4. Menjelaskan pengaturan fungsi fisiologis oleh berbagai jenis hormon dan interaksi antar kerja hormon.

## **A. Sistem Kelenjar Endokrin**

### **1.1 Kelenjar Endokrin**

Kelenjar endokrin adalah kelenjar yang mengeluarkan hormon ke dalam aliran darah dan bukan ke dalam saluran yang menuju ke luar tubuh atau ke dalam salah satu organ internal seperti kelenjar eksokrin. Sebagai contoh, kelenjar paratiroid, tiroid, *pituitary*, dan adrenal yang

hanya berfungsi dalam sekresi hormon. Oleh karena itu kelenjar endokrin disebut juga “kelenjar buntu”. Sementara kelenjar eksokrin mensekresikan zatnya melalui pembuluh seperti kelenjar ludah, kelenjar keringat, kelenjar air mata, dan kelenjar pencernaan makanan.

Kelenjar endokrin yang terdapat di seluruh tubuh merupakan suatu sistem dan sistem ini disebut sistem endokrin. Pada sistem endokrin, kita mengenal tiga bagian yaitu sel sekresi, mekanisme transpor, dan sel sasaran yang masing-masing mempunyai ciri-ciri khas (Gambar 4.1). Sel sekresi yaitu sel-sel khusus yang menyintesis dan menyekresikan hormon. Mekanisme transpor hormon dilakukan dengan mengangkut hormon sebagai larutan atau terikat pada suatu komponen protein serum. Dalam sel sasaran, hormon dikirim dan diikat oleh reseptor khusus yang membentuk kombinasi dan khas dengan satu jenis hormon.

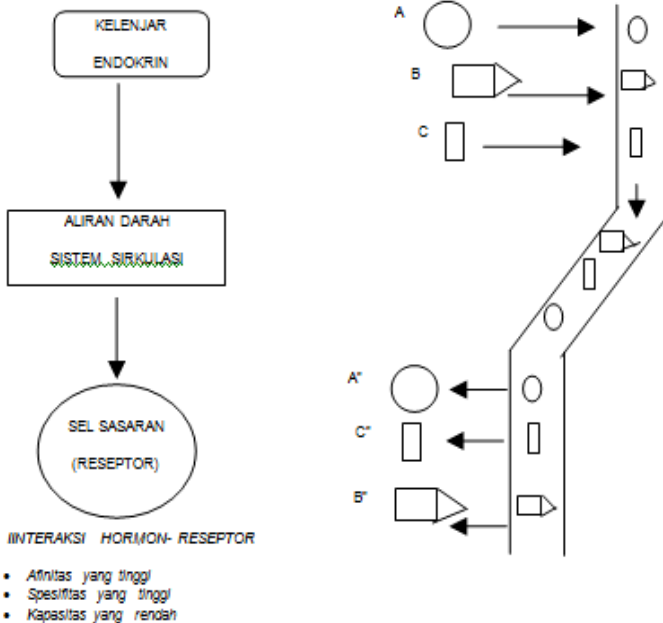
## **1.2 Hormon**

Hormon adalah substansi kimia yang dihasilkan oleh kelenjar endokrin. Istilah hormon diusulkan oleh Bayliss dan Starling untuk memperkenalkan sekretin yang dapat mereka isolasi. Sekretin adalah satu polipeptida disekresikan oleh mukus duodenum yang dapat merangsang cairan lambung melalui pembuluh darah. Definisi hormon harus memenuhi kriteria berikut.

- Disekresikan oleh sel-sel hidup kelenjar endokrin dan dihasilkan dalam jumlah kecil.
- Sekresi bersifat merokrin, yaitu eksositosis tanpa menyebabkan kerusakan seluruh sel.
- Dihasilkan dari satu kelenjar dan disalurkan melalui pembuluh darah.
- Mengadakan interaksi dengan reseptor khusus pada tempat spesifik (dinamakan "target organ") (Gambar 4.1).
- Hormon mempunyai pengaruh mengaktifkan enzim khusus.

- Harus mengatur (tidak memulai) aktivitas organ sasaran dan menghasilkan respons yang tepat.
- Tidak digunakan sebagai sumber energi.

Berdasarkan kriteria tersebut, hormon dapat didefinisikan sebagai *messenger* (pembawa pesan) kimiawi khusus yang dihasilkan oleh suatu bagian terbatas dari suatu organisme, tempat zat dalam konsentrasi sangat rendah efektif dalam mengatur, dan mengkoordinasi aktivitas selnya. Kriteria tersebut dipakai untuk menjamin dalam membedakan hormon dari enzim dan vitamin atau hasil-hasil metabolisme.



Gambar 4.1 Prinsip mekanisme kerja hormon

Terdapat sejumlah bahan lain yang dianggap oleh para ilmuwan sebagai hormon. Bahan ini termasuk hormon aktif yang sangat penting seperti prostaglandin, kinin, hormon-hormon ulat, dan juga

neurohormon. Phero hormon, hormon sosial diluar tubuh yang dapat dikategorikan sebagai hormon. Susunan kimia hormon sangat bervariasi, bergantung dari macam hormonnya (Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Hormon-homon utama vertebrata, tempat sekresinya, dan fungsi utamanya

Susunan Kimia	Nama Kelenjar	Nama Hormon	Fungsi Utama
Derivat dari asam amino (Amin)	Sel-sel Tiroid	Tiroksin(T4) Tri-iodotironin (T3)	Merangsang metabolisme oksidatif Merangsang metamorfosa pada amfibi
	Medula adrenal Hipofisa median	Adrenalin Noradrenalin Melatonin	Stimulasi saraf simpatik (Vasomotris, hiperglisemia) Agregasi granul-granul pigmen
Poliipeptida	Hipotalamus	1. CRH 2. GnRH (FSH/LH-RH) 3. TRH 4. GH-RH 5. Somatostain (SRIF) 6. PIH /PIF	1. Menstimulasi pelepasan hormon hipofisa ACTH 2. Menstimulasi pelepasan hormon hipofisa FSH dan LH 3. Menstimulasi pelepasan hormon hipofisa TRH 4. Menstimulasi pelepasan hormon hipofisa GH 5. Memblokir pelepasan hormon hipofisa (GH dan Prolaktin)
Poliipeptida	Hipofisa Anterior	1. ACTH ( <i>Adeno Cortico Tropic Hormone</i> ) 2. FSH ( <i>Follicle Stimulating Hormone</i> ) 3. LH ( <i>Luteinizing Hormone</i> ) 4. Somatotropin (Growth Hormone) 5. TSH 6. Prolaktin	1. Menstimulasi medula korteks 2. Merangsang perkembangan folikel di ovarium dan tubuli seminifer di testis 3. Merangsang pematangan folikel dan terjadinya ovulasi Merangsang sekresi testosteron oleh testis 4. Merangsang pertumbuhan global melalui faktor pertumbuhan, misalnya somatomedin 5. Merangsang sekresi kelenjar tiroid 6. Merangsang produksi susu
Poliipeptida	Hipofisa posterior	1. Oksitosin 2. Vasopresin (ADH)	1. Kontraksi otot licin (uterus, kanal kel.susu) 2. Reabsorpsi air oleh ginjal
Poliipeptida	Plasenta	3. Gonadotropin (FSH dan LH)	3. idem dengan hormon gonadotropin hipofisa anterior
Poliipeptida	Saluran pencernaan	1. Sekretin 2. Kholesistokinin-pankrezozimin(CCK-PZ) 3. Gastrin 4. Vasoactive intestinal peptide	1. Merangsang sekresi cairan pancreas 2. Merangsang sekresi enzim prankreas 3. Merangsang sekresi cairan pankreas 4. Vasodilatato lokal (pembuluh portahepatik
Poliipeptida	Kelenjar Pankreas	1. Insulin 2. Glukagon 3. Somatostain	1. Hipoglisemia dengan mengubah glukosa menjadi cadangan energi 2. Hiperglisemia, memobilisasi glikogen hati 3. Menghambat sekresi insulin dan glukagon

Tabel 4.1 Hormon-homon utama vertebrata, tempat sekresinya, dan fungsi utamanya (lanjutan)

Poliipeptida	Kelenjar Pankreas	1. Insulin 2. Glukagon 3. Somatostatin	1. Hipoglisemia dengan mengubah glukosa menjadi cadangan energi 2. Hiperglisemia, memobilisasi glikogen hati 3. Menghambat sekresi insulin dan glukagon
Poliipeptida	Paratiroid	Parahormon (PTH)	Hiperkalsemia: memobilisasi kalsium
	Sel-sel C Tiroid	Kalsitonin	Hipokalsemia
	Ginjal	Eritropoietin	Merangsang pembentukan eritrosit
	Hati	Angiotensin II Somatomedin	Vasokonstriksi, merangsang sekresi aldosteron Merangsang pertumbuhan
	Testis	Inhibin	Kontrol umpan balik negatif terhadap FSH
Steroid	Hati + Ginjal	Derivat vit. D (25-idroksikolekalsiferol) 24–25 dan 1–25 dihidroksi kholekalsiferol	Merangsang penyediaan kalsium dalam tubuh organisme
Steroid	Korteks adrenal	Kortisol Kortikosteron Aldosteron + Androgen	Pengaturan metabolisme glukosa Merangsang reabsorpsi natrium oleh ginjal
Steroid	Testis	Testosteron Androstenedion	Perkembangan alat kelamin dan karakter kelamin sekunder pada jantan
Steroid	Ovarium Plasenta	Oestradiol 17 B Estron Estriol Progesteron	Perkembangan dan pemeliharaan karakter kelamin sekunder pada betina Mempersiapkan untuk kebuntingan
Asam lemak	Uterus	Prostaglandin	Melisiskan korpus luteum

Keterangan: *Physiologie Animale: Les cellules dan l'organisme*. Masson Paris. CRH = corticotropin releasing hormone; SRIF = somatotropin releasing inhibitor factor; PIF = prolactin inhibiting factor; STH = somatotrophic hormone; GnRH = Gonadotropinreleasing hormone ; Sumber: Rieutort M (1982)

## 2.1 Metode Mempelajari Hormon

- a. Pengambilan dan reimplantasi kelenjar endokrin dilakukan dengan menghilangkan atau merusak kelenjar endokrin melalui pembedahan dan pengaruhnya terhadap ternak diobservasi. Semua kelenjar endokrin mempunyai suplai darah yang baik, sehingga reimplantasi kelenjar pada bagian tubuh yang sistem pembuluh darahnya baik dapat mengembalikan fungsi kelenjar tersebut.

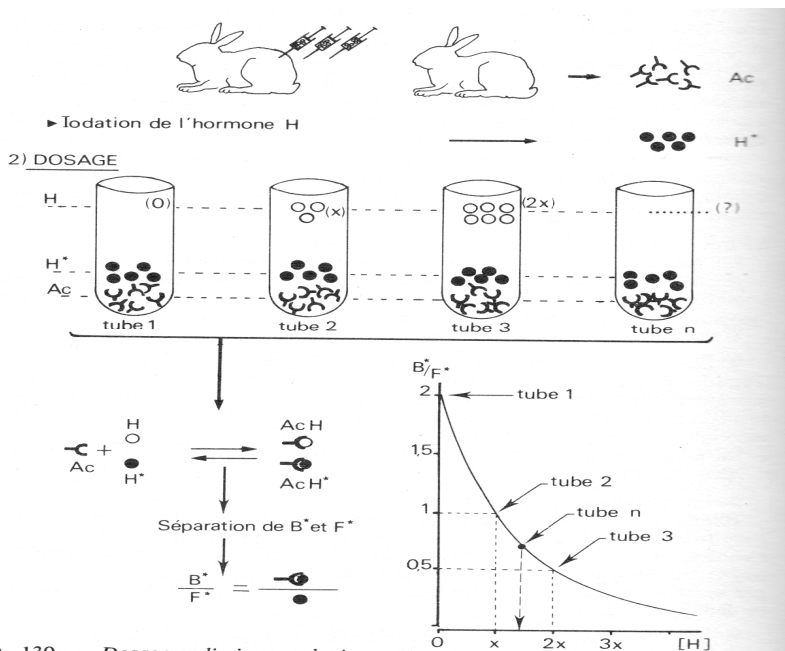
- b. Penyuntikan ekstrasi jaringan kelenjar endokrin kepada individu yang kekurangan.
- c. hormon tertentu dapat mengetahui fungsi kelenjar tersebut.
- d. Isolasi suatu kelenjar endokrin dikulturkan secara *in vitro* dan hormone yang disekresikan dianalisis.
- e. Menentukan reseptor yang spesifik pada organ atau sel sasaran dengan teknik autoradiografi atau *histochemistry*.
- f. Penghambatan fungsi kelenjar endokrin dengan zat-zat tertentu.
- g. Analisis hormon melalui metode RIA (*Radio Immuno Assay*). RIA merupakan suatu metode pengukuran hormon melalui serum darah menggunakan prinsip kompetisi antara hormon yang diberi radio aktif dan hormon yang akan dianalisis dengan antibodi.

Teknik RIA digunakan untuk melihat evolusi perkembangan hormon dari ternak hidup, baik pada berbagai kondisi fisiologis atau sedang mendapat suatu perlakuan. Tahapan teknik RIA: langkah pertama adalah membuat larutan standar dengan jalan menyiapkan sejumlah hormon yang konsentrasinya telah diketahui dan campuran hormon yang di label radio aktif ( $H^*$ ) dan antibodi spesifik ditambahkan pada berbagai tabung. Penambahan sejumlah hormon ( $H$ ) standar yang telah diketahui konsentrasinya meningkat secara gradual, ditambahkan pada berbagai tabung (tabung 1, 2, 3, .....n) dan setelah terjadi reaksi baru diukur kadar hormonnya dengan "Gamma Counter". Sampel biologis darah yang akan diukur hormonnya ditambahkan pada tabung lain yang berisi campuran antibodi ( $Ab$ ) dan antigen hormon ( $H^*$ ). Setelah inkubasi dengan lama bervariasi sesuai dengan jenis hormonnya, fraksi  $H$ , berikatan dengan antibodi ( $B$  untuk ikatan) atau yang bebas ( $F$ ) dipisahkan untuk setiap tabung, selanjutnya dengan data ini dapat membuat kurva standar. Kurva standar dapat menentukan

berdasarkan nilai perbandingan (B/F), konsentrasi hormon (H) pada sampel biologis darah (Gambar 4.2).

## 2.2 Pengaturan Sekresi Hormon

Terdapat dua faktor yang memengaruhi sekresi hormon, yaitu faktor saraf dan faktor kimia. Beberapa kelenjar endokrin mendapat suplai saraf dari sistem saraf autonom, sehingga aktivitas kelenjar endokrin tersebut dipengaruhi oleh impuls yang datang pada kelenjar itu. Sebagai contoh, kelenjar adrenal bagian medula mendapat persarafan dari saraf simpatik. Sekresi epinefrin akan bertambah atau berkurang, bergantung kepada aktivitas saraf simpatetik.



Gambar 4.2 Prinsip kerja *radio immune assay*

Subtansi kimia (baik berupa hormon yang diskresikan oleh kelenjar lain maupun nonhormonal) yang terdapat di dalam darah merupakan faktor yang penting bagi pengaturan sekresi hormon. Sebagai contoh,

kadar glukosa dalam darah akan memengaruhi sekresi hormon insulin dari kelenjar pankreas.

Kadar glukosa darah meningkat akan merangsang sekresi insulin, sebaliknya hipoglisemia akan merangsang sekresi hormon glukagon. Adanya substansi asam atau lemak di duodenum akan memengaruhi sekresi sekretin.

Menurut Wulangi (1990), jumlah hormon yang disekresikan oleh kelenjar endokrin ditentukan oleh kebutuhan tubuh akan hormon tersebut dalam waktu tertentu. Pola sekresi hormon di dalam tubuh diatur sedemikian rupa, sehingga tidak mengakibatkan adanya sekresi hormon yang berlebihan atau berkurang.

Terdapat suatu mekanisme pengendalian sekresi hormon yang dikenal sebagai "*feedback control* (kontrol umpan balik)" yang terdiri atas kontrol umpan balik negatif dan kontrol umpan balik positif. Informasi mengenai kadar hormon dan pengaruhnya diberitahukan kembali kepada kelenjar hormon yang bersangkutan, sehingga kelenjar hormon akan mengadakan penyesuaian terhadap keadaan baru tersebut. Umpan balik negatif eksis untuk mengontrol sekresi dan pelepasan banyak hormon dan bekerja pada berbagai level dalam rantai komando/perintah.

Pada suatu sistem kontrol umpan balik, sekresi hormon tidak melibatkan langsung sistem saraf. Sebagai contoh, kadar kalsium dalam darah diatur oleh kelenjar paratiroid. Hipokalsemia akan merangsang kelenjar paratiroid mensekresikan banyak hormon parahormon. Parahormon kemudian memengaruhi bermacam-macam bagian tubuh sehingga kalsium menjadi normal kembali, sebaliknya bila hiperkalsemia akan memengaruhi kelenjar paratiroid untuk menghentikan produksi parahormon. Sekresi hormon yang melibatkan pengaruh langsung sistem saraf, misalnya perangsangan saraf simpatik

menuju ke adrenal bagian medula yang menyebabkan disekresikannya hormon epinefrin dan norepinefrin.

Gambaran lain yang penting dan berhubungan dengan kerja hormon adalah efek sinergis (*synergism*), memperbesar aktivitas hormon lain (enhancement), dan fasilitator. **Sinergis** didefinisikan sebagai efek kombinasi dua hormon yang lebih besar dibandingkan dengan pengaruh rata-rata (secara aritmetika) dua hormon bila bekerja sendiri-sendiri. Hormon pertumbuhan sering bekerja sinergis dengan hormon lain. **Enhancement** dapat digambarkan sebagai kerja hormon yang mempunyai dampak ringan bila bekerja sendiri, tetapi kerja hormon tersebut dapat memperbesar dampak kerja hormon lain. Istilah fasilitator menggambarkan satu hormon tidak mempunyai dampak kalau kerja sendiri, tetapi mampu membuat hormon lain bekerja secara normal.

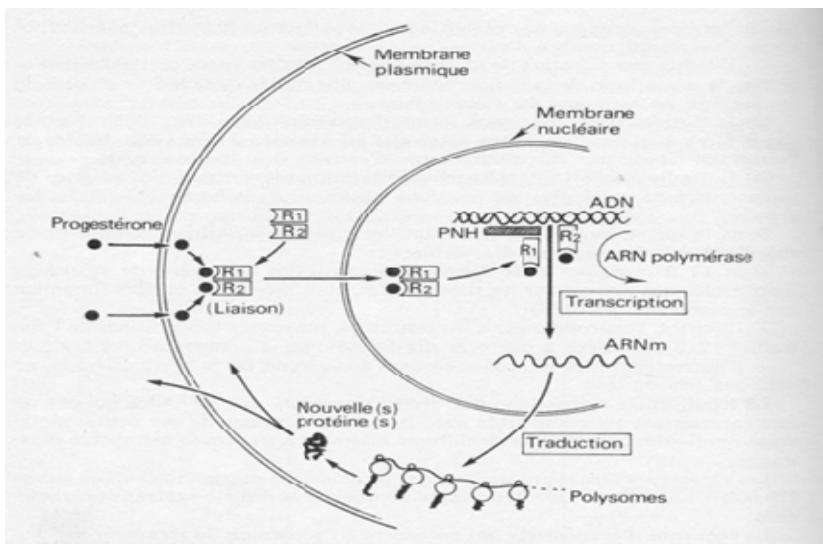
### 2.3 Cara Kerja Hormon

Hormon dapat dibagi menjadi dua kelompok utama berdasarkan struktur kimianya, yaitu kelompok steroid dan kelompok protein (amina dan peptida). Contoh kelompok hormon steroid adalah progesteron, cortisol, hydrocortison, estradiol, estron, dan testosteron. Hormon-hormon ini mempunyai berbagai pengaruh, tetapi secara umum aktivitasnya adalah lama, misalnya respons dalam waktu lama terhadap cekaman atau perkembangan reproduksi. Tiroksin (T4) dan tri-iodotironin (T3) meskipun secara kimia tidak berhubungan dengan steroid mempunyai aktivitas mekanisme sel yang sama dengan hormon steroid, sehingga dapat dikelompokkan pada kelompok steroid.

Hormon steroid dan T3 dan T4 merupakan molekul-molekul kecil dan dapat secara bebas masuk ke dalam sel, keduanya mengubah fungsi sel dengan cara mengaktifkan gen. Hormon steroid

merupakan hormon larut lemak, sehingga dengan mudah dapat menembus membran sel menuju sel target. Mekanisme hormon steroid dapat dijelaskan sebagai berikut (Gambar 4.3).

- Hormon masuk ke dalam sel dan berikatan dengan protein pembawa
- Protein membawa hormon ke dalam inti sel
- Reseptor dilepaskan untuk digunakan kembali
- Hormon berinteraksi secara bolak-balik dengan ADN pada kromosom
- Interaksi hormon mengaktifkan gen dan memproduksi messenger ARN (mARN)
- mARN keluar dari kromosom dan memulai pembentukan protein (biasanya enzim) pada ribosom. Enzim yang baru dibentuk ini melakukan perintah aktivitas hormon.

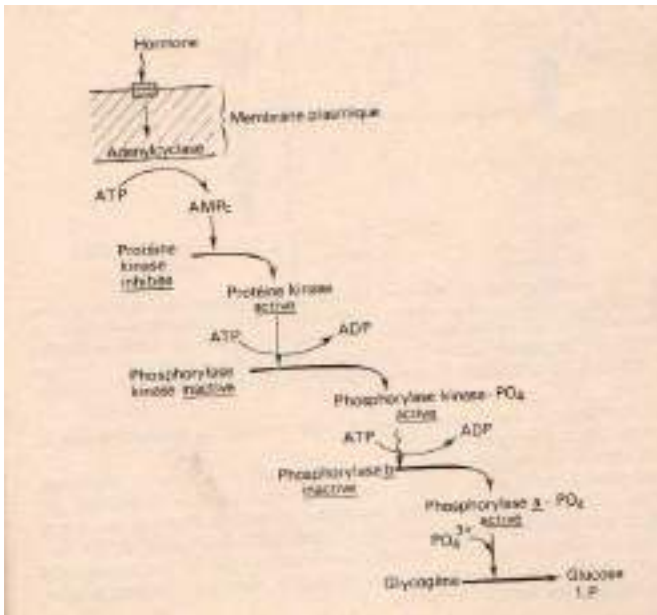


Gambar 4.3 Skema berdasarkan kerja progesteron terhadap sel-sel oviduk pada ayam petelur ; Sumber: Rieutort M (1986)

Tidak seperti halnya hormon protein yang mengaktifkan enzim, hormon steroid memulai memproduksi enzim baru yang tersedia untuk penggunaan jangka panjang. Tiroksin juga masuk ke dalam sel target dan mengadakan interaksi dengan gen untuk mengubah fungsi sel. Namun tiroksin menggunakan tempat ikatan di dalam nukleus untuk translokasi ke nukleus.

Beberapa contoh kelompok hormon protein yang mengandung peptida dan amina adalah insulin, *thyroid stimulating hormone* (TSH), *folicle stimulating hormone* (FSH), dan *luteinizing hormone* (LH). Hormon-hormon dalam kelompok ini umumnya melakukan aksi dalam beberapa menit dan hanya dalam waktu yang singkat. Sebagai contoh, pengaruh insulin terhadap glukosa darah sangat cepat dan waktu kerjanya sangat pendek. Pada umumnya hormon-hormon dalam kelompok ini sering disimpan sementara dalam kelenjar endokrin dan tersedia untuk sekresi secepat mungkin. Mekanisme kerja hormon protein (Gambar 4.4) diringkaskan sebagai berikut.

- Hormon protein melekatkan dirinya sendiri pada reseptor spesifik di permukaan sel, tetapi hormon ini tidak masuk ke dalam sel. Reseptor berasosiasi dengan sebuah enzim yang dinamakan adenilat siklase.
- Kompleks hormon-reseptor mengaktifkan adenilat siklase dan menyebabkan penguraian adenosin triposphate (ATP) untuk melepaskan *cyclic adenosin mono phosphate* (CAMP).
- CAMP kemudian berdifusi ke dalam sel dan bergabung dengan reseptor intraseluler dan bertindak sebagai "*second messenger*".
- CAMP berpengaruh melalui rangkaian reaksi kompleks (fosforilasi) yang dapat mengaktifkan enzim.
- Enzim-enzim inilah yang melakukan aktivitas hormon.



Gambar 4.4. Mekanisme kerja hormon protein ; Sumber: Rieutort M (1986)

Ion kalsium (Ca<sup>++</sup>) kadang-kadang juga bertindak sebagai “second messenger” bersama-sama CAMP. Ion Ca<sup>++</sup> berkombinasi dan mengaktifkan protein yang terdapat diintraseluler yang disebut calmodulin. Calmodulin yang telah diaktifkan ini kemudian dapat mengaktifkan enzim tertentu. CAMP berperan juga dalam hal merangsang sintesis protein, memengaruhi proses sekresi dan mengubah permeabilitas.

## B. Kelenjar Hipotalamus

Pada kelenjar hipotalamus terdapat dua jenis sel yang berperan dalam menghasilkan hormon. **Pertama**, sel-sel saraf hipotalamus menghasilkan neurohormon (*releasing hormone/releasing factor*) yang berperan untuk mengatur sekresi hormon kelenjar hipofisa. Neurohormon yang dihasilkan oleh sel-sel saraf khusus pada

hipotalamus (nukleus) tidak langsung melepaskan hormon ke dalam darah tetapi diangkut dulu melalui akson. **Kedua**, sel-sel neurosekresi yang menghasilkan hormon vasopressin dan oksitoksin melalui aksonnya kedua hormon disalurkan dan disimpan pada hipofisa belakang (posterior). Sementara untuk hormon pelepas (*releasing hormone*), sel-sel neurosekresi mengangkutnya terlebih dahulu melalui akson ke sistem pembuluh porta hipotalamo-hipofisis. Hormon-hormon yang dihasilkan pada kelenjar hipotalamus disajikan pada Tabel 4.1. Sebagai contoh, hormon GnRH (*Gonadotrophin Releasing Hormone*) yang berfungsi menstimulasi kelenjar hipofisa untuk mensekresikan hormon FSH dan LH. Hormon lain misalnya PRH (*Prolactin Releasing Hormone*) dan PRIH (*Prolactin Releasing Inhibitor Hormone*) yang berperan dalam mengontrol sekresi pelepasan atau penghambatan hormon prolaktin.

### C. Kelenjar Hipofisa (*Pituitary Gland*)

Kelenjar hipofisa disebut juga kelenjar pituitari yang terletak di dasar bagian otak pada sella turcica, sebuah lekukan di bawah rongga kepala. Kelenjar ini terdiri dari lobus anterior, lobus intermedia, dan lobus posterior. Lobus posterior berkembang secara embriologi dari hipotalamus dan pada dewasa masih berhubungan dengan otak yaitu tangkai infundibulum. Banyak saraf lewat dari hipotalamus kehipofisa posterior di mana saraf-saraf ini ada hubungannya dengan sekresi hormonal.

Suplai darah kelenjar hipofisa berasal dari arteri carotid interna. Beberapa cabangnya menuju langsung ke kelenjar, sementara yang lainnya menuju sistem kapiler dalam hipotalamus. Darah dari kapiler-kapiler ini lewat melalui pembuluh-pembuluh batang pituitari ke sistem kapiler kelenjar hipofisa bagian anterior. Sistem peredaran darah ini dikenal sebagai sistem portal hipotalamus-hipofisa di mana hormon-hormon hipotalamus dibawa menuju kelenjar hipofisa.

## D. Hormon-hormon Lobus Anterior (Hipofisa Anterior)

Terdapat enam hormon penting yang disekresikan oleh kelenjar hipofisa anterior, yaitu hormon pertumbuhan (*growth hormone*), *adrenocorticotrophic hormone* (ACTH), *thyroid stimulating hormone* (TSH), *follicle stimulating hormone* (FSH), *luteinizing hormone* (LH), dan prolaktin.

### 1. *Growth Hormone* (GH)

GH sering juga disebut somatotropin (STH). GH merupakan polipeptida terdiri atas 188 asam amino pada manusia dan strukturnya bervariasi menurut spesies. Waktu paruhnya dalam plasma sekitar 30 menit. Secara kimia, sifatnya hampir sama dengan prolaktin dan umumnya menyebabkan jaringan bertumbuh tanpa pematangan atau perkembangan. Kelebihan hormon pertumbuhan pada ternak muda menghasilkan pertumbuhan yang tidak normal, menghasilkan individu raksasa dengan kaki memanjang. Pada hewan dewasa ujung tulang membesar dalam diameternya, tetapi tidak dalam panjang. Sebaliknya kekurangan hormon pertumbuhan pada waktu muda menghasilkan individu yang kerdil.

GH biasanya tidak bekerja sendirian, dia dapat memperlancar atau memperbesar pengaruh hormon lain atau bekerja dengan hormon lain secara bersamaan (sinergi). Pengaruh anabolisme dari hormon pertumbuhan yang berperan dalam sintesis protein disebabkan oleh peningkatan tranpor asam-amino ke dalam sel dan perlekatan asam amino ke ribosom. Pengaruh metabolis penting lainnya dari hormon pertumbuhan adalah merangsang produksi glukosa dari hati sebagai pensuplai jaringan dengan sumber energi yang siap. Hormon pertumbuhan juga meningkatkan kadar asam lemak bebas dalam darah (bab fisiologi pertumbuhan).

### 2. *Adrenokortikotropik Hormone* (ACTH)

ACTH merupakan rantai polipeptida tunggal terdiri atas 38 asam amino. Waktu paruhnya sangat pendek sekitar 5 sampai 10 menit. Fungsi ACTH

pada daerah korteks adrenal adalah merangsang produksi glukokortikoid. Pelepasan ACTH dikontrol oleh hipotalamus yang mensekresikan *ACTH-releasing hormone* (ACTH-RH) dan dibawa melalui sistem portal hipotalamus-hipofisa ke sel-sel kelenjar hipofisa anterior yang memproduksi ACTH. Produksi ACTH-RH diatur oleh mekanisme umpan balik negatif (*negative feed-back mechanism*).

Penelitian *in-vitro* menunjukkan bahwa ACTH mempunyai pengaruh langsung dalam memobilisasi jaringan adipose (lemak) dan berinteraksi dengan hidrocortison. ACTH juga memainkan peranan penting dalam memulai proses kelahiran pada beberapa spesies.

### **3. *Thyroid Stimulating Hormone* (TSH)**

TSH merupakan glikoprotein, protein dengan komponen gula polisakarida dengan berat molekul sekitar 30.000–36.000. Waktu paruhnya cukup panjang sekitar 35–55 menit dalam plasma. TSH mengatur aktivitas kelenjar tiroid, yaitu merangsang pertumbuhan jumlah dan ukuran sel-sel folikel tiroid dan merangsang pelepasan hormon-hormon tiroid. Sekresi TSH diatur oleh mekanisme umpan balik negatif. Jika jumlah hormon tiroid dalam darah turun, produksi TSH dari kelenjar hipofisa anterior akan meningkat.

### **4. *Follicle Stimulating Hormone* (FSH) dan *Luteinizing Hormone* (LH)**

FSH dan LH adalah hormon gonadotropin yang berperan langsung dalam mengatur aktivitas gonad, yaitu ovarium dan testis. Keduanya merupakan glikoprotein dan mempunyai waktu paruh yang panjang sekitar 60 menit.

FSH berfungsi untuk merangsang pertumbuhan folikel pada ovarium. Adanya LH, folikel akan matang dan estrogen akan diproduksi. Pada testis, FSH diperlukan untuk perkembangan tubulus testis, pertumbuhan dan diferensiasi sel spermatozoa.

LH berperan dalam pematangan ovum, ovulasi, dan pembentukan korpus luteum. Korpus luteum menghasilkan hormon progesteron yang tidak menghambat produksi LH, juga mencegah pertumbuhan folikel, ovulasi, dan berahi. Pada hewan jantan, LH berpengaruh terhadap sel-sel penghasil hormon dalam testis, sel-sel interstitial yang menghasilkan hormon testosteron.

### 5. Prolaktin

Prolaktin dikenal juga sebagai hormon laktogenik, mamotropin dan lutotrophin. Prolaktin sangat penting untuk memulai dan memelihara sekresi susu dari kelenjar mammae. Pada beberapa spesies, prolaktin mempunyai pengaruh luteotropik, yaitu memelihara aktivitas korpus luteum. Pada spesies lainnya, proses luteotropik merupakan gabungan aktivitas dari LH, FSH, dan prolaktin, sedangkan spesies lainnya hanya LH dan FSH yang diperlukan untuk fungsi normal korpus luteum. Pada kelinci, estrogen terlibat juga dalam fungsi luteotropik.

Fungsi lain prolaktin untuk spesies tertentu adalah menimbulkan tingkah laku parental (orang tua), misalnya pada burung dan tikus, merangsang pertumbuhan kantung tembok (burung), merangsang pertumbuhan (reptil), dan hidup dalam air (amfibi).

Sekresi prolaktin dibatasi oleh hormon penghambat yang disekresikan dari hipotalamus. Hormon penghambat dikenal sebagai dopamin dan sekresi susu dapat dihambat oleh obat-obatan yang mempunyai pengaruh sama dengan dopamin.

## E. Hormon-hormon Lobus Intermedia

Kelenjar hipofisa lobus intermediet menghasilkan *Melanocyte Stimulating Hormone* (MSH). Hormon ini berkaitan dengan kontrol sel-sel pigmentasi pada hewan tingkat rendah. Hormon ini menyebabkan penggelapan kulit pada hewan amfibi atau ikan. Belum banyak diketahui peranannya pada hewan mamalia atau ternak.

## F. Hormon-hormon Lobus Posterior (Hipofisa Posterior)

Hormon yang dihasilkan dari kelenjar hipofisa posterior adalah antidiuretik hormon (ADH) atau vasopressin dan oksitoksin.

### 1. Antidiuretic hormone (ADH)

Hormon ini penting untuk mengontrol kehilangan cairan dari ginjal. Kekurangan ADH menyebabkan penyakit yang disebut diabetes insipidus yang dicirikan oleh ekskresi jumlah volume urin yang berlebihan. Pelepasan hormon ini bergantung pada tekanan osmotik darah yang mencapai osmoreseptor pada hipotalamus. Bila tekanan osmosis meningkat, sekresi ADH dirangsang. Hal ini menyebabkan tubulus ginjal meningkatkan reabsorpsi air dari filtrat ginjal dengan menghasilkan osmolaritas plasma kembali normal (Bab Fisiologi Ginjal). Bila tekanan osmosis menurun, sekresi ADH dihambat. Perubahan dalam sekresi ADH terjadi bila osmolaritas berubah paling sedikit 2% dan hal ini adalah mekanisme kontrol yang memelihara tetapan osmolaritas plasma.

### 2. Oksitoksin

Hormon ini bekerja pada kelenjar mammae hewan betina dan uterus. Penyusuan menyebabkan pelepasan secara refleks oksitoksin yang menyebabkan sel-sel mioepitel yang mengelilingi alveol kelenjar mammae berkontraksi. Proses ini dikenal sebagai "*milk let-down*", menekan susu keluar dari alveol masuk ke dalam saluran kelenjar mammae. Pencucian puting susu dengan air hangat sebelum pemerahan pada sapi perah akan memulai refleks yang sama.

Oksitoksin merangsang motilitas uterus dan pengaruh ini rupanya menjadi penting untuk transpor spermatozoa ke tempat fertilisasi. Pengaruh oksitoksin pada miometrium dipengaruhi oleh hormon lain.

Peningkatan estrogen dalam darah meningkatkan kerja oksitosin, sedangkan progesteron menghambatnya.

## G. Kelenjar Tiroid

Kelenjar tiroid memainkan peranan penting dalam metabolisme. Hormon tiroid merangsang konsumsi oksigen pada banyak sel dalam tubuh, membantu mengatur metabolisme lipid dan karbohidrat, dan diperlukan untuk pertumbuhan dan pendewasaan secara normal. Fungsi tiroid dikontrol oleh *thyroid stimulating hormone* (TSH) dari hipofisa lobus anterior dan oleh *Thyroid Releasing Hormone* (TRH) dari hipotalamus.

Kadar hormon tiroid dalam darah dijaga konstan melalui mekanisme umpan balik negatif yang bekerja pada tingkat kelenjar hipofisa. Dalam mengantisipasi terhadap dingin, hipotalamus meningkatkan produksi *releasing hormone*. *Releasing hormone* lewat tangkai infundibular ke kelenjar hipofisa dan merangsang sekresi TSH, yang kemudian kembali merangsang kelenjar tiroid untuk menghasilkan lebih banyak hormon tiroid.

Zat-zat utama yang disekresikan oleh kelenjar tiroid adalah tiroksin dan tri-iodothyronine. Kedua molekul mengandung yod dari darah. Konsentrasi yod pada kelenjar ini adalah 20–40 kali dibanding pada darah bersirkulasi. Hormon tiroid disintesis dalam bentuk koloid, di mana mereka tetap mengikat tiroglobulin sampai disekresikan. Bila dilepaskan ke dalam darah, hormon-hormon menjadi pengikat terhadap berbagai protein, termasuk ikatan tiroksinglobulin.

Hormon bekerja pada inti sel yang merangsang mekanisme kontrol sintesis protein. Pengaruh hormon tiroid dapat diringkaskan sebagai berikut.

- Meningkatkan pengambilan O<sub>2</sub> dan tingkat metabolisme
- Mutlak untuk pertumbuhan
- Penting untuk perkembangan dan fungsi otak
- Merangsang penyerapan glukosa dalam saluran pencernaan
- Melepaskan glukosa dari hati
- Mengurangi kadar kolesterol darah
- Mengubah karoten menjadi vitamin A
- Meningkatkan kerja adrenalin dan sistem saraf simpatik

Kekurangan hormon tiroid pada ternak muda menyebabkan kekerdilan yang disebut **cretinism**. Pada ternak dewasa, defisiensi menghasilkan laju metabolisme rendah, menurunkan kerja jantung, tekanan darah rendah, dan menurunkan sekresi urin. Sistem saraf dan perototan juga dipengaruhi oleh hal itu, sehingga menghasilkan kelesuan atau *lethargy* umum. Rendahnya kadar iod dalam darah mengakibatkan produksi hormon tiroid akan menjadi rendah. Untuk mengantisipasi keadaan ini, sekresi TSH dari kelenjar hipofisa meningkat, yang akan menyebabkan hypertrophy kelenjar tiroid dan penggunaan yod lebih baik. Jika terjadi kekurangan yod pada waktu kebuntingan, fetus mungkin menjadi tidak normal. Senyawa dalam bahan makanan menyebabkan penyakit gondok melalui peng-hambatan pengambilan yod oleh hipofisa atau menghambat pembentukan hormon.

Hipertiroidisme atau kelebihan aktivitas tiroid berhubungan dengan peningkatan laju metabolisme, peningkatan denyut jantung, penurunan bobot badan dengan nafsu makan normal atau meningkat, iritabilitas, dan *nervous*.

## H. Kelenjar Paratiroid dan Metabolisme Kalsium

Pada umumnya kalsium dalam tubuh didepositkan dalam tulang dan gigi. Sejumlah kecil dari kalsium tulang siap untuk dipertukarkan,

sedangkan sebagian besar hanya dapat ditukarkan pada tingkat rendah dengan kalsium plasma. Kalsium dalam darah menemukan sebagian dalam ikatan dengan protein dan sebagian lagi dalam bentuk ion kalsium bebas. Ion kalsium penting untuk koagulasi darah, aktivitas enzim, kontraksi otot jantung dan otot kerangka, serta fungsi normal saraf.

### 1. Paratiroid Hormon

Kelenjar paratiroid merupakan nodul-nodul kecil yang terletak di dalam atau dekat kelenjar tiroid. Umumnya terdapat dua kelenjar tiroid pada setiap sisi dan letaknya bervariasi menurut spesies.

Paratiroid mempunyai tiga fungsi utama, yaitu memobilisasi kalsium dari kerangka, mengurangi ekskresi kalsium, dan meningkatkan ekskresi *phosphat* di urin. Pada kerangka, paratiroid merangsang sel-sel yang dinamakan osteoklas, yang mampu memecah jaringan tulang sehingga meningkatkan ketersediaan kalsium dalam darah. Pengaruh hormon paratiroid pada ginjal menyebabkan penurunan pada reabsorpsi tubulus atau suatu peningkatan sekresi tubular *phosphat*.

Pengambilan kelenjar paratiroid menghasilkan konsentrasi ion  $\text{Ca}^{++}$  dalam darah dan urin bersamaan dengan peningkatan fosfat dalam darah dan penurunan fosfat dalam urin. Kalsium darah menurun dari kadar normal 2,1–2,6 mmol/l menjadi 1,3 mmol/l. Rendahnya kalsium darah memengaruhi sistem neuromuscular, tetani, kejang, dan mati lemas.

Kelebihan hormon paratiroid menyebabkan peningkatan mobilisasi kalsium dari kerangka. Kalsium akan mencapai kadar lebih tinggi 5 nmol/l dalam darah, sedangkan konsentrasi *phosphat* plasma turun. Kelangsungan pengambilan kalsium dari kerangka akan menyebabkan tulang kerangka menjadi lunak dan lemah. Kontrol sekresi hormon paratiroid bergantung pada level ion kalsium dalam darah dan bergantung pada kelenjar hipofisa.

## 2. Vitamin D

Steroid disintesis dalam kulit atau didapatkan dari bahan makanan. Selanjutnya vitamin D dihidroksilasi untuk membentuk sebuah hormon (1,25-*dihidroxy* vitamin D3). Hormon ini disekresikan oleh sel-sel dalam ginjal dan mengatur absorpsi kalsium dari alat pencernaan. Hal ini merupakan suatu proses yang bergantung pada mekanisme tranpor aktif.

## 3. Kalsitonin

Kalsitonin disekresikan oleh kelenjar paratiroid dan produksinya dikontrol oleh konsentrasi kalsium dalam darah. Kalsitonin menghambat mobilisasi kalsium dan fosfor dari tulang kerangka, sehingga konsentrasi kalsium plasma menurun. Hormon ini mempunyai pengaruh kecil terhadap absorpsi dan ekskresi.

# I. Kelenjar Adrenal

Terdapat dua organ endokrin pada kelenjar adrenal satu yang mengelilingi adrenal lainnya. Medula adrenal bagian dalam mensekresikan adrenalin dan noradrenalin. Bagian luar yaitu korteks adrenal mensekresikan hormon steroid.

Medula adrenal dalam pengaruhnya oleh ganglion simpatik yang mana neuron pogaionik telah hilang dan diganti oleh sel-sel sekresi. Sel-sel akan menyekresikan bila dirangsang oleh neuron ganlion yang mencapai kelenjar melalui saraf splamik. Hormon medula adrenal tidak penting untuk kehidupan, tetapi hormon mempersiapkan individu untuk hal-hal berhubungan dengan keadaan darurat.

Hormon korteks adrenal adalah derivat dari kolesterol. Secara kimia hormon tersebut steroid yang dibentuk mengelilingi inti steroid.

Hormon kortiko adrenal dapat dibagi menjadi tiga kelompok. Glukokortikoid adalah steroid dengan pengaruh yang luas terhadap

metabolisme karbohidrat dan protein. Mineralokortikoid adalah penting untuk menjaga keseimbangan sodium (ion  $K^+$ ) dan volume cairan ekstra seluler. Androgen adrenal adalah penting untuk pertumbuhan dan pematangan. Kekurangan mineralokortikoid dan glukokortikoid dapat diobati dengan pemberian hormon tersebut dan kerusakan kelenjar adrenal akan diikuti oleh kolaps dan kematian.

Pengaruh kortiko steroid disebabkan oleh kerjanya pada mekanisme regulasi sintesis protein dan pembentukan enzim seluler.

### **1. Hormon-hormon Medula**

Noradrenalin (norepinefrin) dan adrenalin (epinefrin) disekresikan oleh medula adrenal. Noradrenalin dibentuk oleh hidrosiklasi dan dekarboksilasi asam amino penilalanin dan adrenalin dibentuk oleh metilasi noradrenalin. Pada ternak yang sedang istirahat, sekresi serta kadar noradrenalin dan adrenalin dalam darah sangat rendah. Jika ternak *nervous* atau dalam keadaan stres, fisik sekresi dari medula adrenal meningkat. Hormon-hormon dengan cepat dihilangkan dari darah oleh jaringan, di mana mereka tidak aktif. Hasil metabolis selanjutnya diekskresikan oleh ginjal. Hormon-hormon medula adrenal mempunyai pengaruh biologis yang luas. Pengaruh ini dapat dibagi ke dalam pengaruh terhadap jantung dan sistem sirkulasi, pengaruh terhadap otot licin pada organ lain dan pengaruh terhadap metabolisme (Tabel 4.2).

Tabel 4.2 Pengaruh injeksi intravena dari adrenalin dan noradrenalin (+) menunjukkan peningkatan aktivitas, (0) tidak ada aktivitas, dan (-) menurunkan aktivitas

Pengaruh pada	Adrenalin	Noradrenalin
Denyut jantung		
Output jantung		
Tekanan sistol		
Darah		
Resistensi peri-peri	0	++
Konsumsi oksigen	++	+
Konsentrasi glukosa darah	+++	+
Konsentrasi asam laktat darah	+++	0
Motilitas alat pencernaan	--	--
Otot paru-paru	-	0

Injeksi adrenalin menyebabkan peningkatan konsentrasi glukosa dalam darah yang disebabkan peningkatan glikogenolisis pada hati dan menurunkan pengambilan glukosa oleh jaringan peri-peri. Terdapat juga peningkatan kadar laktat darah. Pengaruh terhadap metabolisme karbohidrat ini disertai oleh peningkatan dalam konsumsi oksigen dan produksi panas.

Secara umum dapat dikatakan bahwa hormon medula adrenal mempersiapkan ternak untuk mengantisipasi dengan cepat terhadap perubahan-perubahan dalam lingkungan. Kerja hormon membawa ternak dalam keadaan hati-hati, glukosa dimobilisasi konsumsi oksigen meningkat, bronchi paru-paru mengembang sehingga darah dapat membawa oksigen lebih banyak yang disebabkan kontraksi pleura, kerja jantung ditingkatkan, dan aliran darah melalui otot meningkat.

### 1.1 Glukokortikoid

Hormon glukokortikoid yang utama adalah kortisol (hidrokortison). Molekulnya mempunyai kelompok hidroksil pada posisi 17 dalam inti seroid. Kortisol memengaruhi konsentrasi glukosa darah dan jumlah glikogen dalam hati dengan pengurangan pemecahan glukosa dan meningkatkan sintesis dari protein (glukoneogenesis). Fungsi-fungsi fisiologis yang bergantung pada konsentrasi kortisol yang cukup dalam darah adalah pengeluaran air, pemeliharaan konsentrasi glukosa dalam darah pembentukan sel darah merah, pemeliharaan tekanan darah, respons normal terhadap stres. Sekresi glukokortikoid diatur oleh ACTH melalui mekanisme umpan balik.

### 1.2 Mineralokortikoid

Hormon yang paling penting adalah aldosteron. Molekulnya mempunyai kelompok aldehid pada posisi 13 dalam steroid. Aldosteron mengatur pengeluaran kalium dan natrium di ginjal dan kelenjar air ludah, peningkatan absorpsi natrium di alat pencernaan.

Jika aldosteron diberikan kepada ternak setiap hari untuk periode tertentu, jumlah natrium pada cairan ekstraseluler akan meningkat. Meskipun demikian, terdapat juga penurunan dalam konsentrasi kalium dan hasilnya adalah perluasan isotonik dari ruang cairan ekstraseluler. Jika ternak diadrenalaktomi, ternak gagal menahan natrium dalam jumlah yang cukup di ginjal. Konsentrasi natrium di cairan ekstraseluler turun dan konsentrasi natrium meningkat, hasilnya adalah kehilangan air dari ruang cairan ekstraseluler.

Sekresi aldosteron tidak bergantung pada ACTH karena pengambilan kelenjar hipofisa menyebabkan perubahan sedikit dalam sekresi hormon. Sekresi aldosteron sebagian diatur oleh kadar kalium dan natrium dalam darah. Rendahnya natrium dan tingginya kalium meningkatkan produksi aldosteron. Mekanisme kontrol yang lebih

penting kelihatannya melibatkan renin yang disekresikan oleh ginjal dalam mengantisipasi rendahnya kadar Na dalam darah atau tekanan darah rendah.

### 1.3 Androgen Adrenal

Androgen adalah hormon yang mempunyai pengaruh maskulinasi. Hormon ini meningkatkan metabolisme dan pertumbuhan. Testosteron dari tes-tes merupakan hormon yang penting dan daya kerja androgen adrenal hanya kurang dari 1/5 aktivitas androgen testis. Sekresi androgen adrenal diatur oleh ACTH dan bukan oleh gonadotropin. Jumlah androgen adrenal disekresikan pada jantan kastrasi dan betina adalah hampir sama besar dengan jantan normal. Bila kelebihan sekresi androgen terjadi secara genetik pada fetus betina, akan merangsang perkembangan alat kelamin jenis jantan dan berbagai tingkat hasil hermaprodit semu. Kondisi ini umumnya terlihat pada babi.

## J. Kelenjar Pankreas dan Pengaturan Glukosa Darah

Pulau langerhan di pankreas mensekresikan dua hormon polipeptida, glukagon, dan insulin yang sangat penting untuk pengaturan metabolisme intermedia. Glukagon meningkatkan glukosa darah dengan merangsang glikogenolisis hati, sedangkan insulin menurunkan glukosa darah dengan mempermudah masuknya glukosa ke dalam sel-sel otot dan jaringan lainnya.

Pulau langerhan merupakan 1–2% dari bobot kelenjar. Tiga hormon dihasilkan oleh jenis sel yang ditemukan pada pulau langerhan. Sel A menghasilkan glukagon, sel B menghasilkan insulin, dan sel D menghasilkan somatostatin yaitu hormon penghambat, hormon pertumbuhan yang penting untuk pengaturan glukosa.

## 1. Insulin

Pengambilan kelenjar pankreas menyebabkan penyakit diabetes melitus yang disebabkan kekurangan insulin. Pengaruh insulin sangat jelas dan pendek bila ada peningkatan konsentrasi glukosa dalam darah mencapai 8–25 mmol/liter. Nilai ruminansia 3,3 mmol/l. Bila konsentrasi glukosa dara mencapai nilai ambang ginjal, yaitu 9–10 mmol/l, glukosa dikeluarkan di urin. Tanpa insulin terjadi pengurangan kemampuan untuk memetabolisir glukosa menjadi karbon dioksida dan air dan mensintesis lemak dari glukosa. Penyimpanan glikogen di hati dan otot adalah rendah dan sintesis glikogen rendah bila tidak ada insulin. Sejumlah glukosa dalam darah tidak dapat masuk ke dalam sel dan tidak efektif digunakan oleh jaringan, baik lemak dan protein yang berperan sebagai sumber energi dalam ternak diabetes, menghasilkan pemborosan pada jaringan tubuh. Darah mengandung sejumlah besar lemak dan hasil-hasil metabolisme tidak sempurna dari lemak dan protein. Diabetes dapat dikembalikan atau disembuhkan dengan pemberian insulin.

Terdapat tiga rute glukosa keluar dari darah. **Pertama**, glukosa masuk ke dalam sel-sel hati karena membrannya secara bebas dapat dilewati gula untuk disimpan sebagai glikogen atau dimetabolisir. **Kedua**, glukosa dapat masuk ke dalam sel-sel yang sebagian permeabel terhadap glukosa untuk disimpan atau dimetabolisir. Faktor pembatas masuk ke dalam metabolisme glukosa di sel tersebut adalah tempat melewati membran sel. Sampai konsentrasi glukosa dalam cairan ekstraseluler mencapai level tertentu, batas ambang jaringan, tidak ada glukosa yang akan masuk ke dalam sel. Batas ambang jaringan untuk glukosa tidak tetap dan sifat-sifatnya dapat berubah. Batas ambang ini dapat direndahkan oleh beberapa faktor seperti insulin, kekurangan oksigen, dan aktivitas perototan. Faktor lain yang meningkatkan batas ambang jaringan adalah hormon pertumbuhan, adrenalin,

glukokortikoid, dan asam lemak nonesterifikasi (NEFA). **Ketiga**, glukosa dapat lolos ke dalam urin. Pada kondisi ginjal dan kadar glukosa darah normal, semua glukosa yang disaring di glomerulus ginjal direabsorpsi kembali dan tidak ada glukosa yang keluar dari tubuh. Sebaliknya, bila ginjal rusak atau kadar gula dalam darah berlebihan, sejumlah glukosa dapat hilang melalui urin. Insulin mengurangi konsentrasi glukosa dalam darah dengan rendahnya batas ambang jaringan glukosa karena terjadi peningkatan laju pengambilan glukosa oleh jaringan peri-peri. Insulin juga bekerja melalui perangsangan sintesis glikogen, akibatnya menurunkan *output* glukosa dari hati. Insulin merendahkan konsentrasi asam lemak bebas dalam darah melalui peningkatan permeabilitas membran sel terhadap asam lemak bebas dan dengan menghambat pemecahan trigliserida. Konsentrasi asam amino dalam darah juga rendah disebabkan oleh peningkatan permeabilitas membran sel terhadap asam amino dan rangsangan sintesis protein.

Secara umum dapat dikatakan bahwa insulin meningkatkan permeabilitas membran sel terhadap molekul-molekul organik (glukosa, asam lemak, dan asam amino) dan merangsang sintesis intraseluler molekul besar dari unit-unit.

## 2. Glukagon

Suplai utama dari glukagon datang dari sel A pankreas, tetapi jumlahnya lebih kecil disekresikan oleh mukosa lambung dan permukaan usus halus. Tidak seperti insulin, glukagon kelihatannya bekerja hanya pada metabolisme intraseluler dan bukan pada permeabilitas membran sel. Glukagon merangsang pemecahan glikogen, protein, dan trigliserida. Glukagon merangsang juga glukoneogenesis oleh hati dari hasil dari lipolisis dan proteolisis. Rangsangan pemecahan glikogen dibatasi pada hati dan tidak terjadi pada otot rangka.

Secara umum, kerja glukagon adalah untuk merangsang katabolisme semua bahan organik material di atas. Glukagon

meningkatkan konsentrasi glukosa plasma, asam lemak nonester, dan asam-asam amino.

## K. Hormon-Hormon Saluran Pencernaan

Zat-zat pertama kali dinamakan hormon adalah dua polipeptida saluran pencernaan, yaitu sekretin dan gastrin. Kedua protein ditemukan masing-masing tahun 1902 dan 1905, tetapi keduanya masih diperdebatkan apakah mereka ini dinamakan hormon atau tidak. Sebagai contoh kita tidak mengetahui apakah sekretin dihasilkan oleh semua sel mukosa duodenum atau apakah produksinya terbatas pada kelenjar uniseluler di bagian alat pencernaan.

### 1. Gastrin

Gastrin ditemukan pada tahun 1905 oleh Edhins, tetapi keberadaannya baru diakui pada tahun 1938. Gastrin adalah polipeptida yang terdiri atas 17 asam amino, dihasilkan oleh mukosa daerah "*pylorus*" lambung dalam mengantisipasi peregangan mekanis dari aksi lokal kelenjar komponen makanan. Gastrin di bawah dalam jarak pendek ke daerah fundus lambung melalui pembuluh darah ketika dia merangsang produksi asam *chlorida*. Gastrin juga merangsang sekresi pankreas. Struktur kimia mempunyai kesamaan dengan *cholesytokinin-pancreozym*.

### 2. Sekretin

Sekretin ditemukan tahun 1902 oleh Bayliss dan Starling yang merupakan rantai tunggal polipeptida 27 asam amino yang secara kimia sama dengan glukagon. Tempat sel sekresi secara pasti tidak diketahui karena tidak semua sel-sel mukosa duodenum dapat memproduksi sekretin. Rangsangan untuk pelepasan sekretin adalah adanya cairan (*chyme*) di duodenum. Sekretin masuk ke dalam aliran darah menuju ke pankreas, di mana secara langsung merangsang sel-sel acinar dan memulai keluarnya cairan pankreas, tetapi tidak melepaskan enzim.

Sekretin merangsang aliran cairan empedu dan cairan usus. Pelepasan sekretin dirangsang oleh bentuk intermediet dari perubahan makanan oleh asam *chlorida* dari lambung dan alkohol. GH dan ACTH memainkan peranan dalam menjaga produksi sekretin, meskipun mekanismenya belum diketahui secara pasti.

### **3. Cholecystokinin-pancreozym**

*Cholecystokinin* diproduksi oleh mukosa usus halus, sedangkan *pancreozym* disekresikan oleh mukosa bagian atas usus halus. Kedua hormon ini menimbulkan kontraksi dan mengosongkan isi kantung empedu, merangsang sekresi enzim pankreas, dan meningkatkan pengaruh kerja sekretin, misalnya meningkatkan gerakan peristaltik usus.

Hormon lain yang diisolasi dari sistem saluran pencernaan tetapi masih diteliti karakteristiknya adalah *vasoaktive intestinal peptide* (VIP) yang mempunyai pengaruh vasodilatasi pada usus; *gastrin release peptide* (GRP) yang merangsang sekresi gastrin dan berpengaruh terhadap gerakan peristaltik, dan motiline yang berperan dalam gerakan usus.

## **L. Hormon Kelenjar Gonad**

### **1. Hormon-hormon Testis**

Hormon kelamin jantan dihasilkan pada sel-sel interstisial testis. Beberapa androgen dihasilkan (testosteron dan androstenedion), tetapi yang penting adalah testosteron. Hormon ini bertanggung jawab untuk perkembangan karakter kelamin sekunder. Kastrasi ternak prepubertas memberikan gambaran jelas tentang pentingnya androgen: penis, skrotum, dan karakter kelamin sekunder gagal untuk berkembang. Hormon androgen juga mengatur aktivitas sekresi dari kelenjar prostat dan vesikel seminalis.

## **2. Hormon-hormon Ovarium**

Hormon-hormon kelamin betina diproduksi di ovarium. Sebelum awal pubertas produksi hormon ini adalah rendah. Bila sekresi hormon di ovarium nyata, ternak akan memulai siklus reproduksi secara terus-menerus sampai terjadi perkawinan. Hormon yang dihasilkan dari ovarium adalah estrogen yang terdiri atas estradiol, estron dan estriol, hormon progesteron. Fungsi dari hormon estrogen meliputi banyak aspek.

- Pertumbuhan dan perkembangan uterus, vagina, dan kelenjar tambahan lainnya.
- Berpartisipasi terhadap pertumbuhan kelenjar mammae.
- Pigmentasi daerah alat kelamin.
- Proliferasi mukus uterin dan vagina setiap siklus.
- Sekresi dari kelenjar kol uterus.
- Memengaruhi perkembangan saluran galaktofor pada kelenjar mammae.
- Bersifat umpan balik terhadap sekresi hipofisa.
- Berpengaruh terhadap metabolisme pada konsentrasi tinggi, retensi air dan garam, retensi amoniak.

Sementara hormon progesteron berfungsi sebagai berikut.

- Bekerja terhadap endometrium (perkembangan dan sekresinya).
- Memodifikasi sitologi mukus vagina.
- Bekerja sinergi dengan estrogen untuk memodulasi sekresi gonadotropin hipofisa pada akhir siklus atau menstruasi.
- Proliferasi acin kelenjar mammae.

## **M. Hormon-hormon Lokal**

Akhir-akhir ini sejumlah zat telah ditemukan yang dapat dilepaskan dari satu kelompok sel dan bertindak pada sel sasaran jarak

yang pendek. Zat-zat itu bukan hormon dalam pengertian klasik karena zat tersebut bergerak menuju sel sasaran dibawa dalam pembuluh darah. Bahan-bahan ini kadang-kadang dinamakan hormon lokal atau parahormon dan banyak di antara mereka adalah derivat asam aracidonat.

Prostaglandin, trombosan, dan lekotrin adalah kelompok yang berhubungan erat dengan asal lemak tidak jenuh. Penamaan prostaglandin didasarkan atas konfigurasi kimia dari molekulnya tiga kelompok utama adalah PGA, PGE, dan PGF.

Variasi yang luas dari fungsi-fungsi fisiologis telah mencirikan protaglandin,. Sebagai contoh, proses yang mengatur prostaglandin adalah sekresi asam lambung, luteolisis, dan regulasi lokal dari cairan jaringan aliran darah. Trombosan A2 (FGA2) menyebabkan agregasi keping-keping darah dan vasokonstriksi. Trombosan dilepaskan dari keping-keping darah ketika PGA2 yang datang dan kontak dengan pembuluh darah yang luka dan membantu untuk memulai proses pembekuan darah. Lekotrin dilepaskan dari sel-sel mas yang didistribusikan secara luas pada jaringan-jaringan melalui respons alergi media seperti inflamasi.

## RINGKASAN

- Hormon dapat didefinisikan sebagai *mesenger* (pembawa pesan) kimiawi khusus yang dihasilkan oleh suatu bagian terbatas dari suatu organisme, tempat zat dalam konsentrasi sangat rendah efektif dalam mengatur dan mengoordinasi aktivitas selnya.
- Pada umumnya tiap jenis sel hormon diproduksi dan disekresi oleh suatu sel tertentu. Sel sasaran tiap hormon mempunyai reseptor khas, yaitu protein yang mengikat hormon dengan afinitas tinggi, kekhususan tinggi, dan kapasitas rendah.

- Hormon steroid bergabung dengan reseptor khususnya dan dapat dibawa ke nukleus tempat zat tersebut mengaktifkan gen-gen tertentu yang menyebabkan diproduksi RNA *mesenger* yang disandi untuk mensintesis protein tertentu.
- Hormon protein terikat pada reseptornya di permukaan sel sasaran dan mengaktifkan adenilat siklase yang menghasilkan siklik AMP, mengaktifkan protein kinase, menyebabkan fosforlase protein tertentu, serta mengaktifkan dan menonaktifkan enzim tertentu.
- Kelenjar hipofisa yang terletak di tengkorak tepat di bawah otak dan terdiri dari 3 bagian, yaitu lobus anterior, lobus intermediet, dan lobus posterior. Lobus anterior di samping menghasilkan hormon stimulasi tiroid (TSH) dan hormon adrenokortikotrofik (ACTH), juga memproduksi hormon pertumbuhan (GH), hormon stimulasi folikel (FSH), hormon lutein (LH), dan prolaktin.
- Hormon pertumbuhan mengontrol pertumbuhan umum tubuh dan tulang dengan meningkatkan laju proses metabolisme yang menyangkut sintesis protein, ACTH berpengaruh pada korteks adrenal untuk merangsang produksi glukokortikoid. TSH mengatur aktivitas kelenjar tiroid dan sekresi tiroksin. FSH merangsang pertumbuhan folikel dalam ovarium dan pertumbuhan saluran seminifer dalam testis. LH merangsang pelepasan telur matang dari folikel dan pembentukan korpus luteum pada ternak betina. Pada jantan, LH mengatur produksi androgen dalam sel interstisium dari testis. Prolaktin mempunyai pengaruh luteotropik, yaitu memelihara aktivitas korpus luteum. Prolaktin penting juga untuk memulai dan memelihara sekresi susu dari kelenjar mammae.
- Lobus intermediet menghasilkan hormon stimulasi melanosit (MSH) yang membuat kulit ikan amfibi dan reptilia menjadi gelap oleh penyebaran pigmen di dalam kromatofor.
- Lobus posterior mensekresi oksitosin dan vasopresin yang diproduksi

di hipotalamus. Oksitosin merangsang kontraksi uterus dan berperan aktif dalam proses keluarnya air susu dari kelenjar mammae. Vasopressin mengontrol kehilangan cairan di ginjal.

- Kelenjar tiroid menghasilkan tiroksin dan *triyodotironin* yang meningkatkan laju oksidatif, yaitu proses pelepasan energi dalam sel tubuh. Ketiadaan tiroksin menyebabkan pertumbuhan tubuh dan mental yang terlambat. Produksi dan sekresi tiroksin diatur oleh TSH yang diproduksi oleh pituitari dan TRH yang disekresi oleh hipotalamus.
- Kelenjar paratiroid memproduksi hormon paratiroid (PTH) bersama kalsitonin yang disekresi oleh tiroid mengatur metabolisme kalsium dan fosfor.
- Kelenjar adrenal terdiri atas koleksi bagian luar dan medula bagian dalam, medula mensekresi adrenalin, dan noradrenalin. Adrenalin diperlukan untuk mengantisipasi pengaruh cekaman ketakutan dan berkelahi. Noradrenalin sebagai neurotransmitter serta berpengaruh terhadap berbagai organ dan memperpanjang kerja sistem simpatik.
- Korteks adrenal adalah penting untuk kehidupan dan menghasilkan 3 jenis hormon steroid, glukokortikoid, mineralokortikoid, dan androgen dengan aktivitas hormon laki-laki. Glukokortikoid merangsang perubahan asam amino menjadi karbohidrat. Mineralokortikoid mengatur metabolisme dan ekskresi dari natrium dan kalsium, androgen adrenal biasanya mengontrol perkembangan karakter kelamin sekunder.
- Kelenjar pankreas mengandung komponen endokrin dan eksokrin. Kelenjar endokrin pankreas dibuat dari jutaan sel-sel pulau langerhans yang menghasilkan glukogen (sel  $\alpha$ ), insulin (sel  $\beta$ ), dan somatotropin (sel D). Insulin membantu penyimpanan glukosa asam amino dan asam-asam lemak dengan meningkatkan penyerapan glukosa dari darah oleh otot dan jaringan adiposa. Glukagon

merombak glikogen dalam hati yang menyebabkan peningkatan kadar glukosa dalam darah.

- Beberapa hormon telah dimurnikan dan dari saluran pencernaan dan sebagian sudah dipostulasikan, gastrin dihasilkan dari *pylorus* lambung dan merangsang sekresi HCL oleh kelenjar daerah fundus dalam mengantisipasi rangsangan makanan dan mekanik. Bila makanan dibebaskan masuk ke dalam duodenum sekresi dan *choleciptokinin pancreozymin* dilepaskan dari mukosa duodenum merangsang kelenjar eksokrin pankreas untuk merangsang keluarnya cairan pankreas dan pelepasan enzim. YIP dirangsang oleh adanya glukosa dan dilepaskan untuk merangsang sekresi insulin.
- Hormon kelamin terdiri atas hormon kelamin jantan adalah testosteron dan kelamin betina; estrogen (estradiol, estron, dan estriol) dan progesteron. Testosteron dan androstenedion yang berperan dalam perkembangan organ-organ kelamin jantan. Hormon estrogen berperan dalam perkembangan organ kelamin betina dan memelihara karakter-karakter kelamin betina. Progesteron berperan dalam mempersiapkan kebuntingan.
- Hormon lokal yang penting adalah derivat dari asam arachidonat, yaitu prostaglandin yang berfungsi untuk melisiskan korpus luteum dan regulasi lokal aliran darah, tromboson berperan dalam proses pembekuan darah, dan leukotrien mempunyai pengaruh dalam respons alergi.

Latihan berikut ini sengaja disusun untuk memantapkan Anda terhadap materi yang baru dibicarakan. Kerjakan latihan berikut dengan sungguh-sungguh!

1. Apa yang dimaksud hormon, kelenjar endokrin, dan reseptor?
2. Apa perbedaan antara sistem endokrin, neuro hormon, neuro sekresi, dan neuro transmisi?

3. Jelaskan perbedaan metode kerja hormon steroid dan hormon peptida!
4. Sebutkan minimal 5 jenis hormon yang dihasilkan oleh kelenjar lobus anterior beserta fungsinya!
5. Apa yang terjadi bila seekor ternak dewasa dihipofisektomi lobus posterior?
6. Jelaskan peranan hormon insulin dan glukagon di dalam metabolisme karbohidrat!
7. Jelaskan fungsi hormon yang dihasilkan oleh alat pencernaan!
8. Jelaskan fungsi hormon dalam proses pengaturan keluarnya air susu!
9. Apa yang dimaksud dengan kontrol umpan balik positif dan berikan contohnya?
10. Jelaskan apa yang mengatur pengeluaran hormon dalam tubuh ternak!

# BAB V

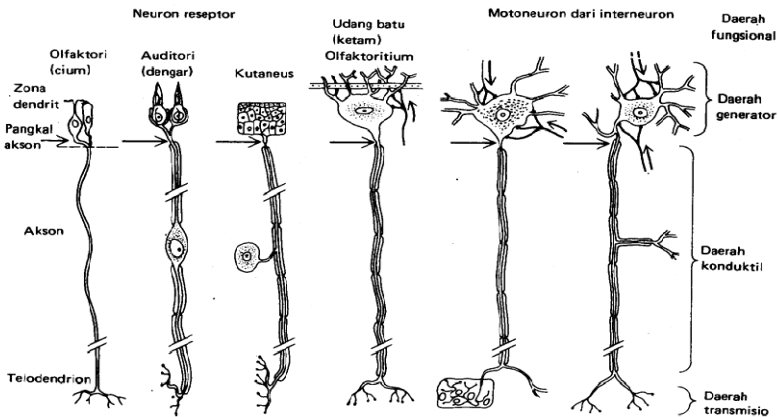
## FISIOLOGI SARAF

Sistem saraf tersusun dari satu alat komunikasi dan integrasi untuk organisme yang dicirikan oleh cepatnya reaksi dan lokalisasi yang tepat dari tempat kerjanya. Fungsinya didasarkan atas suatu infrastruktur seluler sangat sempurna, hubungan bercabang yang menghasilkan kerja dengan ketepatan tinggi dan cepat. Pada umumnya sistem saraf mengatur aktivitas alat-alat tubuh yang mengalami perubahan relatif cepat seperti pergerakan otot rangka, pergerakan otot polos pada alat pencernaan, dan sekresi beberapa kelenjar. Contoh fungsi sistem saraf dalam mengatur dan mengoordinasikan berbagai aktivitas dari fungsi tubuh adalah hubungan sistem pencernaan dan sistem peredaran darah. Sistem pencernaan pada ternak tidak ada artinya jika tidak didampingi oleh sistem peredaran darah untuk menyerap dan mengedarkan berbagai zat makanan yang telah dicerna. Berbagai sistem tersebut bekerja sama tidak sembarangan. Waktu dan tempat dari satu perangkat kegiatan berhubungan erat dengan berbagai kegiatan lain. Beberapa kegiatan tubuh seperti berjalan dan mengunyah merupakan kegiatan yang disadari oleh individu hewan, sedangkan kegiatan lain seperti pengaturan denyut jantung sekresi enzim dan gerakan peristaltik merupakan aktivitas yang tidak disadari (otonom). Semuanya itu dikordinasikan oleh sistem saraf sebagai jaringan khusus yang menghubungkan seluruh tubuh dan sebagian lain diatur oleh sistem hormonal sebagai sekresi kimia yang dikeluarkan oleh kelenjar endokrin ke dalam peredaran darah. Jadi, peran utama sistem saraf dalam kehidupan organisme adalah sebagai berikut.

1. Mengatur dan mengontrol berbagai aktivitas pada berbagai organ dan seluruh tubuh hewan. Kontraksi otot, sekresi kelenjar, kerja jantung, metabolisme, dan masih banyak proses lain yang beroperasi dalam tubuh ternak yang dikontrol oleh sistem saraf.
2. Sistem saraf berhubungan dengan berbagai organ dan sistem, mengoordinasi semua kativitas dan menjamin integritas fisiologis organisme.
3. Membantu dalam pemeliharaan kesatuan organisme dengan lingkungannya.

## A. Sel Saraf, Impuls, dan Sinaps

Sel yang mengkhususkan diri untuk penerimaan dan transmisi rangsangan disebut neuron. Neuron merupakan unit fungsional dan struktural sistem saraf pada semua hewan multisel. Sistem saraf pusat terdiri atas lebih dari 100 triliun sel saraf. Suatu neuron terdiri atas dendrit, akson badan sel, dan telodendrion (Gambar 5.1).



Gambar 5.1 Skema berbagai jenis sel saraf (neuron) reseptor dan efektor

- Dendrit merupakan bagian dari neuron yang khusus menerima rangsangan, baik dari rangsangan lingkungan maupun dari sel lain.
- Akson fungsinya untuk membagi dan mengantarkan rangsangan menjauhi zona dendrit.
- Badan sel yang mempunyai nukleus berfungsi untuk pemeliharaan metabolis dan pertumbuhan sel saraf.
- Telodendrion merupakan alat distribusi/emisif. Lebar serabut saraf berkisar antara beberapa mikrometer sampai 30 atau 40 mikrometer dan panjangnya berkisar dari satu mili sampai 1 meter lebih.

Neuron dapat diklasifikasikan sebagai unipolar, bipolar, atau multipolar berdasarkan pada beberapa banyak sel. Ada dua jenis serabut saraf yaitu akson yang meneruskan rangsangan menjauhi badan sel dan dendrit yang membawanya ke badan sel. Pertautan antara akson suatu neuron dan dendrit neuron lainnya di dalam rantai itu disebut sinaps. Pada sinaps itu akson dan dendrit sebenarnya tidak saling menyentuh tetapi di antara kedua penjurulan tersebut terdapat celah sempit. Transmisi suatu rangsangan melalui sinaps memerlukan mekanisme yang berbeda dengan transmisi dalam serabut saraf. Suatu rangsangan hanya dapat melewati sinaps jika datang dari akson menuju dendrit, jadi sinaps berfungsi sebagai katub yang mencegah arus balik dari impuls.

Secara fungsional neuron dibagi 3 daerah.

- **Daerah generator** yaitu daerah yang terbatas pada dendrit dan mempunyai ciri suatu spesifikasi yang memungkinkan untuk dirangsang oleh neurotransmitter dari neuron didekatnya.
- **Daerah konduktif** merupakan bagian yang terbesar dari akson neuron.
- **Daerah transmisi** yaitu ujung akson yang mengalami spesialisasi untuk sekresi neurotransmitter, seperti asetilkolin dan norepinefrin.

Daerah generator neuron reseptor dapat diaktifkan oleh berbagai rangsangan mekanik, kimiawi, termik. Bagian generator dari neuron motor dan interneuron dirangsang melalui transmisi sinaptik oleh suatu neurotransmitter yang dihasilkan oleh neuron didekatnya. Neuron dapat merupakan sel sekresi asli yang memproduksi oksitoksin dan hormon pelepas hipotalamus.

Berdasarkan fungsinya neuron dapat dibagi menjadi 3 golongan.

- **Neuron sensorik (afere)** menerima rangsang dari reseptor-reseptor pada kulit, alat indra dan reseptor lain, serta menyalurkan impuls dari ujung reseptor menuju badan sel. Badan sel terdapat pada ganglion di bagian dorsal sumsum tulang belakang. Dari badan sel saraf ini impuls menjalar melalui akson ke sel saraf yang lain, yaitu ke sel saraf motorik atau sel saraf interneuron.
- **Neuron motorik (eferen)** menerima impuls dari saraf sensorik secara langsung atau melalui interneuron atau menerima impuls dari otak. Impuls diteruskan melalui akson ke efektor (otot, kelenjar) badan sel saraf terdapat pada pusat saraf.
- **Neuron konektor (interneuron)** merupakan sel saraf berkutub banyak (multipolar) yang mempunyai banyak dendrit dan akson. Sel saraf interneuron menghubungkan sel saraf yang satu dengan yang lain, misalnya sel saraf sensorik dengan sel saraf motorik.

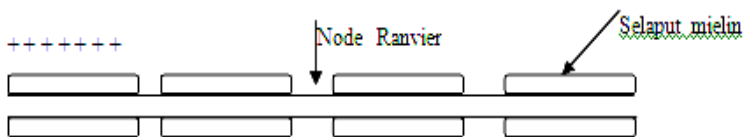
Biasanya badan sel neuron terdapat dalam kelompok, kelompok badan sel yang terdapat di dalam sumsum tulang belakang, lapisan badan sel di permukaan bagian-bagian dari otak, nodul-nodul badan sel dalam otak (nukleus), dan ganglion dari saraf kranial dan saraf spinal.

Suatu ganglion adalah sekelompok akson dan dendrit yang disatukan oleh jaringan ikat. Tiap serabut akson atau dendrit dikelilingi oleh neurilema/lapisan mielin atau oleh keduanya. Neurilema adalah

membran halus transparan berbentuk tabung yang terbentuk dari sel-sel yang membungkus serabut. Lapisan mielin terbuat dari bahan lemak nonseluler yang berbetuk lapisan putih mengkilat antara serabut dan neurilema. Lapis mielin pada jarak-jarak yang cukup teratur terputus oleh kontraksi-kontraksi yang disebut bentuk **Ranvier**. Serabut saraf itu “bermedula”, mempunyai pembungkus mielin tebal atau “tanpa medula”, dan mempunyai pembungkus mielin yang sangat tipis.

Jaringan saraf dalam otak dan sumsum tulang belakang, di samping neuron mempunyai sel-sel penunjang yang disebut neuroglia. Sel-sel ini mempunyai banyak penjururan sitoplasma dan sel-sel bersama penjururan-penjururannya yang merupakan kerangka penyangga sangat rapat di mana tempat neuron itu berada.

Neuroglia diperkirakan memisahkan dan mengisolasi neuron-neuron yang berdekatan, sehingga rangsangan dapat berjalan dari neuron ke neuron lainnya hanya dengan melewati sinaps yang *barrier* neuroglianya tidak sempurna.



Gambar 5.2 Diagram akson yang bermielin

### 1. Impuls

Impuls yang dapat dikatakan secara sederhana adalah berita merambat pada sebuah serabut saraf. Menurut teori membran tentang penyaluran saraf, peristiwa listrik yang terjadi di dalam serabut saraf diatur oleh permeabilitas diferensial dari membran neuron terhadap ion natrium dan kalium, permeabilitas ini diatur oleh bidang

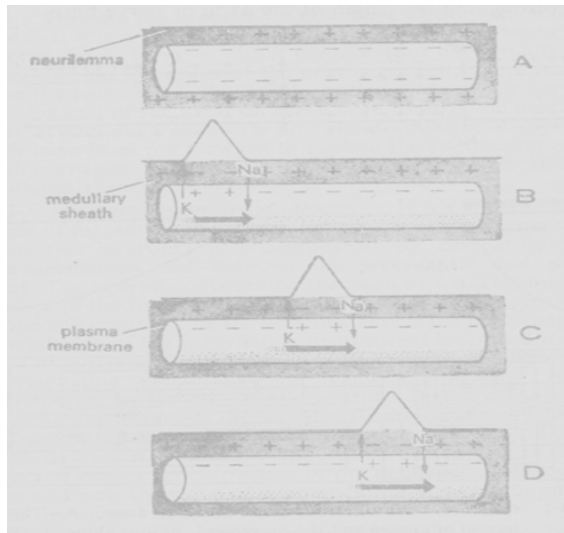
listrik melalui membran. Interaksi kedua faktor ini adalah permeabilitas diferensial dan medan listrik, menimbulkan suatu persyaratan ambang perubahan kritis agar dapat terjadi suatu eksitasi. Eksitasi adalah pelepasan regeneratif energi listrik dari membran saraf dan penyaluran perubahan sepanjang serabut merupakan aksi potensial, yaitu depolarisasi membran elektrokimia semua atau tidak sama sekali.

Neuron dalam keadaan istirahat (tidak menghantarkan impuls) merupakan suatu tabung silindris panjang yang membran plasmanya memisahkan dua larutan dengan komposisi kimiawi yang berlainan dengan jumlah ion yang sama. Pada saat itu, di sebelah dalam serabut saraf bermuatan negatif (-60 mVolt) sedang di sebelah luar bermuatan positif. Keadaan membran serabut saraf dalam keadaan **polarisasi**. Potensial istirahat yang disebut juga "*resting potential*" suatu membran adalah perbedaan potensial listrik antara muatan negatif di dalam membran dekat dan aksoplasma (protoplasma saraf) dengan muatan positif di luar membran dekat cairan ekstraseluler yang menyelimuti saraf dan prosesus saraf. Potensial istirahat dihasilkan dari perbedaan ion-ion dan muatannya di dalam dan di luar membran. Terdapat kelebihan sedikit ion positif (kation) di luar membran suatu sel saraf yang sedang istirahat (terpolarisasi) dan kelebihan sedikit ion negatif (anion) di dalam membran plasma.

Penebaran muatan yang tidak seimbang mengakibatkan timbulnya perbedaan tegangan yang disebut potensial membran. Peristiwa ini terjadi pada semua membran sel. Besarnya potensial membran bervariasi antara suatu sel dengan sel lainnya, yaitu dari -10mV sampai -100 MV. Khusus sel saraf dan sel otot besarnya potensial sekitar 85 mV.

Dalam medium luar, ion natrium dan klor merupakan yang utama adalah ion kalium dan berbagai ion lain. Ion kalium dan klor berdifusi secara relatif bebas melalui membran ini, tetapi permeabilitas terhadap

natrium rendah. Kalium cenderung merembes masuk, tetapi karena permeabilitas yang selektif dari membran tersebut, sehingga merembesnya kalium keluar lebih cepat dari masuknya natrium.



Gambar 5.3. Penyebaran impuls saraf sepanjang akson  
Sumber: Verma PS, VK Agarwar, BS Tyagi (1996)

Hal ini ditambah fakta bahwa ion organik bermuatan negatif di dalam sel tidak dapat keluar yang menyebabkan terjadinya peningkatan muatan negatif di sebelah dalam membran. Jika sebelah dalam menjadi lebih negatif dibandingkan dengan sebelah luar, keluarnya kalium akan terhambat. Akhirnya keadaan ion akan berubah dan keseimbangan akan tercapai lagi jika tidak ada sesuatu yang menghalangi perembesan ion-ion. Keadaan tetap ini dipelihara oleh pompa natrium (transpor aktif), yang secara aktif mengalirkan ion natrium dalam ke luar melawan suatu gradien konsentrasi dan gradien elektrokimiawi. Pompa natrium ini memerlukan energi yang diperoleh dari ATP yang berasal dari proses metabolisme dalam sel saraf.

Ion distribusi diferensial pada kedua sisi membran tersebut menghasilkan perbedaan potensial sebesar 60 sampai 90 milivolt, potensial membran rehat (diam) dengan sebelah dalam bermuatan negatif terhadap yang luar (Gambar 5.3).

Pada waktu terjadi rangsangan, ion natrium keluar disertai dengan masuknya ion kalium. Nampaknya, pada permukaan sel terjadi pertukaran kation yaitu masuknya satu ion kalium untuk satu ion natrium yang keluar (terjadi **depolarisasi**).

Permeabilitas membran terhadap ion yang relatif rendah itu sedemikian rupa, sehingga meskipun pompa itu diracun dengan sianida, beberapa jam akan berlalu sebelum gradien konsentrasi natrium dan kalium melalui membran itu hilang.

Meskipun pada potensial membran rehat yang normal, permeabilitas membran tersebut terhadap natrium sangat rendah tetapi permeabilitas meningkat bila potensial membran menurun. Hal ini memungkinkan merembesnya ion natrium melalui suatu gradien elektrokimiawi ke bagian dalam saraf. Perembesan ini akan menurunkan potensial membran lebih lanjut dan dengan demikian meningkatkan permeabilitas terhadap natrium. Jadi proses ini memperkuat diri sendiri dan bersifat progresif yang mengakibatkan pembelokan aksi potensial keatas. Ion natrium yang masuk menurunkan potensial transmembran sampai nol dan terus sampai mencapai -40 atau -50 milivolt. Setelah satu atau dua melidetik, permeabilitas natrium menurun dan kalium mulai keluar. Gerakan ini menyebabkan kembalinya potensial rehat, yaitu kepada repolarisasi, sehingga permeabilitas terhadap kalium menjadi normal dan kelebihan natrium dikeluarkan perlahan-lahan oleh pompa natrium.

Jumlah ion sebenarnya yang keluar masuk selama lewatnya aksi potensial adalah begitu kecil, sehingga perubahan konsentrasi kedua ion dalam serabut selama suatu impuls tidak dapat diketahui.

Jika kita memberi rangsang terhadap sebuah ujung dari saraf dengan rangsangan listrik yang berkekuatan mulai dari sangat lemah lalu dinaikkan secara bertahap, reaksinya sebagai berikut. Mula-mula tidak terjadi respons, tidak terjadi potensial kerja. Pada intensitas rangsangan tertentu terjadilah respons pada saraf yang disebut intensitas ambang (*threshold intensity*). Di atas intensitas ambang, respons akan tetap sama tidak terjadi potensial yang lebih tinggi. Keadaan ini disebut hukum ***all or none***.

Perubahan permeabilitas menyertai depolarisasi membran saraf, sehingga serabut tidak dapat dengan segera meneruskan impuls kedua. Periode ketidakpekaan kedua yang disebut **periode refraktor absolut** berlangsung pendek sampai hubungan permeabilitas normal tercapai kembali.

Jadi, suatu impuls saraf merupakan gelombang depolarisasi melalui serabut saraf. Perubahan potensial membran pada satu bagian menyebabkan bagian didekatnya lebih permeabel dan gelombang depolarisasi diteruskan melalui serabut. Seluruh daur depolarisasi dan repolarisasi hanya berlangsung beberapa milidetik (3/1000 detik).

Terdapat dua faktor yang memengaruhi kecepatan merambatnya suatu impuls, yaitu *selaput mielin* dan *diameter serabut saraf*. Seperti yang dikemukakan sebelumnya, selaput mielin pada akson mengandung lemak dan membungkus akson tidak secara kontinu, tetapi setiap interval 1 mm terdapat ruas (*node of ranvier*) yang tidak mempunyai mielin dan hanya mempunyai akson dan neurilemma. Pada akson yang mempunyai mielin, terjadi lompatan potensial kerja dari satu ruas ke ruas lainnya, sehingga kecepatan merambatnya lebih tinggi dibandingkan dengan akson yang tidak mempunyai mielin. Diameter serabut saraf juga memengaruhi kecepatan penghantaran impuls, semakin besar diameter serabut saraf semakin cepat merambatnya suatu impuls.

Akson yang berdiameter 160 mm merambatkan impuls lebih dari 45 m per detik atau 100 kali lebih cepat dari kecepatan impuls biasa pada serabut saraf. Ini terbukti pada beberapa hewan invertebrata yang mempunyai akson raksasa (*giant axon*) seperti cacing laut, beberapa jenis udang dan cumi, akson raksasa menyebabkan rambatan impuls menjadi cepat dan hal ini penting untuk respons penyelamatan dengan cepat.

## 2. Sistem Saraf

Sistem saraf secara garis besar dapat dibagi menjadi dua bagian.

1. Sistem saraf pusat (*central nervous system* = CNS) yang mencakup otak dan korda spinalis. Otak terletak di dalam bagain kranial tengkorak, Korda spinalis terletak di dalam kolom vertebral.
2. Sistem saraf perifer (*peripheral nervous system* = PMS) yang terdiri atas saraf kranial dan saraf spinal yang menuju ke struktur somatik (badan), serta saraf otonom yang menuju ke struktur vicerak (otot polos, otot jantung, dan kelenjar).

Saraf kranial: keluar melalui foramen kranial tengkorak

Saraf spinal: keluar melalui foramen invertebrak

Sistem saraf otonom (*autonomic nervous system* = ANS):

- sistem saraf simpatik, bagian torakolumbar; dan
- sistem saraf parasimpatik, bagian kraniosakral.

## B. Otak

Secara garis besar otak hewan dewasa dibagi dalam 3 bagian, yaitu otak muka, otak tengah, dan otak belakang. Otak muka terbagi dua yaitu telecephalon (terdiri atas pleksus koroid, pallium, bulbus olfaktorius, dan nukleus basal). Diencephalon terdiri atas talamus hipotalamus pleksus anterior dan epifisis. Otak belakang terdiri atas dua bagian, yaitu meencephalon (serebellum) dan myelencephalon (medula oblongata). Secara umum otak dibagi dalam 3 wilayah, yaitu serebrum,

serebelum, dan batang otak. Batang otak termasuk medula dan pons merupakan pusat untuk berbagai sistem kontrol yang penting, misalnya pengaturan respirasi dan tekanan darah.

Medula oblongata mempunyai fungsi sebagai pusat pengatur alat-alat visceral yang esensial seperti respirasi, sirkulasi jantung, kecepatan denyut jantung, derajat penyempitan pembuluh darah kapiler, sekresi saliva, dan proses menelan. Berbagai impuls yang datang dari sistem pernapasan dikoordinasikan dan dapat menghasilkan respons yang terkoordinasi berupa gerak ritmis. Neuron pada medula juga peka terhadap CO<sub>2</sub> pada darah yang sangat penting sebagai pusat pernapasan.

Daerah-daerah luas dari otak merupakan daerah penting untuk memproses beberapa informasi sensoris, seperti penglihatan dan bunyi. Rasa penciuman yang merupakan hal penting bagi hewan berhubungan dengan lobus olfaktori di otak.

Koordinasi gerakan berhubungan dengan serebelum meskipun daerah-daerah lain di otak juga terlibat, termasuk serebrum. Korteks serebrum kurang penting dibanding untuk manusia. Karnivor yang mempunyai pola tingkah laku kompleks mempunyai korteks serebrum lebih besar dibandingkan dengan herbivora. Serebrum mengandung wilayah besar yang disebut hipokampus yang penting untuk ingatan.

Serebelum terletak di bagian anterior dari medula yang merupakan bagian dari metencephalon. Fungsi utama sebagai pusat keseimbangan dan koordinasi motorik. Secara umum serebelum berfungsi untuk mengoordinasi impuls-impuls dari korteks dengan kontraksi otot. Serebelum sangat berkembang pada burung dan mamalia karena burung dan mamalia merupakan binatang yang aktif. Pada mamalia terdapat pons yang mempunyai nukleus yang dapat meneruskan impuls dari serebrum ke serebelum.

Otak tengah berasal dari mesecephalon. Bagian terbesar dari otak tengah pada sebagian besar vertebrata adalah lobus optikus yang merupakan pusat penglihatan pada vertebrata tingkat rendah. Pada vertebrata tingkat tinggi, pusat penglihatan berpindah ke talamus dan serebrum (*visual cortex*). Pada mamalia terdapat korpora quadrigemina (lobus optikus pada vertebrata rendah) yang mempunyai fungsi pada gerakan mata dan refleks pendengaran. Pada dasar otak tengah terdapat sebuah ganglion yang disebut *red nucleus*, berfungsi dalam pengontrolan gerak dan kedudukan terutama untuk mencegah kontraksi yang berlebihan.

### **1. Diencephalon**

Diencephalon merupakan bagian belakang otak muka yang mempunyai banyak bagian yang penting. Dinding dari bagian otak ini menebal dan membentuk talamus dan hipotalamus di bawahnya.

Talamus merupakan pusat integrasi sensorik pada vertebrata rendah untuk semua serabut saraf sensorik dari sumsum tulang belakang dan medula oblongata yang berakhir di bagian dorsal talamus kecuali untuk serabut pembau (*olfactorius tract*). Talamus menjadi sangat penting dengan berkembangnya pusat asosiasi pada serebrum vertebrata tinggi karena perkembangan korteks, sehingga bagian tertentu dari talamus menjadi tempat meneruskan impuls ke daerah sensorik pada korteks untuk diintegrasikan dan diasosiasikan.

Hipotalamus mengatur fungsi-fungsi yang penting seperti suhu tubuh, nafsu makan, lapar, dan tingkah laku seksual. Hipotalamus juga mengontrol sekresi hormon hipofisa sehingga mengatur banyak kelenjar endokrin. Hipotalamus merupakan pusat pengontrol fungsi emosi seperti marah, senang, dan gusar.

## **2. Telencephalon**

Evolusi dari otak vertebrata terjadi pada telencephalon. Pada mamalia telencephalon berkembang dengan membesarnya bagian serebral (*cerebral hemisphere*).

Pada ikan bagian ini berfungsi hanya untuk pembau (*olfactorius*), fungsi pembau masih tetap ada pada bagian otak vertebrata rendah yang disebut aekipallium dan paleopalium. Bagian belahan serebral yang paling luar berisi jutaan sel saraf dan berwarna kelabu disebut korteks serebral (*cerebral cortex*). Korteks serebral dibagi dalam daerah sensorik, daerah motorik, dan daerah asosiasi. Daerah sensorik menerima impuls dari berbagai reseptor. Daerah ini dibagi-bagi lagi berdasarkan reseptor-reseptor tertentu dan tiap bagian dari daerah sensorik menerima impuls dari reseptor tertentu.

Daerah motorik mengirimkan impuls ke otot kerangka melalui serabut saraf desendens pada sumsum tulang belakang. Daerah motorik mempunyai bagian-bagian yang dapat mengirimkan impuls ke efektor tertentu. Daerah asosiasi mempunyai fungsi untuk mengintegrasikan, mengkoordinasikan, dan menyimpan informasi sebelum memutuskan untuk mengirimkan ke daerah motorik.

Bagian otak sebelah frontal (*frontal lobes*) sangat berkembang pada manusia sebagai tempat memori, imajinasi, berfikir, dan intelegensia yang sangat penting dalam aspek tinggi dalam tingkah laku individu yang disebut kepribadian (*personality*).

Fungsi dari serebral korteks adalah sebagai tempat intelegensia dan aktivitas tingkat tinggi pada otak. Fungsi ini dapat dibuktikan melalui percobaan pada hewan yang bagian korteksnya dibuang (*dekorteksasi*). Anjing yang telah didekorteksasi mengalami tidak berfungsinya indera pembau, menjadi buta tetapi tidak dapat bergerak normal, dapat makan dan tidur secara teratur, menggonggong bila diganggu. Anjing tersebut

tidak mengenal pemiliknya, perhatian kepada lingkungan hilang. Tidak ada respons terhadap anjing lain meskipun dengan anjing lawan jenisnya. Tidak dapat dilatih meskipun latihan sederhana sekali, kemampuan belajar hilang sama sekali.

### 3. Korda Spinalis

Korda spinalis adalah kelanjutan arah kaudal dari medula oblongata. Korda spinalis menerima serabut sensoris atau serabut aferen melalui akar dorsal dari saraf spinal dan menyalurkan serabut motoris atau serabut eferen ke arah akar ventral dari saraf spinal.

## C. Sistem Saraf Somatik

Sistem saraf somatik adalah saraf yang berhubungan dengan kontrol otot kerangka. Refleks spinal sederhana mungkin terlibat, seperti yang diilustrasikan dari sebuah kaki sebagai sumber rangsangan sakit, tetapi banyak gerakan membutuhkan integrasi dan koordinasi oleh pusat-pusat saraf dalam otak. *Input* sensorik berasal dari berbagai sumber seperti mata dan ketegangan reseptor dari tendon.

Sel-sel tubuh dari sel saraf motorik somatik terletak dalam korda spinalis dan akson-aksonnya melewati otot kerangka tanpa intervensi sinaps. Zat-zat transmitter pada pertemuan neuromuskular adalah asetilkolin.

## D. Sistem Saraf Otonom

Peranan utama dari sistem saraf otonom adalah memelihara kestabilan lingkungan bagian dalam tubuh (homeostasis) terhadap perubahan-perubahan eksternal. Sebagai contoh, saraf otonom mengatur suhu tubuh, konsentrasi glukosa dalam darah, tekanan darah dan melalui kontrol kelenjar dan otot-otot saluran pencernaan, saraf otonom mengatur penyerapan zat-zat makanan.

Sistem saraf otonom secara anatomis dibedakan menjadi dua sistem, yaitu sistem saraf simpatis dan sistem saraf parasimpatis bergantung kepada tempat asal dari saraf preganglion (serabut saraf menuju ganglion) dan postganglion (serabut saraf yang keluar dari ganglion). Pada sistem saraf simpatis, sel tubuh saraf preganglion ditemukan pada pertengahan bagian torak dan lumbar spinal. Oleh karena itu, serabut preganglionnya pendek dan serabut posganglionnya panjang. Aksonnya meninggalkan akar ventral bersama dengan saraf motor somatik, tetapi seterusnya berpisah masuk ke dalam lintasan simpatetik yang berjalan paralel ke sumsum tulang belakang. Berlawanan dari akar ventral terdapat pembengkakan dalam lintasan dikenal sebagai ganglion. Kedua sistem ini merupakan sistem saraf eferen.

Kebanyakan organ tubuh diinervasi baik oleh saraf simpatis dan biasanya pengaruh rangsangan simpatis berlawanan dengan pengaruh yang ditimbulkan akibat impuls parasimpatis. Misalnya terhadap otot traktus digestivus saraf parasimpatis adalah menghambat peristalsis, sebaliknya impuls simpatis akan menyebabkan terjadinya peristalsis.

Fungsi sistem saraf simpatis umumnya digunakan ternak untuk mempersiapkan diri terhadap kondisi darurat. Aktivasi simpatis menyebabkan peningkatan *output* jantung dan tekanan darah, peningkatan konsentrasi glukosa dalam darah, dan perubahan-perubahan lain yang mempersiapkan ternak untuk kegiatan yang harus dilakukan segera.

Saraf parasimpatis berasal dari inti saraf-saraf kepala, terutama saraf vagus dan saraf-sarafa kedua, ketiga, dan keempat dari saraf sakrum. Tidak seperti simpatis, saraf parasimpatis membentuk sinaps dalam dinding alat pencernaan daripada dekat korda spinal.

Bila organ diinervasi oleh serabut saraf simpatis dan parasimpatis, dampak kedua saraf tersebut berlawanan. Jika saraf simpatis merangsang suatu organ, saraf parasimpatis menghambatnya (Tabel 5.1).

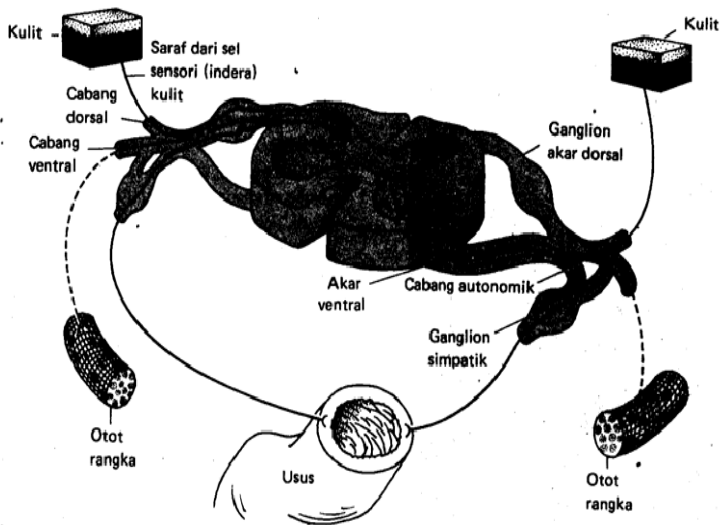
Tabel 5.1 Aktivitas dari sistem saraf autonom

Organ efektor	Simpatis	Parasimpatis
Kelenjar saliva	Sekresi mukus	Sekresi serosa
Kelenjar keringat	Sekresi	Tidak ada
Kelenjar alat pencernaan	Menghambat	Meningkatkan sekresi
Otot alat pencernaan	Menghambat motilitas Kontraksi sphincter	Meningkatkan motilitas Relaksasi sphincter
Otot paru-paru	Relaksasi	Kontraksi
Otot air kencing	Kontraksi sphincter	Relaksasi sphincter
Jantung	Meningkatkan denyut jantung	Menurunkan denyut jantung
Pembuluh darah	Vasokonstriksi	Vasodilatasi
Kelenjar medula adrenal	Sekresi	
Hati	Glygenolysis	
Jaringan lemak	Lipolisis	
Otot mata iris	Kontraksi otot radial	Kontraksi otot sirkular
Otot silier	Relaksasi	Kontraksi
Otot folikel rambut	kontraksi (ereksi) rambut	Tidak ada
Penis	Ejakulasi	Ereksi
Darah		
● Koagulasi	Meningkat	Tidak ada
● Glukosa	Meningkat	Tidak ada
● Lemak	Meningkat	Tidak ada

Tabel 5.1 memperlihatkan bahwa umumnya pengaruh yang ditimbulkan oleh sistem saraf simpatis menghasilkan kesiapan tubuh untuk merespons keadaan stres seperti pupil mata bertambah besar,

jantung bertambah cepat denyutnya, sfinkter anus dan kantung seni bertambah besar, rambut berdiri, dan keringat keluar. Sebaliknya sistem saraf parasimpatis berperan dalam mengatur kegiatan yang mempunyai hubungan dengan penghematan energi, seperti memperlambat denyut jantung, menurunkan tekanan darah, dan mempercepat gerakan-gerakan usus, serta sekresi kelenjar.

Sistem saraf otonom sangat penting untuk tubuh dan menyebabkan lingkungan internal menjadi konstan untuk keaktifan dan homeostasis dari organisme. Sistem saraf otonom termasuk saraf tepi, yaitu saraf yang ke luar dari sumsum tulang belakang dan dari otak.



Gambar 5.4 Skema hubungan sistem saraf spinal dan sistem saraf simpatis

## **E. Integrasi Kontrol Saraf dan Endokrin: Sistem Hipotalamus-Hipofisa pada Vertebrata**

Secara fungsional, sistem saraf pusat pada hewan vertebrata juga ternak memengaruhi berbagai kelenjar endokrin yang selanjutnya

kelenjar endokrin dapat mengontrol kembali sistem saraf. Sistem hipotalamus dan hipofisa merupakan suatu contoh struktur yang menciptakan hubungan erat antara sistem saraf dan sistem endokrin, baik secara morfologi maupun fungsional. Pengertian sistem untuk menyatakan kedua organ dibentuk dari berbagai unsur yang berinteraksi secara dinamis, terorganisir untuk tujuan bersama (umum). Istilah lain yang sering dipakai berbagai penulis adalah “Kompleks”, “Unit”, “Axe”, atau “Poros” yang sebenarnya mempunyai pengertian sama.

Hipofisa dialiri oleh arteriol aferen, seperti pada berbagai jaringan organisme, tetapi hipofisa juga menerima jaringan pembuluh vena yang berasal dari hipotalamus (lihat bagian otak Bab Endokrin). Suatu keadaan yang dinamakan “jaringan pintu vaskuler”: suatu situasi yang dianalogikan dengan jaringan pembuluh vena yang mengalir saluran pencernaan sebelum masuk ke jaringan hati. Vaskularisasi pintu hipofisa menyebabkan berbagai zat/substansi kimia yang berasal dari hipotalamus menyebar ke sekeliling sel-sel adenohipofisa.

Hipotalamus merupakan struktur neuroendokrin, di mana sel-sel saraf hipotalamus menghasilkan neurohormon (*releasing hormone/releasing factor*) yang berperan untuk mengatur sekresi hormon kelenjar hipofisa. **Pertama**, neurohormon yang dihasilkan oleh sel-sel saraf khusus pada hipotalamus (nukleus) tidak langsung melepaskan hormon ke dalam darah, tetapi diangkut melalui akson. **Kedua**, sel-sel neurosekresi yang menghasilkan hormon vasopressin dan oksitoksin melalui aksonnya kedua hormon disalurkan dan disimpan pada hipofisisa belakang (posterior). Sementara untuk hormon pelepas (*releasing hormone*), sel-sel neurosekresi mengangkutnya terlebih dahulu melalui akson ke sistem pembuluh porta hipotalamus-hipofisa.

Sebagai ilustrasi, yang menggambarkan hubungan erat antara hipotalamus dan hipofisa adalah pengaturan neuroendokrin terhadap kontrol keluarnya air susu. Secara singkat dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Penghisapan puting susu merangsang ujung saraf lokal dan impuls saraf dikirim ke sistem saraf pusat.
2. Setelah melewati berbagai artikulasi sinaps, aksi potensial terjadi pada berbagai daerah tertentu pada hipotalamus.
3. Aksi potensial ini akan merangsang saraf-saraf yang mensekresikan hormon oksitosin yang dijabarkan oleh pelepasan oksitosin oleh sel saraf terminal ke hipofisa posterior.
4. Aksi potensial lain akan merangsang saraf-saraf hipotalamus, di mana ujung sel-sel saraf berakhir di dekat jaringan pembuluh hipofisa dan melepaskan neurohormon menuju hipofisa anterior.
5. Oksitosin melewati sirkulasi umum dan mencapai sel-sel mioepitelium yang berkontraksi, menyebabkan keluarnya air susu yang mengisi saluran galaktofor.
6. Dalam waktu yang bersamaan, sel-sel hipofisa anterior dirangsang dan melepaskan prolaktin ke sirkulasi umum. Prolaktin akan merangsang fungsi kelenjar susu.

Contoh terakhir ini merupakan satu respons terpadu organisme yang memperlihatkan ketepatan dan kerja sama dari banyak mekanisme yang dapat diambil untuk melakukan suatu refleks harmonis.

Rangsangan awal merupakan kode tekanan yang berhubungan dengan penghisapan puting yang menggerakkan ion-ion membran. Hal ini akan memengaruhi polaritas membran pada daerah tetangga dan menginduksi suatu sinyal saraf yang menyebar sampai ke interneuron sumsum tulang belakang.

Sinyal awal (tekanan) tidak hanya dikenal pada tingkat transfer informasi, tetapi juga gangguan aliran  $\text{Na}^+$  dan  $\text{K}^+$  antara kedua sisi permukaan membran. Pelepasan neurotransmitter yang kontak pertama dengan saraf menyebabkan perubahan pesan, tranmitter akan mengerti jika sel saraf pos-sinap mempunyai reseptor spesifik. Pemindahan informasi oleh neurotranmitter antara tempat terjadi beberapa kali sebelum sampai di hipotalamus. Ketepatan artikulasi sinaptik mencegah bahwa pesan tidak menjadi salah (menyimpang) pada waktu transit. Proses fisiologis pada berbagai sel secara detail bisa berupa:

1. penyesuaian metabolisme energi sel yang berkaitan dengan penyampaian pesan di mana ada pelepasan hormone;
2. keragaman konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$ ; dan
3. interaksi protein bergerak yang dapat menekan keluar granula-granula sekresi atau kontraksi sel-sel mioepitel.

Semua ini menggambarkan keterpaduan yang baik dan harmonis fungsi-fungsi organ pada suatu organisme.

## F. Organ Sensor

Informasi tentang lingkungan internal dan eksternal ditangkap oleh sistem saraf pusat dari berbagai organ sensor. Organ sensor ini mengandung berbagai sel reseptor yang menerjemahkan berbagai bentuk energi pada lingkungan menjadi aksi potensial dalam saraf sensor. Bentuk-bentuk energi yang diambil oleh reseptor reseptor, termasuk energi mekanik (tekanan dan rabaan), *thermal* (panas dan dingin), elektromagnetik (cahaya), dan kimia (bau, rasa, kandungan  $\text{CO}_2$  dalam darah). Reseptor-reseptor suatu organ spesifik diadaptasikan untuk merespons salah satu bentuk energi pada tingkat nilai ambang yang lebih rendah dibandingkan dengan reseptor organ indera lainnya.

Ternak menerima banyak informasi yang dideteksi oleh organ

khusus, seperti telinga dan mata. Namun demikian, tidak semua informasi bekerja pada tingkat tidak sadar (pingsan). Pada musim gugur, domba bereaksi terhadap memendeknya periode cahaya terang dengan memulai proses berahi. Peristiwa kompleks hormonal yang terlibat dimulai pada level otak lebih rendah dibandingkan dengan otak yang berhubungan dengan pingsan. Hal yang sama, reseptor yang mendeteksi level CO<sub>2</sub> dalam darah hanya melaporkan ke pusat otak yang berhubungan dengan kontrol respirasi dan tekanan darah.

## **G. Reseptor**

Berdasarkan kemampuannya merubah pacuan menjadi impuls, reseptor dibedakan atas mekanoreseptor, komreseptor, termoreseptor, dan radio elektromagnetik reseptor.

1. Mekanoreseptor. Berdasarkan fungsinya kita mengenal reseptor sebagai berikut.
  - Reseptor rabaan dan tekanan, terdapat pada bibir atas, alat genital luar, mesentrium submukosa lidah, dan mulut.
  - Reseptor kinestetik, terdapat pada artikulasi kapsul, di mana fungsinya mendeteksi posisi dari beberapa bagian tubuh.
  - Reseptor gelombang suara, terdapat di dalam cochlea.
  - Reseptor perubahan keseimbangan, terdapat pada macula canalis semicircularis.
  - Reseptor yang mendeteksi regangan otot, yakni *muscle spindle*.
  - Proprioreseptor yang terdapat di jantung dan paru-paru.
2. Termoreseptor dibagi dalam reseptor panas dan dingin.
3. Kemoreseptor termasuk ke dalam golongan ini adalah:
  - gemma gustatoria yang terdapat di daerah mulut, menerima rangsangan kimia asal makanan;

- sel olfaktori di daerah hidung, menerima rangsangan dalam bentuk gas; dan
  - kemoreseptor yang terdapat pada arteri karotis dan arteri karotikus, menerima rangsangan kimia berupa perubahan konsentrasi oksigen darah.
4. Elektromagnetik reseptor antara lain reseptor yang terdapat di dalam mata yang menerima rangsangan berupa cahaya atau sinar.
- Berdasarkan lokasi reseptor, secara fisiologi reseptor dibagi menjadi 2 kelompok.
- Eksteroseptor, yakni reseptor yang menerima pacu dari luar atau sekitar tubuh. Reseptor yang termasuk adalah reseptor yang terdapat di kulit, telinga dalam, dan di dalam mata.
  - Interoreseptor, yakni yang menerima pacu dari dalam tubuh sendiri. Reseptor yang termasuk adalah proprioseptor yang terdapat pada otot, tendon, artikulasi dan alat vestibularis, visceroreseptor.

## Ringkasan

1. Sistem saraf merupakan suatu infrastruktur seluler yang sangat sempurna, hubungan bercabang yang menghasilkan kerja dengan ketepatan tinggi dan sangat cepat. Sistem saraf mengoordinasikan semua aktivitas tubuh baik pada tingkat sel maupun organ.
2. Sel saraf (neuron) adalah unit fungsional dan struktur sistem saraf yang terdiri atas dendrit, akson, badan sel, dan telodendrium.
3. Berdasarkan fungsional bagian sel saraf dibagi menjadi 3 daerah, yaitu daerah generator, konduktif dan transmisi, sedangkan berdasarkan fungsinya sel saraf menjadi neuron sensorik, motorik, dan interneuron.
4. Rangsangan yang diterima sel saraf sensorik merambat dalam bentuk impuls. Impuls terjadi karena adanya depolarisasi ion pada

kedua sisi membran sel saraf yang merambat sepanjang serabut saraf. Impuls dapat merambat dari sel saraf yang satu ke yang lainnya karena adanya sinaps.

5. Pemindahan impuls pada sinaps karena adanya zat transmitter yang dikeluarkan oleh ujung saraf.
6. Sistem saraf pusat mempunyai peranan penting dalam mengatur, mengontrol, dan mengendalikan semua aktivitas tubuh, misalnya komponen-komponen yang menyusun otak merupakan pusat untuk berbagai kontrol yang penting.
7. Pemeliharaan kestabilan lingkungan bagian dalam tubuh terhadap perubahan lingkungan eksternal dilakukan oleh sistem saraf otonom. Sistem saraf otonom terbagi menjadi dua, yaitu sistem saraf simpatis dan sistem parasimpatis yang mempunyai fungsi umumnya berlawanan.
8. Sistem hipotalamus-hipofisa merupakan gambaran yang menjelaskan hubungan yang erat antara sistem saraf dan sistem endokrin dalam pengaturan terpadu berbagai aktivitas yang terjadi dalam tubuh organisme.
9. Organ sensor berperan penting dalam menerima berbagai rangsangan yang berasal dari lingkungan eksternal dan menyampaikan ke sistem saraf pusat untuk diproses dan diterjemahkan dalam bentuk aktivitas atau tindakan lainnya.
10. Berbagai sel reseptor melengkapi organ sensor untuk lebih berfungsi pada organ sensor dan membantu sistem saraf pusat dalam mengantisipasi perubahan-perubahan lingkungan luar.

## **Latihan**

1. Apa perbedaan sistem kontrol oleh saraf dengan sistem kontrol oleh hormonal?
2. Jelaskan dan sebutkan bagian-bagian dari sel saraf (neuron)!

3. Jelaskan perbedaan antara sistem saraf simpatetik dan parasimpatetik!
4. Jelaskan mekanisme terjadinya penyebaran impuls pada pembuluh saraf!
5. Jika daerah serebelum dan hipotalamus seekor ternak dirusak/dihilangkan, apa dampaknya terhadap kelangsungan hidup ternak tersebut? Jelaskan!
6. Jelaskan keterpaduan aktivitas kerja dari saraf dan aktivitas kerja hormon terhadap suatu proses fisiologis!
7. Jelaskan dan sebutkan jenis-jenis organ sensor!
8. Apa kegunaan praktis mempelajari organ sensor dalam peningkatan produktivitas ternak?

# BAB VI

## FISIOLOGI RESPIRASI

Respirasi adalah proses umum di mana organisme mengambil energi bebas dalam lingkungannya dengan mengoksidasi substrat organik. Untuk mencapai hasil tersebut, organisme tingkat tinggi memakan berbagai bahan makanan dan mengubah menjadi molekul sederhana. Caranya melalui proses pencernaan dan molekul yang terbentuk dalam sel-sel yang mengalami oksidasi dengan bantuan sejumlah molekul oksigen yang berasal dari sistem pernapasan. Produk dari oksidasi ( $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ ) dikeluarkan oleh sel ke dalam lingkungannya.

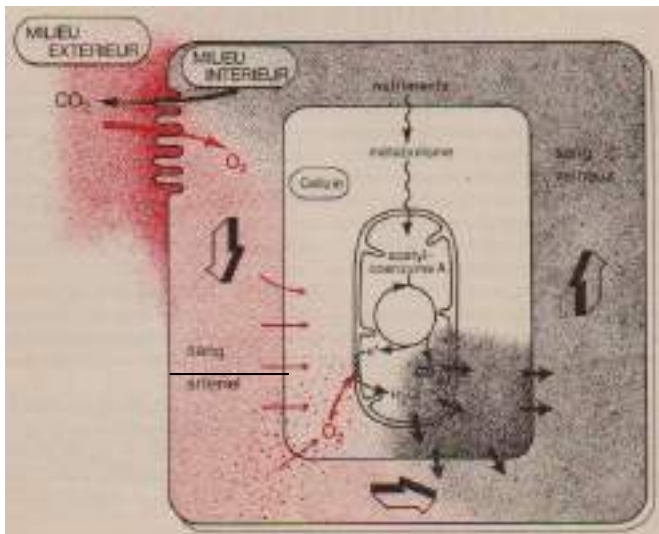
Respirasi eksternal merupakan pertukaran gas antara jaringan metabolis dengan udara atmosfer, sedangkan respirasi internal terjadi dalam sel di mana oksigen digunakan sebagai suatu penerima elektron.

Untuk satu organisme, respirasi merupakan fungsi fisiologis yang menjamin proses-proses oksidasi, baik pada tingkat mitokondria (tingkat pertukaran sel dengan lingkungan internal) maupun tingkat pertukaran organisme dengan lingkungan eksternal.

Ketersediaan oksigen secara permanen merupakan faktor yang sangat penting bagi sebagian besar sel-sel hewan. Hal tersebut disebabkan metabolisme anaerobik sangat jarang terjadi pada tubuh hewan dalam menghadapi masalah penyediaan energi kimia dan tidak ada sistem cadangan yang dapat menyimpan lebih lama oksigen seperti pada sistem cadangan energi zat makanan.

Oksigen selalu dipertukarkan melalui difusi sederhana, antara berbagai kompartimen organisme. Tidak ada sistem transpor aktif atau yang memudahkan untuk molekul gas. Hanya perbedaan konsentrasi yang mengatur pergerakan molekul  $\text{O}_2$  suatu kompartimen menuju

kompartimen lainnya. Pada respirasi mitokondria, berkurangnya oksigen pada sitoplasma suatu sel menyebabkan suatu panggilan kebutuhan akan  $O_2$  berasal dari sel perifer yang terdapat di lingkungan eksternal atau cairan dari lingkungan internal (Gambar 6.1). Dengan cara sama, konsentrasi sangat rendah oksigen terlarut dalam darah vena (jaringan sel pada invertebrata) yang merupakan satu-satunya motor penggerak pengambilan  $O_2$  pada tingkat membran pernapasan paru-paru.



Gambar 6.1 Skema garis besar pertukaran oksigen dan karbon dioksida pada hewan yang mempunyai sistem sirkulasi dengan lingkungan eksternal ; Sumber: Rieutort M (1986)

Kebutuhan  $O_2$  suatu organisme dikendalikan oleh aktivitas mitokondria, di mana sel-sel yang sedang aktif mengonsumsi banyak ATP dan respirasinya mempercepat untuk memelihara cadangan ATP (Gambar 6.1). Untuk organisme ukuran kecil, jarak difusi tetap rendah dan perbandingan luas permukaan pertukaran atau volume sangat

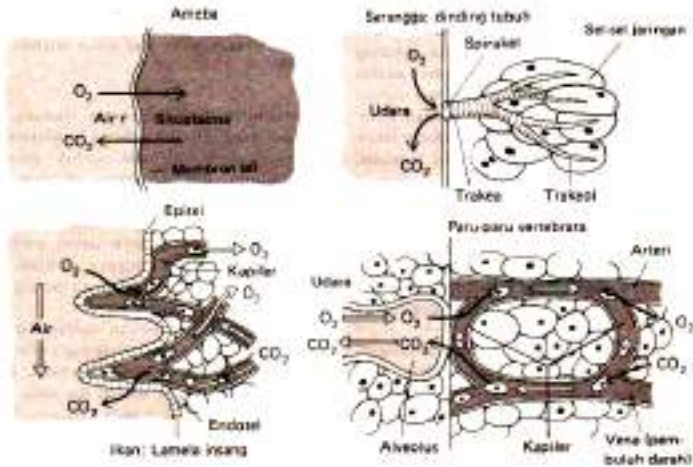
penting. Ketika ukuran meningkat, sistem sirkulasi dapat mengurangi jarak difusi oleh transpor gas, mulai daerah konsentrasi tinggi sampai dengan konsentrasi rendah.

## **A. Struktur Organ Respirasi**

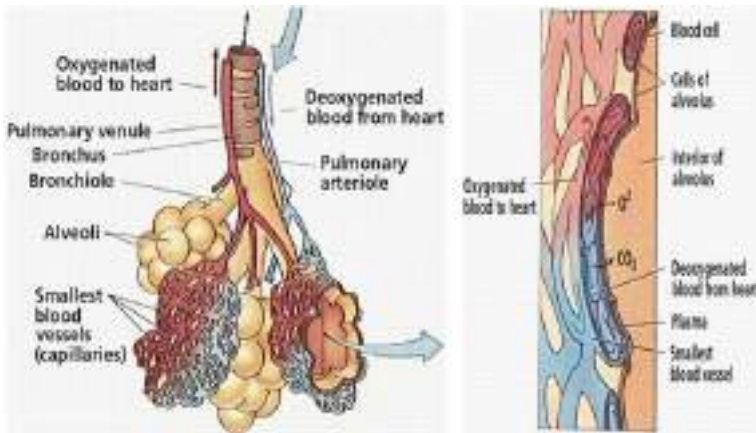
Untuk terjadinya pertukaran gas pada suatu organisme diperlukan persyaratan: (1) organisme tersebut harus mempunyai membran pernapasan, (2) mempunyai cara untuk menyalurkan gas ke dan dari membran pernapasan (ventilasi permukaan), dan (3) mempunyai cara untuk mengangkut gas antara membran dan sel-sel tubuh (sistem transpor).

**Membran pernapasan** yaitu suatu permukaan yang tipis, basah, dan permeabel, berhubungan dengan lingkungan yang dapat dilalui gas. Membran tersebut dapat berupa permukaan tubuh, tetapi lazimnya membran ini terbatas pada suatu bagian alat pernapasan, seperti lamela insang, ujung saluran trakhea atau alveolus paru-paru (Gambar 6.2).

Pemindahan gas melalui permukaan membran pernapasan masuk dan keluar sel tubuh selalu dengan cara **difusi**. Oksigen digunakan oleh sel-sel, sehingga kadar dalam sel dan tubuh akan selalu lebih rendah daripada lingkungannya, baik dalam air maupun di udara tempat hewan itu hidup. Sebaliknya sel-sel itu memproduksi karbon dioksida karena itu dalam sel dan tubuh gas selalu terdapat dalam jumlah yang lebih besar daripada medium sekitarnya. Alat pernapasan pada mamalia adalah paru-paru, sedangkan pada ikan adalah insang.



Gambar 6.2 Diagram beberapa jenis alat pernapasan yang terdapat pada hewan ; Sumber: CA Vilee, WF Walker, Jr dan RD Barnes (1984)



Gambar 6.3 Pertukaran darah yang miskin oksigen dengan darah yang kaya oksigen

## B. Prinsip Umum Respirasi

Prinsip respirasi adalah pertukaran gas  $O_2$  dan  $CO_2$  secara pasif bergerak melintas epitel atau membran respirasi secara difusi. Tingkat

difusi O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> melalui membran pernapasan dan jaringan biologis dikontrol oleh faktor fisika-kimiawi.

Menurut hukum Ficks difusi (bab pendahuluan): jumlah (massa) gas yang berdifusi dari suatu daerah ke daerah lain adalah:

$$Mx = \frac{D_x \cdot A (C_{eks} - C_{int})}{L}$$

di mana:

- Mx = Massa gas yang bergerak melintasi epitel respirasi
- D<sub>x</sub> = Koefisien difusi (Air = 3,4; Udara 11; Eritrosit 1,3)
- A = Luas permukaan difusi
- L = Jarak difusi (ketebalan membran difusi)
- (C<sub>eks</sub> - C<sub>int</sub>) = Perbedaan kadar gas antara dua sisi dari epitel atau membran pernapasan

Kecepatan Bergeraknya gas per satuan waktu (M/detik) dipengaruhi oleh oleh A, L, dan (C<sub>eks</sub> - C<sub>int</sub>). Sebagai contoh, semakin tinggi luas permukaan difusi, semakin banyak molekul gas yang berdifusi. Secara lebih lengkap, faktor yang memengaruhi difusi gas melintasi epitel atau membran pernapasan adalah sebagai berikut.

### 1. Tekanan Parsial Gas

Gas akan bergerak dari daerah gas bertekanan tinggi ke gas bertekanan rendah. **Tekanan parsial (P) gas** adalah tekanan total campuran gas x % gas dalam campuran. Misalnya, PO<sub>2</sub> udara kering pada permukaan laut adalah 0,21 x 760 mm Hg = 159,6 mm HG, sedangkan P CO<sub>2</sub> adalah 0,0004 x 760 = 0,3 mm Hg. Semakin tinggi PO<sub>2</sub> dalam darah, semakin banyak O<sub>2</sub> yang ada dalam darah dan semakin banyak O<sub>2</sub> yang tersedia bagi sel. Pada ternak yang mempunyai paru-paru, adanya perbedaan tekanan O<sub>2</sub> di udara alveolus dan di dalam darah kapiler paru-paru sudah cukup untuk menggerakkan O<sub>2</sub> dari udara alveolus ke kapiler paru-paru. CO<sub>2</sub> akan bergerak ke arah berlawanan dengan pergerakan O<sub>2</sub> dengan alasan yang sama (Tabel 6.1).

## 2. Permeabilitas Epitel atau Membran Pernapasan

Terdapat dua membran yang sangat tipis memisahkan udara di alveolus dengan darah di kapiler paru-paru, yaitu epitel paru dan endotelium kapiler paru-paru. Gas respirasi (O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>) harus mampu menembus membran-membran tersebut dengan gaya dorong yang besarnya dipengaruhi perbedaan tekanan O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> di udara alveolus dengan darah di kapiler paru-paru. Membran respirasi juga menimbulkan tekanan terhadap pergerakan O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>. Tekanan membran dinyatakan dengan koefisien difusi atau kapasitas difusi yang didefinisikan sebagai jumlah gas yang menembus melintasi membran per menit per mm perbedaan tekanan gas antara dua sisi membran.

$$Dx = \frac{VO_2}{P_1 - P_2}$$

di mana:

- Dk = Koefisien difusi untuk O<sub>2</sub> (ml/menit/mm Hg)
- VO<sub>2</sub> = Jumlah O<sub>2</sub> yang berdifusi ke darah kapiler paru-paru per menit (ml / menit)
- P<sub>1</sub> = Tekanan parsial O<sub>2</sub> di udara alveolus
- P<sub>2</sub> = Tekanan parsial O<sub>2</sub> di darah kapiler paru-paru

Tabel 6.1 Tekanan parsial pada udara atmosfer, udara alveolus, dan darah kapiler paru-paru

Gas	Udara atmosfer		Udara alveolus		Darah arteri	Darah vena
	%	mm Hg	%	mm Hg	mm Hg	mm Hg
O <sub>2</sub>	20,94	159,1	14,2	101	100	40
CO <sub>2</sub>	0,04	0,3	5,5	39	40	46
H <sub>2</sub>	79,02	600,6	80,3	573	573	573
Jumlah	100,00	760,0	100	713	713	659

## 3. Luas Permukaan Epitel/Membran Pernapasan

Pada variabel lain luas permukaan epitel tetap, semakin luas permukaan membran semakin meningkat difusi gas.

#### **4. Kecepatan Sirkulasi Darah Paru-paru**

Bila kecepatan aliran darah meningkat di kapiler paru-paru, setiap ml darah yang meninggalkan kapiler paru-paru akan mengandung lebih sedikit O<sub>2</sub>.

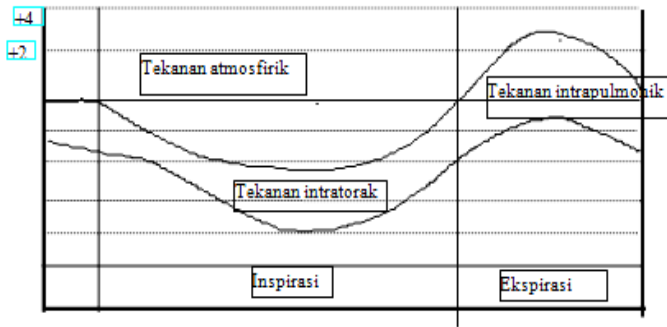
#### **5. Reaksi Kimia yang Terjadi di dalam Darah**

Adanya ikatan hemoglobin dengan O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> menyebabkan lebih banyak O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> yang mampu diangkut dibandingkan dengan jumlah O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> yang larut dalam plasma. Kecepatan dan efisiensi reaksi kimia yang terjadi dalam darah akan menentukan jumlah O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> yang ditransfer antara darah dan udara alveolus.

#### **C. Mekanisme Bernapas**

Fungsi utama sistem pernapasan menggerakkan oksigen dari udara luar ke paru-paru dan menggerakkan karbon dioksida pada arah yang berlawanan. Respirasi melibatkan transpor oksigen dari paru-paru ke arah dan dari darah ke jaringan. Karbon dioksida bergerak dengan arah yang berlawanan.

Setelah lewat melalui saluran hidung dan laring, di mana udara menjadi hangat dan mengisap uap air, udara inspirasi masuk ke dalam trakea, ke bronkiol, dan saluran alveol ke alveolus. Alveol dikelilingi oleh kapiler pulmonari dan lapisan jaringan antara udara dan jarak kapiler sangat tipis. Luas permukaan dinding alveol yang kontak dengan kapiler-kapiler sangat besar pada sapi (sekitar 500 m<sup>2</sup>). Paru-paru terletak di dalam rongga dada dan strukturnya sangat elastis. Paru-paru ditutup oleh jaringan zat-zat licin yang dikenal sebagai "Pleura visceral". Dinding dada dibatasi oleh membran yang dikenal sebagai "Pleura parietal". Secara normal kedua lapisan ini tertutup satu sama lain.



Gambar 6.4 Perubahan tekanan intrapulmo dan intratorak selama proses respirasi

Inspirasi adalah proses aktif yang disebabkan oleh kontraksi otot-otot inspirasi, otot inspirasi penting adalah diafragma yang melekat pada tepi kaudal di daerah toraks. Bila relaksasi diafragma berbentuk kubah ke dalam toraks, serabut otot berkontraksi dan diafragma mengembang ke luar sehingga terjadi peningkatan volume toraks. Jika tulang iga meningkat, diameter toraks akan meningkat. Gerakan ini bergantung pada otot-otot interkostal, internal, dan eksternal. Pada manusia, waktu inspirasi diafragma turun 1–5 cm yang menyebabkan rongga dada bertambah dan terjadi perbedaan tekanan lebih besar antara udara luar dan rongga intratorak.

Selama bernapas tenang, tekanan intrapleura di mana pada awal inspirasi sekitar -2,5 mmHg, menurun sekitar -6 mmHg dan paru-paru mengembang. Selama ekspirasi tekanan intrapleura kembali tingkat asal (Gambar 6.4).

Pada akhir ekspirasi, bila tidak terjadi gerakan udara, tekanan pada bronki sama dengan tekanan atmosfer. Tekanan intratorak bertambah karena diafragma dan tulang rusuk kembali pada kedudukan semula. Hal ini menyebabkan udara di paru-paru didorong keluar karena tekanan intratoraks bertambah dan elastisitas paru-paru itu sendiri. Pada saat otot-otot

inspirasi rileks volume torak menurun, jumlah udara dalam paru-paru tetap sama karena tekanan intrapulmonari meningkat di atas tekanan udara luar darah mengalir dari paru-paru ke eksternal sampai tekanannya sama lagi.

## D. Volume dan Frekuensi Respirasi

Sebelum mencapai alveoli udara harus lewat melalui hidung atau mulut, paring, laring, trakea, bronki, dan bronkiol. Udara yang menempati bagian lain sistem pernapasan yang tidak digunakan untuk pertukaran dengan kapiler darah paru-paru diketahui sebagai **ruang rugi** (*dead space*).

Volume udara yang lewat ke dalam atau ke luar hidung dan mulut selama inspirasi dan ekspirasi dikenal sebagai volume tidal. Pada kuda sekitar 5–6 liter, pada sapi 3–4 liter, pada kambing dan domba 300 ml. Volume ruang rugi diperkirakan 1/3–1/4 dari **volume tidal**. Volume udara yang mencapai alveoli dan yang tersedia untuk pertukaran gas bergantung pada volume tidal, ruang rugi, dan frekuensi pernapasan.

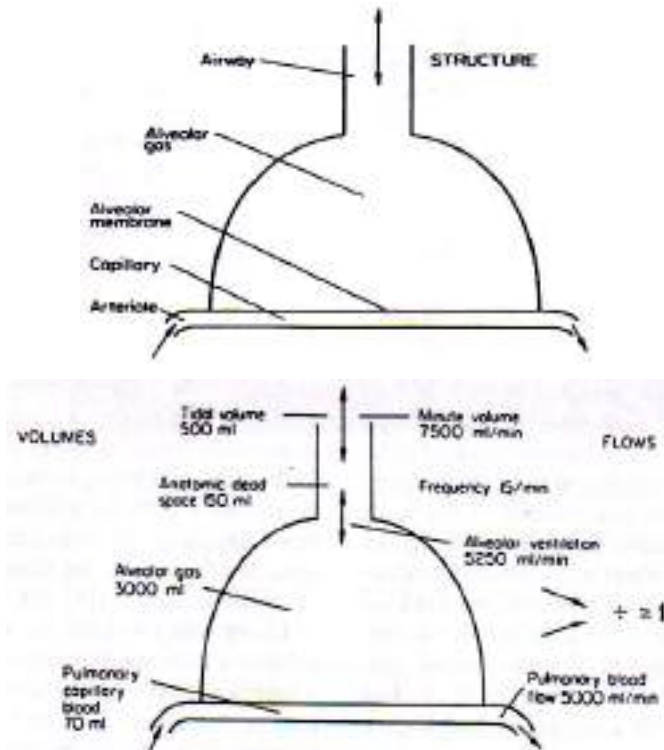
$$\text{Ventilasi Alveol} = (\text{volume tidal} - \text{dead space}) \times \text{frekuensi}$$

Seperti terlihat pada Tabel 6.2, peningkatan frekuensi respirasi bukan cara terbaik untuk memperbaiki ventilasi alveol. Dengan kata lain, ini membuat tubuh banyak kerja untuk mengembangkan paru-paru untuk mendapat volume tidal yang besar.

Berbagai volume udara lain sering digunakan untuk membahas respirasi (Tabel 6.2 dan 6.3), misalnya pada akhir inspirasi tenang, jumlah tambahan dari udara yang dapat diinspirasi dan melebihi volume tidal disebut **volume cadangan inspirasi**. Sementara pada akhir ekspirasi tenang, jumlah tambahan udara yang dapat diekspirasi adalah **volume cadangan ekspirasi**. Udara yang tersisa dalam paru-paru setelah ekspirasi maksimal disebut volume residu. **Kapasitas vital** (*vital capacity*) adalah gabungan volume cadangan inspirasi, volume tidal, dan volume cadangan ekspirasi atau jumlah udara yang paling banyak yang

dapat diekspirasi setelah inspirasi maksimal. Bagian kapasitas vital yang diekspirasi dalam satu detik disebut **volume ekspirasi kuat dalam satu detik** (*timed vital capacity*). Jumlah udara yang diinspirasi per menit (*respiratory minute volume*) untuk manusia dalam keadaan normal kira-kira 6 liter per menit (500 ml/sekali napas x 12 pernapasan/menit) (Gambar 6.5).

**Maximal voluntary ventilation (MVV)** adalah volume garis terbesar yang dapat masuk dan keluar paru-paru dalam satu menit oleh usaha yang disengaja. MVV normal pada manusia adalah 122–170 liter/menit.



Gambar 6.5 Volume paru-paru dan beberapa pengukuran yang berhubungan dengan mekanisme pernapasan ; Sumber: Burggren W dan Robert JL (1991)

Tabel 6.2 Pengaruh berbagai tingkat respirasi terhadap ventilasi alveol pada anjing dengan *dead space* 100 ml

Volume tidal (ml)	200	500
<i>Dead space</i> (ml)	100	100
Frekuensi	25	40
Ventilasi pulmonori (lt/menit)	5	5
Ventilasi alveol ( lt/menit)	2,5	4

Tabel 6.3 Volume udara pada paru-paru berbagai jenis ternak (liter)

Ternak	Frekuensi Pernapasan per Menit	Volume Tidal	Volume Cadangan Inspirasi	Volume Cadangan Ekspirasi	Kapasitas Vital	Volume Residu
Kuda	12	5–6	12	12,0	30,0	10–12
Sapi	30	3–4	6	6,0	16,0	5–6
Domba	19	0,3	0,6	0,6	1,5	0,5
Manusia	15	0,5	1,5	1,5	3,5	1,0

### 1. Pertukaran Oksigen dan Karbon Dioksida antara Udara dan Darah

Komposisi udara atmosfer adalah konstan 20,93% oksigen, 0,03% CO<sub>2</sub>, dan 79,04% nitrogen. Udara inspirasi mempunyai komposisi yang sama, sedangkan udara alveol mengandung kurang oksigen dan banyak karbon dioksida. Jumlah nitrogen tidak berubah secara alamiah. Udara ekspirasi adalah bagian dari alveol dan sebagian dari *dead space*, di mana tidak ada pertukaran gas terjadi. Oleh karena itu komposisi di antara udara alveol dan udara inspirasi dapat dilihat pada Tabel 6.4.

Tabel 6.4 Kandungan O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> pada udara inspirasi, ekspirasi, dan alveoli, serta tekanan parsial di permukaan laut untuk udara jenuh dengan uap air (tekanan uap 47 mmHg)

	Oksigen (Vol %)	PO <sub>2</sub> (mm Hg)	Karbon dioksida (vol %)	PCO <sub>2</sub> (mm Hg)
Udara inspirasi	20,9	149	0,03	0,21
Udara ekspirasi	16,3	116	4,0	29
Udara alveol	14,0	100	5,6	40

Pertukaran gas melewati membran alveol diatur oleh dua hukum fisika. Jumlah gas yang larut dalam cairan adalah proporsional terhadap tekanan parsial gas (Hukum Henry). Gas secara individu dilarutkan dalam suatu cairan yang tidak bergantung terhadap gas lainnya (Hukum Dalton).

Gas-gas diabsorpsi secara langsung ke dalam plasma darah, tetapi karena kelarutannya rendah hanya sebagian kecil yang dibawa ke dalam cairan fisik dalam cairan. Banyak oksigen yang dibawa sebagai oksihemoglobin pada eritrosit (sel darah merah) dan banyak CO<sub>2</sub> dibawa dalam bentuk ion karbonat atau kombinasi dengan hemoglobin sebagai karbamino-haemoglobin. Satu mmol hemoglobin dapat mengikat 86 ml oksigen. 1 liter darah yang dioksigenasi mengandung sekitar 200 ml oksigen karena darah mengandung sekitar 2,3 mmol hemoglobin per liter. Darah meninggalkan kapiler paru-paru sekitar 97% jenuh dengan oksigen dan darah kembali dari tubuh ke paru-paru kejenuhannya sekitar 75%. Jadi jumlah oksigen yang diambil oleh jaringan adalah:

$$[(97-75)/100] \times 200 \text{ mml/liter darah} = 45 \text{ ml/liter.}$$

Nilai ini harus dikalikan dengan *output* jantung untuk mengetahui jumlah oksigen yang didistribusikan dan dibagikan ke jaringan setiap menit.

Pada sapi Yersey dengan *output* jantung 30 liter per menit, konsumsi oksigen dari jaringan akan mencapai 1.350 ml per menit. Jumlah oksigen yang dapat dibawa oleh hemoglobin menurun dengan adanya karbon dioksida, peningkatan keasaman, temperatur tinggi, dan peningkatan konsentrasi fosfat organik dalam sel darah merah.

Plasma darah mamalia mengikat 3 ml oksigen dalam bentuk zat terlarut, ketika ada dalam keseimbangan dengan 1 atmosfer di mana PO<sub>2</sub> adalah 12,6 kPa (PO<sub>2</sub> alveol). Nilai ini masih sangat jauh dibandingkan dengan 200 ml oksigen yang diikat darah total ditempatkan dalam

kondisi sama. Perbedaan ini disebabkan adanya pigmen pernapasan dalam darah dengan afinitas yang kuat terhadap oksigen.

Setiap molekul hemoglobin dijenuhkan oleh oksigen ketika 4 kelompok heme diikat oleh setiap satu molekul oksigen. Persentase kejenuhan adalah fungsi dari tekanan parsial ( $PO_2$ ) oksigen dalam suatu lingkungan. Kurva yang disosiasi oksigen dari hemoglobin bentuknya adalah hiperbol (Gambar 6.6). Untuk membandingkan afinitas  $O_2$  dari berbagai hemoglobin, kita menentukan  $PO_2$  yang mendapat kejenuhan sebanyak 50% (P50). Pada kondisi  $PO_2$  normal yang ditemukan suatu organisme, hemoglobin menjadi jenuh hampir 100% pada permukaan alat pernapasan dan melepaskan  $O_2$  pada daerah  $PO_2$  rendah (jaringan: kejenuhan sekitar 70%).

Bagian dari garis naik antara  $PO_2$  20–60 mmHg menunjukkan bahwa oksigen siap diberikan ke jaringan. Bagian yang datar dari kurva di atas  $PO_2$  80 mmHg, menunjukkan bahwa darah arteri mempunyai kandungan oksigen yang konstan, meskipun udara alveol mungkin bervariasi kisaran nilainya.

Temperatur yang tinggi juga memudahkan pelepasan oksigen dari hemoglobin (Gambar 6.8). Hal ini penting karena sel-sel dengan metabolisme cepat mempunyai temperatur tertinggi dan kebutuhan yang lebih besar untuk oksigen dibandingkan dengan sel tidak aktif.

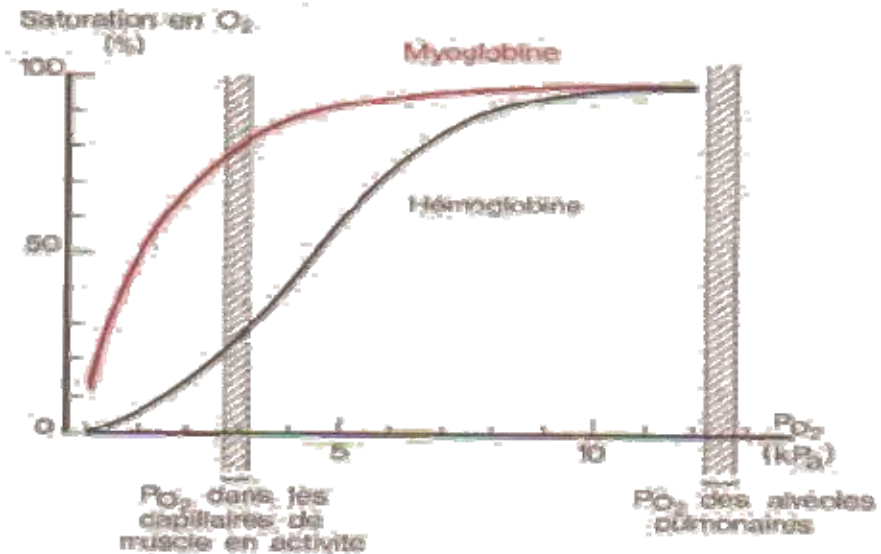
Penurunan pH menurunkan afinitas hemoglobin untuk oksigen, P50 meningkat (Gambar 6.7). Kita dapat mengestimasi modifikasi afinitas oleh keragaman nilai dari faktor Bohr: perbandingan dari perubahan logaritma  $PO_2$  terhadap variasi pH, setengah jenuh dalam  $O_2$ .

$$B_{50} = \frac{d \log P_{50}}{d \text{pH}}$$

Tingkat keasaman ini akan memudahkan pelepasan oksigen dari haemoglobin ke jaringan aktif adalah turunnya pH lokal yang disebabkan akumulasi asam laktat.

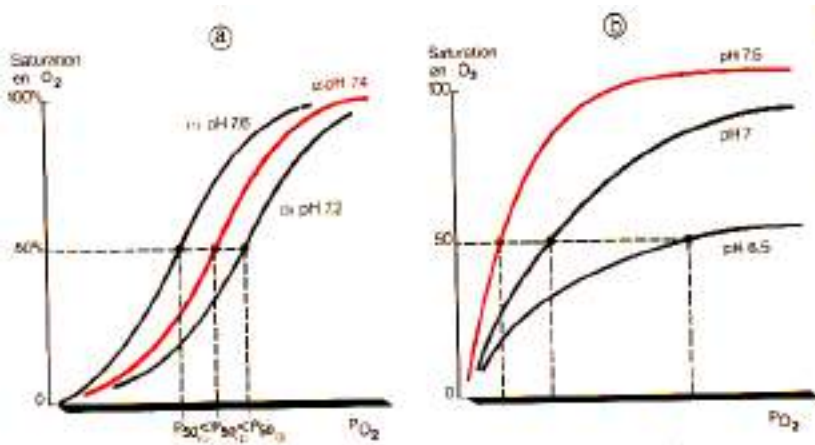
Fosfat organik yang penting dalam sel darah merah adalah 2,3 diphosphoglycerat (DFG) yang mengikat hemoglobin dan menurunkan afinitasnya terhadap oksigen (Gambar 6.9). Hal ini penting bila ternak dipindahkan dari daerah pantai ke daerah pegunungan. Pada daerah pegunungan, konsentrasi DPG dalam sel darah merah meningkat. Efek ini kurang berarti untuk pengambilan oksigen dari paru, tetapi memudahkan pelepasan oksigen dari hemoglobin ke jaringan.

Karbon dioksida yang dihasilkan oleh jaringan menyebabkan pelepasan oksigen dari haemoglobin (Gambar 6.10). Adanya karbon dioksida membuat darah lebih asam dan karbamino-hemoglobin yang terbentuk mempunyai afinitas yang kurang terhadap oksigen dibandingkan dengan hemoglobin normal. Oleh karena itu darah akan tetap kurang oksigen yang membuat banyak tersedia untuk jaringan.

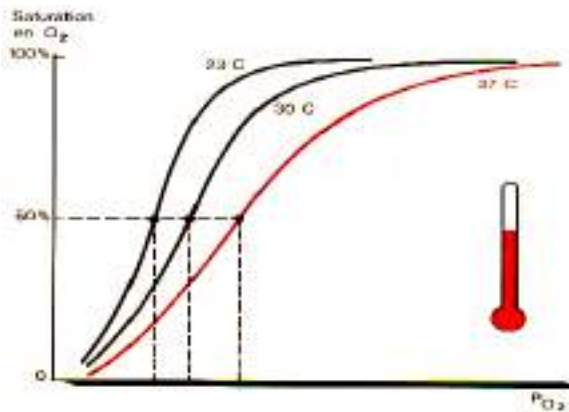


Gambar 6.6 Kurva disosiasi hemoglobin dan mioglobin manusia

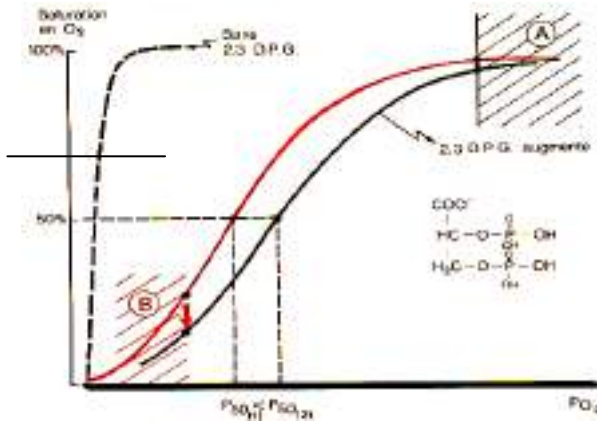
Sumber: Rieutort M (1986)



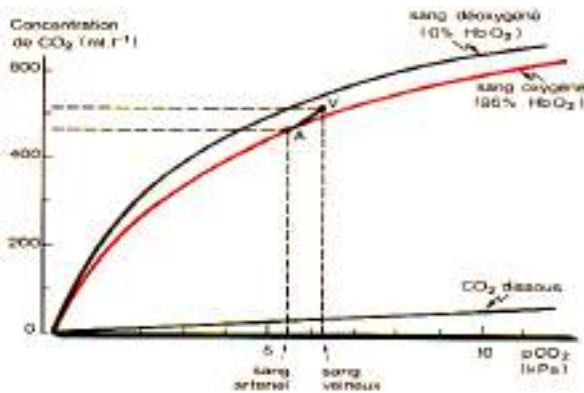
Gambar 6.7 Pengaruh keragaman pH terhadap afinitas dari pigmen pernapasan oksigen. ; Sumber: Rieurtort M (1986)



Gambar 6.8 Pengaruh temperatur terhadap afinitas hemoglobin manusia untuk oksigen ; Sumber: Rieurtort M (1986)



Gambar 6.9 Pengaruh keragaman konsentrasi 2,3 diphosphoglycerat (DPG) terhadap afinitas hemoglobin terhadap oksigen ; Sumber: Rieurtort M (1986)

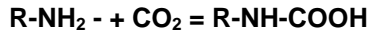


Gambar 6.10 Kurva kejenuhan darah terhadap CO2 (ml per liter darah) pada manusia ; Sumber: Rieurtort M (1986)

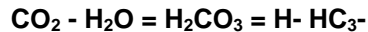
## E. Transpor Karbon dioksida

Karbon dioksida masuk ke kapiler sistemik karena  $PCO_2$  dari cairan jaringan lebih tinggi daripada  $PCO_2$  darah. Hanya sebagian kecil dari karbon dioksida yang dilarutkan dalam darah. Sekitar seperlima karbon

dioksida nampak berkombinasi dengan grup amino (-NH<sub>2</sub>) dalam bentuk:



Pengurangan hemoglobin mampu untuk membawa banyak ikatan karb amino karbon dioksida dari darah oksigenasi, karbon dioksida dibawa oleh darah sebagai ion bikarbonat. Pada peningkatan PCO<sub>2</sub> karbon dioksida akan berdifusi ke dalam sel darah merah, di mana reaksinya dipercepat oleh enzim karbonik anhidrase:



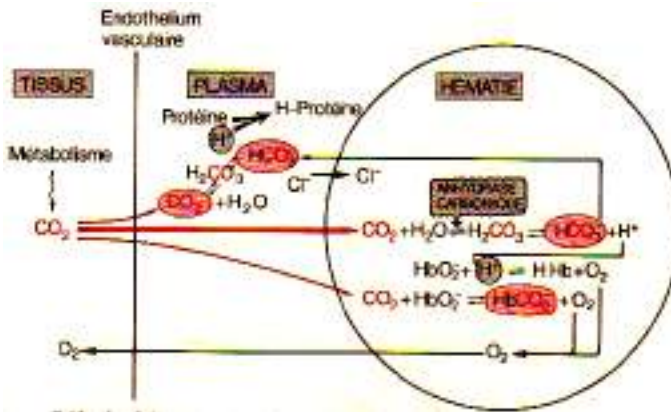
Peningkatan dalam konsentrasi bikarbonat intraseluler menyebabkan pertukaran antara ion bikarbonat dan ion klorida dari plasma. Peningkatan PCO<sub>2</sub> akan membawa ke peningkatan bikarbonat plasma dan turunnya dalam klorida plasma.

## F. Hipoksia

Hipoksia adalah defisiensi O<sub>2</sub> pada tingkat jaringan. Istilah ini lebih tepat daripada **anoksia** karena jarang tidak ada O<sub>2</sub> sama sekali dalam jaringan.

Hipoksia ini diklasifikasikan menjadi 4 tipe.

- Hipoksia hipoksik, di mana PO<sub>2</sub> darah arteri berkurang.
- Hipoksia anemik, di mana PO<sub>2</sub> darah arteri normal tetapi jumlah hemoglobin yang tersedia untuk mengangkut O<sub>2</sub> berkurang.
- Hipoksia stagnan (iskemik), di mana aliran darah ke jaringan sangat lambat sehingga O<sub>2</sub> yang cukup tidak dikirim ke jaringan, meskipun PO<sub>2</sub> dan konsentrasi hemoglobin normal.
- Hipoksia histotoksik, di mana jumlah O<sub>2</sub> yang dikirim ke suatu jaringan cukup, tetapi karena zat yang toksik sel-sel jaringan tidak dapat memakai O<sub>2</sub> yang disediakan untuk mereka.



Gambar 6.11 Transpor CO<sub>2</sub> pada hewan darat ; Sumber: Rieutort M (1986)

## G. Kontrol Respirasi

Kebutuhan O<sub>2</sub> pada hewan sangat berbeda-beda dari waktu ke waktu. Pada waktu istirahat udara yang diambil paru-paru selama 1 menit ± 10 liter. Selama olahraga udara yang diambil paru-paru bisa meningkat menjadi 125 liter per menit. Oleh karena itu kecepatan respirasi harus berubah secara otomatis untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Terdapat dua macam cara mengontrol pernapasan yaitu secara kimia dan saraf. Pusat pernapasan terletak pada medula oblongata yang terdiri dari pusat inspirasi dan ekspirasi. Kedua pusat ini bekerja secara bergantian sehingga terjadi ritme pernapasan. Saraf vagus mempunyai ujung-ujung saraf pada paru-paru. Jika saraf vagus dirangsang oleh listrik, pusat pernapasan dihambat dan berarti berhenti bernapas.

Respirasi spontan bergantung pada pelepasan ritmik dari pusat pernapasan pada medula oblongata. Jika saraf aferen dari pusat ke otot pernapasan dihentikan atau pusat itu sendiri dirusak, proses bernapas berhenti. Perubahan dalam tingkat respirasi bergantung pada perubahan dari pelepasan ritmik.

Aktivitas pusat pernapasan diatur oleh perubahan tekanan parsial karbodioksida dan oksigen dalam darah ( $\text{PCO}_2$  dan  $\text{PO}_2$ ) dan keasaman darah (pH). Kemoreseptor mampu mendeteksi perubahan dalam komposisi darah terdapat dalam busur aorta dan dalam arteri karotid. Kemoreseptor dirangsang oleh peningkatan dalam  $\text{PCO}_2$  atau konsentrasi  $\text{H}^+$  atau penurunan dalam  $\text{PO}_2$ .

Pusat pernapasan juga menerima informasi dalam kemoreseptor pada otak yang mengukur persentase  $\text{H}^+$  pada cairan serebrospinal. Hal ini bergantung pada  $\text{PCO}_2$  karena :  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$

Karbon dioksida adalah salah satu zat kimia yang berdifusi bebas antara darah dan cairan serebrospinal. Jadi reseptor-reseptor peka ion  $\text{H}^+$  pada otak secara tidak langsung memantau  $\text{PCO}_2$  darah arteri.

Pada ternak yang sedang istirahat tingkat pernapasan adalah sebanding dengan  $\text{PCO}_2$  darah dalam kisaran 35–50 mmHg. Jika ternak mempunyai  $\text{PCO}_2$  vena 46 mmHg dan  $\text{PCO}_2$  arteri 40 mm Hg respirasi tetap konstan. Jika metabolisme dan produksi  $\text{CO}_2$  jaringan meningkat,  $\text{PO}_2$  darah vena meningkat juga. Hal ini menyebabkan peningkatan  $\text{PCO}_2$  dalam alveoli. Oleh karena itu darah arteri meninggalkan paru-paru dengan  $\text{PCO}_2$  tertinggi. Ini menyebabkan eksitasi kemoreseptor dan peningkatan dalam input sensor terhadap pusat pernapasan. Tingkat pernapasan meningkat sampai  $\text{PCO}_2$  arteri normal dikembalikan karena ini adalah variabel sistem kontrol dirancang untuk pemeliharaan konstan. Reaksi berlawanan terjadi jika produksi  $\text{CO}_2$  menurun. Peningkatan dalam konsentrasi ion  $\text{H}^+$  (turunnya pH) dari darah arteri menyebabkan peningkatan besar dalam tingkat dan kedalaman ventilasi, hiperventilasi menurunkan  $\text{PCO}_2$  alveol oleh karena itu menyebabkan turunnya konsentrasi ion  $\text{H}^+$  dalam darah menurun (pH naik), ventilasi ditekan dan arteri  $\text{PCO}_2$  meningkatkan, meningkatkan konsentrasi  $\text{H}^+$  kembali normal.

Persamaan Henderson-Hansselbalch memperlihatkan hubungan antara pH dan PCO<sub>2</sub> dalam darah sebagai berikut.

$$\text{pH} = \text{pk}' + \frac{\text{Log}(\text{HCO}_3^-)}{\alpha \text{Pco}_2}$$

Di mana: Pco<sub>2</sub> = Tekanan parsial CO<sub>2</sub> darah

a = Koefisien daya larut CO<sub>2</sub>

pk' = pH di mana disosiasi adalah 50%, pk' reaksi hidratisasi adalah 6,2

Bila kandungan O<sub>2</sub> dari udara inspirasi menurun, terdapat suatu peningkatan respirasi. Rangsangan akan lebih jelas bila PO<sub>2</sub> turun dibawah 60 mmHg.

## H. Pengaturan Ventilasi pada Mamalia

### 1. Pendekatan Metode Percobaan

Analisis percobaan pengaturan fungsi pernapasan dilakukan dengan berbagai teknik seperti hal berikut.

- Mengukur debit ventilasi dan komposisi udara yang dikeluarkan.
- Mengukur kandungan O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> dalam darah.
- Perfusi cairan pada PO<sub>2</sub> dan PCO<sub>2</sub>, PH yang terkontrol pada tingkat organ yang berintervensi dalam pengaturan (zona kemosensibiliti).
- Teknik elektro fisiologi: stimulasi elektrik yang dilokalisir dengan perekaman serabut saraf dan neuron.

### 2. Prinsip-prinsip Mekanisme Pengaturan

#### 2.1 Automatisasi

Otot-otot pernapasan diinervasi oleh motoneuron yang terletak dalam sumsum tulang serviks dan toraks. Motoneuron menerima ransangan aferen yang berasal dari pusat pernapasan hipotalamus dan terdiri atas dua kelompok neuron:

- neuron inspirator, di mana aktivitasnya menyebabkan inspirasi; dan
- neuron ekspirasi, di mana aktivitasnya menyebabkan ekspirasi.

Aktivitas ritmik dipelihara oleh neuron yang terletak pada "*protuberance annulair*" pada tingkat pusat yang disebut **pneumotaksik**. Terdapat neuron yang sama antara pusat pneumotaksik dan pusat bulbaire yang menyebabkan inspirasi dalam pada saat pusat pneumotaksik tidak berfungsi. Neuron-neuron ini dibentuk pada pusat disebut **apneustik**.

## 2.2 Refleks Regulator

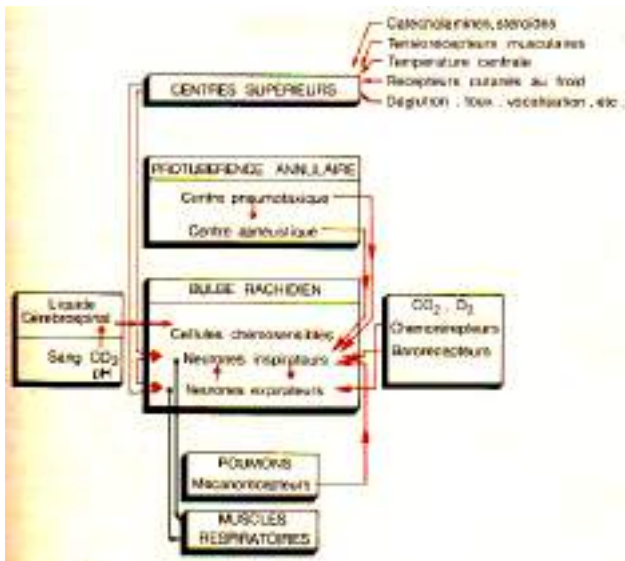
Ritme dan amplitudo gerakan ventilasi diatur secara permanen oleh variasi pH, PCO<sub>2</sub>, dan PO<sub>2</sub> darah. Faktor lainnya seperti keadaan aktivitas (mengantuk, kerja), variasi temperatur, stres, hormon tertentu, vokalisasi dapat mengatur fungsi ini, dan neuron-neuron pusat pernapasan yang memadukan secara permanen data-data dari berbagai macam.

Berbagai reseptor yang dapat terlibat secara permanen dalam system pernapasan adalah sebagai berikut.

- Kemoreseptor sentral (bulbaire) peka terhadap variasi pH cairan serebrospinal berhubungan dengan variasi PCO<sub>2</sub>. Begitu pH menurun ventilasi dipercepat.
- Kemoreseptor tepi yang terdapat pada karotid dan badan aorta mamalia, frekuensi aliran darah dikeluarkan oleh reseptor ini meningkat ketika PO<sub>2</sub> menurun atau ketika PCO<sub>2</sub> meningkat dalam darah arteri.
- Mekanoreseptor peka terhadap tegangan saluran udara superior dan parenkim paru-paru.

Pusat-pusat pernapasan juga menerima saraf aferen lainnya yang berasal dari hal berikut.

- Proprioreseptor: ketika ada aktivitas otot, gerakannya merangsang ventilasi sebelum gas pernapasan mengalami keragaman konsentrasinya dalam darah.
- Baroreseptor karotid dan aorta dan pusat kardiovaskular.
- Daerah lainya dari sistem saraf pusat: korteks, hipotalamus, sistem limbik yang memodifikasi aktivitas ventilasi ketika ada perasaan nyeri, takut, bunyi keras. Peningkatan suhu dan peningkatan konsentrasi adrenalin juga merupakan rangsangan ventilasi pernapasan.



Gambar 6.12 Skema umum unsur-unsur regulasi ventilasi paru-paru pada mamalia ; Sumber: Rieutort M (1986)

## I. Sistem Pernapasan Burung

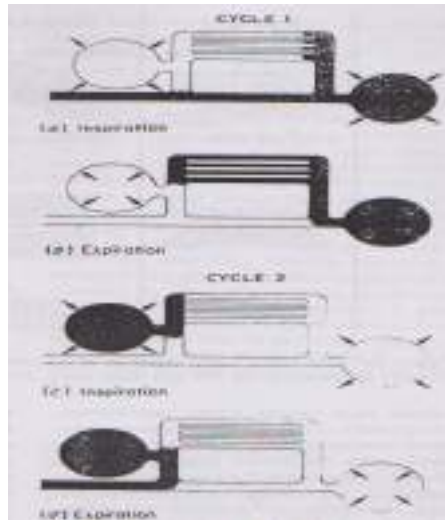
Sistem pernapasan unggas (burung) terdiri dari dua paru-paru dan satu kesatuan kantung udara yang tidak berpartisipasi langsung terhadap pertukaran udara, tetapi dapat memberikan udara ke paru-paru. Paru-parunya bukan terdiri atas alveol tertutup, tetapi sejumlah

kapiler-kapiler udara yang kedua ujungnya bermuara pada sistem bronki yang komplek. Hal yang terbesar satu buah disebut mesobronkus. Mesobronkus berhubungan dengan bronkus primer. Dari mesobronkus keluar dua set bronki sekunder, yaitu bronkus sekunder anterior dan bronkus sekunder posterior.

Hubungan paru-paru dengan berbagai kantong udara dapat membedakan antara dua kelompok kantung udara, yaitu **kantong anterior** dan **kantong posterior**. Analisis gerakan gas telah dilaksanakan baik komposisi gas dari berbagai kantong gas setelah penghisapan suatu gas yang diberi label dengan perunut maupun dengan mengukur jumlah gas pada berbagai sistem pernapasan dengan alat-alat yang mikromini. Setiap siklus pertukaran gas memerlukan dua inspirasi dan dua ekspirasi. Ketika inspirasi yang pertama (1) udara dihisap diperoleh kelompok kantung udara posterior; ekspirasi berikutnya dapat menggosongkan kantung anterior menuju trakea dan membuat sirkulasi udara yang berasal dari kantong posterior pada sistem tubulus; (2) inspirasi kedua menyebabkan udara meminjam udara kapiler untuk bersatu dalam kantong udara anterior; dan (3) sebaliknya ekspirasi kedua akhirnya dapat mengeluarkan udara setelah usaha optimal kantong udara tersebut. Disposisi ini menjamin penampilan yang terbaik dalam pertukaran darah (Gambar 6.13).

Sistem pertukaran antara udara kapiler pada unggas merupakan cara intermediet antara sistem melawan arus dan sistem paralel dengan arus. Pada unggas, volume udara yang terdapat dalam paru-paru mewakili sekitar 1/4 kapasitas total dari udara permukaan. Sewaktu burung terbang membutuhkan lebih banyak O<sub>2</sub>. Gerakan dari sternum (tulang dada) secara ritmik dan gerakan waktu terbang membantu menambah ventilasi udara. Jika otot interkostal luar berkontraksi (misalnya pada waktu terbang), tulang rusuk bergerak ke luar (ke depan), sedangkan tulang dada bergerak ke bawah. Hal ini

menyebabkan rongga dada bertambah besar. Tekanan di rongga dada perut turun dan terjadi pengisapan udara masuk paru-paru dan kantung udara.



Gambar 6.13 Pola gerakan penghisapan tunggal selama satu siklus pernapasan pada unggas ; Sumber: Burggren W dan Robert JL (1991)

# **BAB VII**

## **ZAT-ZAT NUTRISI TERNAK DAN SISTEM PENCERNAAN**

Semua organisme hidup mulai dari prokariot uniseluler yang sederhana sampai dengan mamalia multiseluler yang kompleks, membutuhkan nutrisi atau substansi-substansi penyedia makanan untuk menyintesis senyawa-senyawa yang penting bagi pemeliharaan, pertumbuhan, dan reproduksi.

Beberapa organisme mempunyai kebutuhan zat nutrisi yang sederhana: cahaya sebagai sumber energi, karbon dioksida, air, dan garam dari unsur-unsur organik. Organisme yang menggunakan cahaya sebagai sumber energi, diklasifikasikan sebagai fototrof. Kelompok lain dari organisme-organisme (sebagian besar bakteri) yang juga mempunyai kebutuhan nutrisi sederhana, tetapi menggunakan energi yang dilepaskan dari oksidasi senyawa-senyawa anorganik seperti besi dan sulfur, diklasifikasikan sebagai kemototrof.

Fototrof dan kemototrof seringkali digabungkan sebagai autotrof untuk membedakan mereka dengan organisme heterotrof. Sebagian besar binatang-binatang merupakan heterotrof dan memperoleh energi dari oksidasi terkontrol dari senyawa-senyawa organik yang kerumitannya beragam.

Pakan ternak berasal dari tanaman secara langsung pada kasus hewan herbivora dan tidak langsung pada kasus hewan karnivora. Tanaman mengambil air dan garam-garam dari tanah serta karbon dioksida dari udara. Mereka menggunakan sinar matahari untuk mengubah bahan mentah tersebut menjadi karbohidrat, lemak, protein, dan substansi kompleks lainnya. Senyawa-senyawa organik dan anorganik

yang terkandung dalam tanaman selanjutnya digunakan oleh ternak dengan berbagai tingkat efisiensi. Ternak ruminansia mempunyai kapasitas terbesar untuk menggunakan material tanaman, terutama material yang kaya akan selulosa. Hewan herbivora lainnya kurang efisien menggunakan bahan yang berasal dari tanaman dan hewan karnivora sangat rendah sekali efisiensinya. Perbedaan efisiensi ternak dalam memanfaatkan berbagai jenis pakan disebabkan oleh perbedaan dalam sistem pencernaannya. Ternak dapat memperoleh energi dari protein, lemak, karbohidrat, sejumlah kecil mineral, dan vitamin untuk tumbuh dan bereproduksi. Semua organisme hidup membutuhkan secara konstan pergantian energi dan unsur pembangun untuk bekerja, menjaga suhu tubuh, dan mengganti sel rusak secara berkesinambungan pada berbagai jaringan.

Jadi pakan dapat didefinisikan sebagai substansi yang esensial ketika diserap dalam jaringan tubuh menghasilkan material untuk memproduksi energi, pertumbuhan, memperbaiki jaringan, dan pengaturan proses kehidupan tanpa merusak organisme.

Bab ini akan membahas berbagai jenis zat-zat makanan yang diperlukan oleh tubuh ternak dan perbedaan fungsi zat-zat tersebut untuk kebutuhan fisiologis tubuh.

## **A. Klasifikasi Zat-zat Nutrisi dalam Pakan Ternak**

Pakan ternak secara umum terdiri atas unsur-unsur yang penting, terutama protein, karbohidrat, dan lemak. Sebagai tambahan, unsur-unsur lainnya yang terkandung dalam pakan ternak adalah garam-garam mineral, air, vitamin yang merupakan bagian protoplasma dari semua struktur seluler. Sumber pakan ternak bisa berupa hijauan ternak (rumput + kacang-kacangan), limbah pertanian, limbah pabrik.

Pada prinsipnya zat nutrisi ternak dapat dikelompokkan berdasarkan penyusunan unsur kimianya dan atas fungsinya dalam tubuh.

Berdasarkan unsur kimia yang menyusunnya dapat diklasifikasikan protein, karbohidrat, lemak, garam mineral, air, dan vitamin. Penggolongan ini dapat juga didasarkan ada tidaknya unsur nitrogen dalam susunan, yaitu nitrogenous dan nonnitrogenous. Protein merupakan unsur nitrogenous karena banyak mengandung asam-asam amino, sedangkan substansi yang nonnitrogenous adalah unsur yang tidak mempunyai (kadarnya rendah sekali) unsur nitrogen. Pakan diklasifikasikan juga sebagai bahan organik dan anorganik berdasarkan ada atau tidaknya unsur karbon dalam penyusunnya. Jadi protein, karbohidrat, dan lemak dikenal sebagai bahan organik karena mereka mempunyai unsur karbon dalam kandungannya, sedangkan garam mineral dan air dikenal sebagai bahan anorganik karena tidak mempunyai unsur karbon dalam kandungannya.

Berdasarkan fungsinya dalam tubuh zat-zat nutrisi dibagi menjadi tiga kelas.

**Pembentuk tubuh.** Protein, garam mineral, dan air dikenal sebagai pembangun tubuh karena hanya mereka merupakan substansi yang masuk ke dalam komposisi tubuh.

**Penghasil energi.** Karbohidrat dan lemak pada waktu oksidanya menghasilkan sejumlah tertentu energi yang dikonsumsi oleh ternak untuk melakukan berbagai kegiatan tubuh. Energi selalu dinilai dalam istilah kalori. Karbohidrat dikatakan sebagai penghasil energi terbaik karena mudah dioksidasi secara lengkap dan kedua adalah lemak, protein hanya dioksidasi kalau kekurangan karbohidrat dan lemak.

**Pengatur.** Garam mineral dan vitamin mampu mengatur berbagai fungsi yang berbeda dalam tubuh, oleh karena itu sering disebut sebagai zat pengatur atau regulator.

## 1. Protein

Protein merupakan senyawa kimia yang cukup tersedia dalam kehidupan hewan. Protein merupakan molekul kompleks, serba guna, dan makromolekul fragile dengan berat molekul yang tinggi berkisar antara 6.500 sampai dengan beberapa juta. Protein bukan hanya sebagai bahan untuk memproduksi energi, tetapi juga mempunyai peranan penting dalam setiap aspek struktur dan fungsi kehidupan karena merupakan bahan penyusun utama protoplasma dan juga membentuk bentuk dasar dari fisik organisme.

## 2. Lipid

Lipid merupakan senyawa organik yang larut dalam pelarut nonpolar seperti *ether*, *alcohol*, dan *chloroform*. Lemak tidak larut dalam air dan bisa diekstrak dari berbagai sumber, baik hewan maupun tumbuhan dengan pelarut lemak. Seperti halnya karbohidrat, molekul-molekul lemak terdiri atas karbon, hidrogen, oksigen, dan unsur-unsur lainnya seperti fosfor dan nitrogen. Lipid mempunyai peran penting dalam oksidasi asam-asam lemak menjadi  $\text{CO}_2$  yang merupakan sumber utama energi berasal dari metabolisme dan sebagai penyusun membran sel (fosfolipid dan sphingolipid). Telah dibuktikan dengan alat bom kalorimeter lipid menghasilkan energi lebih banyak daripada karbohidrat. Satu gram karbohidrat, bila dioksidasi akan menghasilkan 4,1 kalori, sedangkan 1 gram lemak akan menghasilkan 9,3 kalori. Lipids diklasifikasikan menjadi tiga kelompok besar, yaitu lipid sederhana, lipid kompleks, dan derivat lipid. Lipid sederhana merupakan ester dari asam-asam lemak dengan alkohol trihidrat, seperti gliserol, termasuk lipid sederhana juga lemak tubuh, minyak, dan lilin.

Lemak merupakan lipid yang penting yang berperan sebagai bahan bakar oksidasi biologis. Sumber utama lemak berasal dari lemak tubuh, mentega, minyak kelapa, dan kacang-kacangan. Lemak terbentuk dari satu molekul gliserol dan tiga molekul asam lemak. Asam lemak

merupakan senyawa rantai atom karbon (C) lurus dengan satu grup karboksil pada ujungnya. Asam lemak terdiri atas dua kelompok: asam lemak jenuh dan asam-asam lemak tidak jenuh. Asam lemak jenuh mempunyai ikatan rantai karbonnya sudah jenuh, contohnya asam palmitat (C18:0), *myristat* (C14:0), dan stearat (C18:0). Asam lemak tidak jenuh mempunyai ikatan ganda karbon tidak jenuh, sebagai contoh asam lemak oleat (C18:1), linoleat (C 18:2), dan *arachidonat* (C20:4).

Karakteristik lemak dicirikan oleh beberapa sifat berikut.

1. Kelarutan: lemak tidak mempunyai rasa, tidak berwarna, kurang berbau, dan berbentuk semi-padat yang tidak larut dalam air tetapi larut dalam pelarut nonpolar seperti *ether*, *alcohol*, dan *chloroform*.
2. Konsistensi: lemak berbentuk semi padat seperti lemak tubuh maupun agak lunak seperti mentega maupun bentuk cair seperti minyak kelapa. Keragaman konsistensi ini dipengaruhi oleh proporsi antara kelompok asam lemak jenuh dan tidak jenuh. Lemak yang mengandung banyak asam lemak palmitat dan stearat berbentuk padat dan keras dalam suhu kamar dibandingkan dengan kandungan asam lemak lainnya.
3. Titik cair: titik cair lemak sangat bervariasi, bergantung kepada kandungan asam lemaknya.
4. Kejenuhan: lemak yang ada di alam umumnya dibagi dua jenis, yaitu lemak jenuh dengan asam-asam lemak jenuh dan lemak tidak jenuh dengan asam-asam lemak tidak jenuh. Lemak jenuh tidak menyerap yodium, sebaliknya asam lemak jenuh dapat mengabsorpsi yodium. Selama proses oksidasi dekarboksilasi, terjadi kehilangan atom karbon setelah pecahnya lemak pada titik ketidakjenuhan.
5. Saponifikasi: lemak bila dididihkan dengan cairan atau larutan alkohol alkalis (NaOH dan KOH) , mengalami saponikasi membentuk sabun.

6. Emulsifikasi: bila lemak diaduk dengan air, akan pecah dan terpisah ke luar membentuk lapisan minyak dalam air membentuk suatu emulsi. Alkalis dan garam empedu dikenal sebagai zat pengemulsi dibandingkan dengan air.
7. Hidrolisis: lemak alamiah akan terhidrolisis di bawah pemanasan dan akan terurai menjadi komponen-komponennya, yaitu asam-asam lemak dan gliserol.

Lipid kompleks adalah lipid yang tambahan radikal kompleks sebagai tambahan, misalnya *phosfolipid*, *glycolipid*, *chromolipid*, dan Aminolipid. Derivat lipid merupakan hasil dari hidrolisis lipid sederhana atau lipid kompleks.

### **3. Karbohidrat**

Karbohidrat bahan makanan terdiri atas gula, pati, selulosa, dan gum. Semakin kompleks substansi-substansi karbohidrat meningkat, kemudahan mencerna semakin menurun. Selulosa struktur karbohidrat terutama dalam tanaman merupakan komponen serat kasar. Pakan yang mengandung persentase tinggi selulosa seperti hay, silase, dan jerami dinamakan hijauan yang mempunyai daya cerna rendah. Biji-biji tanaman mengandung selulosa rendah. Biji-bijian lebih mudah dicerna dan dikenal sebagai konsentrat.

### **4. Vitamin**

Vitamin merupakan bahan organik yang tidak dapat disintesis oleh hewan tetapi dibutuhkan dalam zat makanan dalam konsentrasi yang kecil untuk berfungsi secara normal pada hewan. Vitamin kemungkinan dihasilkan oleh organisme abiotik atau berasal dari makanan dalam jumlah yang biasanya < 0,1% dari bahan makanan kering. Biasanya vitamin dikelompokkan pada dasarnya dari kelarutan, apakah mereka larut dalam air atau larut dalam lemak. Kemampuannya kecil untuk melakukan fungsi metabolisme, walaupun frekuensi vitamin yang larut dalam lemak perannya bermacam-macam.

### 1). Vitamin yang Larut dalam Air

Banyak dari vitamin B kompleks pada hakikatnya dibutuhkan oleh seluruh hewan. Kemungkinan ini diperlihatkan/digambarkan dengan keikutsertaan vitamin-vitamin ini dalam proses metabolisme. Sebagai contoh, tiamin dalam proses semua jenis binatang tidak terkecuali yang berasal dari flagellata asetat sampai ke primate, demikian pula halnya vitamin B12 juga dibutuhkan oleh binatang pada wilayah yang luas. Perbedaan yang menyolok pada vitamin yang larut dalam lemak ialah umumnya hanya dibutuhkan oleh hewan vertebrata. Di mana kebutuhan ini terjadi pada hewan invertebrata, berhubungan dengan fungsi khususnya (seperti vitamin A untuk penglihatan atau vitamin E untuk reproduksi).

Tiamin merupakan vitamin B yang pertama ditemukan ketika ia terlihat aktif di saat pencegahan penyakit beri-beri pada manusia dan polinutritisi pada burung. Semua nutrien yang kekurangan tiamin banyak memberikan dampak pada selera makan (0). Tiamin sebagai *thiamin pyrophosphate* adalah co-enzim untuk dekarboksilase oksidatif dari atom  $\alpha$  keto, khususnya piruvat dan  $\alpha$  ketoglutanat pada metil co-enzim A dan succinyl CoA berturut-turut. *Thiamin pyrophosphate* juga sebagai co-enzim untuk reaksi transketolase dari *phosphogluconat*. Oleh karena itu *thiamin pyrophosphate* merupakan ikatan yang rumit dalam ikatan glikolisis pada asam trikarboksilat. Di dalam mikroorganisme tiamin juga sebagai co-enzim untuk reaksi asam monooksidatif dekarboksilasi  $\alpha$ -keto dan reaksi *phosphotase*. Kemudian reaksi yang meliputi pembelahan/pemisahan ketopentose fosfat menjadi triose fosfat dan acetil fosfat.

#### a). Riboflavin

Kebutuhan riboflavin untuk kebanyakan mamalia adalah 3–4 mg/kg bahan makanan kering.

Mamalia yang *coprophagy* (contoh kelinci) atau memiliki sistem pencernaan yang fermentatif pregastrik (misalnya ruminan dan makroped) tidak membutuhkan sumber zat makanan dari riboflavin.

b). Niacin

Niacin adalah bentuk nikotin amida adenin dinucleotida (NAD<sup>+</sup> dan NADP<sup>+</sup>) yang berada pada mitokondria dan sitosol sel dalam peranannya di reaksi oksidasi reduksi, termasuk transfer H<sup>+</sup> dan elektron. Reaksi reduksi NAD<sup>+</sup> (ke NADP) diiringi dengan oksidasi substrat. Perubahan yang terjadi pada piruvat dan laktat dalam sel sitosol adalah salah satu contoh kelanjutan dari oksidasi reduksi yang meliputi NAD<sup>+</sup>. Salah satu contoh reaksi yang terjadi dalam mitokondria adalah reduksi *oxaloacetate* meliputi maltose. Maltose dapat melewati mitokondria ke sitosol di mana maltose dioksidasi dan didekarboksilasi oleh NADP dalam proses dehidrogenase *realase* yang menghasilkan piruvat dan NADPH. NADH dihasilkan dalam cincin TCA juga dapat dioksidasi oleh *ebiquenones* dan dalam prosesnya dihasilkan ikatan *phosphat* berenergi tinggi.

c). Pyridoxin

*Pyridoxal phosphate* sering berikatan dengan kelompok enzim prostetik untuk bergabung dengan asam amino bebas. Pada amino transferase, perpindahan kelompok amino dari asam amino ke asam  $\alpha$ -keto, *pyridorsal phosphat* merupakan koenzim utama untuk katabolisme asam amino dan sintesis pembebasan asam amino. Peranan B6 (*pyridoxamin*) yang ada dalam vitamin R tersubsitisi dengan CH<sub>2</sub>OH (*pyridoxol*), CHO (*pyridoxal*) atau CH<sub>2</sub>NH<sub>2</sub> (*pyridoxamine*).

d). Asam Pentatonic

Asam pentatonic merupakan komponen CoA yang berfungsi yang mentrasfer grup *acyl*. Acetyl CoA memperkenalkan asetat pada lingkaran TCA di mana grup *acyl* berkombinasi dengan oksaloasetat menjadi bentuk sitrat.

## e). Asam Folic

Kandungan utama dari vitamin folate adalah asam pteroylglutamic, disebut juga asam folat. Bagian utamanya adalah pteridine *moiety* terikat dengan jembatan *methylen* pada asam p-amino benzoat dalam lingkaran dihubungkan oleh ikatan peptida kepala asam glutamik. Dalam tubuh organisme (hewan) folat berfungsi dalam mereduksi 7,8 dihidrofolat atau 5,6,7,8-tetrahydrofolate (THFA) dengan beberapa variasi ikatan C1 meieti pada posisi N5, N10 atau N5,10. Siklus metabolis dari asam folat berupa transfer/perpindahan kelompok karbon unggul. Asam folat adalah nutrien yang esensial untuk semua binatang vertebrata. Kekurangan asam folat biasanya ditunjukkan dengan tanda-tanda klinik yang meliputi anemia.

## f). Vitamin B12

Vitamin B12 atau cobalamin adalah co-enzim untuk mutase *metilmolonyl* CoA dan reaksi metil transferase. Kandungan cobalamin cincin besar *tetrapyrrol* yang mengelilingi atom *cobalt*. *Cobalt* diikat pada empat atom nitrogen dari cincinnya dan membentuk sebuah ikatan dengan atom karbon dari kelompok adenosil dan atom nitrogen dari kelompok benzimidazole. Ikatan *cobalt-carbon* dari cobalamin hanya diketahui secara biologi dari sebuah contoh ikatan *cobalt*-logam.

Vitamin B12 merupakan kebutuhan metabolis untuk semua ikan teleostei, burung, dan mamalia. Sintesis secara mikrobial dalam usus kebanyakan spesies hewan (misalnya ruminan) dengan menyuplai kebutuhan vitamin B12, menyediakan zat tersebut yang mengandung tingkat *cobalt* yang cukup. Pada binatang/hewan tidak ada sintesis vitamin B12 dalam ususnya, *cobalt* (kecuali dalam bentuk vitamin B12) tidak esensial sebagai kebutuhan akan zat makanan.

Biotin adalah kelompok prostetik untuk beberapa reaksi *carboxilasi* kebanyakan dikhususkan karboksilase piruvat (dibutuhkan

untuk sintesis oksaloasetat dalam gluconeogenesis dan pergantian TCA pada pertengahan siklus), karboksilase asetil CoA (sintesis asam *fatty*) dan karboksilase propionyl CoA (untuk pemasukan asam amino dan propionat yang mengasikkan propionat ke dalam siklus TCA).

#### g). Vitamin C

Ascorbat berbeda dengan vitamin larut lainnya, di mana tidak tersusun atas komponen beberapa enzim serta fungsi dan perannya belum diketahui. Ascorbat, terbungkus seperti reduktan dalam hidroksi dari prolyl dan sisa-sisa lysil dari collagen serta prolyl dalam elastin, dalam p-hidroksilphenyl piruvat dan pembentukan noradrenalin. Fungsinya antara lain berhubungan dengan kemampuan ascorbat untuk mengoksidasi dan mereduksi ulang.

### 2). Vitamin-vitamin yang dapat Melarutkan Lemak

Vitamin-vitamin yang dapat melarutkan lemak adalah A, D, E, dan K. Vertebrata mempunyai syarat pertukaran zat bagi keempat vitamin ini, tetapi hanya vitamin A (provitamin karoten) dan vitamin E yang biasanya penting dalam makanan.

#### a). Vitamin A

Vitamin A digunakan untuk menunjukkan aktivitas secara biologi campuran yang meliputi retinol, 3-Dehidroretinol, dan esternya.

Vitamin A alami hanya ada pada binatang dan hasil pembakaran enzim karotenoid yang disintesis oleh tumbuhan hijau. Di antara karotenoid, B-caroten memiliki potensi yang paling tinggi seperti molekul yang simetris dan hasil oksidasi dua molekul retinol. Karotenoid yang lain seperti itu adalah *cryptoxantin*, A-karoten, B-karoten yang mudah mengendap.

Burung membutuhkan sumber makanan yang bersumber dari karoten atau vitamin untuk keperluan reproduksi dan pertumbuhan secara normal. Warna burung (misal ungu pada flamingo) dapat

mengembang jika ransumnya hanya mengandung karoten yang berpigmen tipe *astaxanthin*.

Kekurangan vitamin A pada mamalia berkaitan pada sistem organ sebab vitamin A berperan dalam DNA dan RNA serta diferensiasi sel. Hanya kurang sekitar 0,001/% dari bobot vitamin A pada mata, tetapi tanda awal dari kekurangan vitamin A adalah penglihatan tidak sempurna karena hilangnya pigmen penglihatan yaitu rhodopsin. Vitamin A dibutuhkan bagi pembentukan tulang secara normal pada binatang yang masih muda, bila kekurangan vitamin ini akan menekan dan menegangkan saraf, khususnya saraf pada tengkorak.

#### b). Vitamin D3

Pada dunia baru hewan tingkat tinggi (misalnya, kera kecil, tamarin), vitamin D2 mempunyai banyak aktivitas yang lebih rendah dari vitamin D3. *Cholecalciferol* dalam penjinakan babi tetapi tidak demikian pada tikus, dal hal ini telah memberi kesan bahwa perbedaan spesifik mungkin adalah bayangan dari sumber alami vitamin D untuk kedua spesies ini. Seperti tikus yang merupakan binatang malam hari, mereka mengonsumsi sebagian besar *ergocalciferol* dari sayur-sayuran, mengingat babi akan mendapatkan sebagian besar dari vitamin D mereka berasal dari penguraian sinar matahari.

Perjalanan metabolis dari vitamin D diperlihatkan pada Gambar 7.1. Vitamin D (baik D2 atau D3) yang berasal dari derivat hasil makan dan penimbunan pada kulit yang dimetabolisme oleh hati dengan menghasilkan proses hidrosilasi menjadi 25-OH-D. Reaksi hidrosilasi ini dihambat oleh produknya yang sama mencegah kelebihan jumlah aktivitas biologi dari vitamin D yang dihasilkan. Reaksi hidrosilasi kedua terdapat pada ginjal yang menghilangkan 1,25-(OH)<sub>2</sub>-D yang lebih aktif dari vitamin D3 reaksi hidrosilasi yang kedua ini diantari oleh hormon parathoroid (PTH) yang meningkat ketika konsentrasi kalsium dalam

darah menurun. Reaksi singkat dalam plasma kalsium,  $1,25\text{-(OH)}_2\text{-D}$  bekerja dengan PTH menyebabkan penyerapan oleh tulang dan pelepasan kalsium serta fosfor. Hormon *parathyroid* juga bekerja pada ginjal dan menyebabkan peningkatan ekskresi terhadap fosfor, pengaruh rata-rata yaitu menormalkan plasma kalsium. Reaksi-reaksi lengkap dalam kalsium yang homeostatis memerlukan peningkatan pengambilan kalsium. Metabolisme aktif dari vitamin D berikatan dengan reseptor khusus pada nukleus eritrosit dalam mukosa usus dan ditandai pula dengan formasi dari nukleus berikatan dengan kalsium-protein yang dirangsang oleh kalsium dan penyerapan fosfor oleh usus.

Metabolisme dalam jumlah besar oleh vitamin D ( $\text{D}_3$ ) telah diisolasi dan diidentifikasi, tetapi fungsi biologisnya belum pasti. Defisiensi dari vitamin D dihasilkan dalam proses mineralisasi yang kurang baik dari matriks cartilago dalam pertumbuhan tulang, yang bila berat menjadikan cacat dan dianggap karakteristik kelengkungan dari penyakit tulang. Pada hewan dewasa, defisiensi vitamin D dihasilkan pada pengurangan dari kalsium dari usus dan dari proses dimineralisasi tulang.

### c). Vitamin E

Vitamin E merupakan unsur generik dari kelompok tocol lemak yang dapat larut dan *tocotrinol* yang berasal dari aktivitas vitamin, sebagian besar bentuk aktif dari vitamin E ini ialah D- $\alpha$ -tocopherol. Kata "toco" dalam *tocopherol* berasal dari bahasa Yunani "totkos" yang berarti bersalin *fertility* (kesuburan) yang menurun dari tikus-tikus. *Tocopherol* mencegah lemak *polyunsaturated* dalam membran sel terhadap kerusakan oksidatif. Faktor-faktor yang mengubah kebutuhan-kebutuhan vitamin E dari hewan-hewan mengoksidasi unsur-unsur, ozon, asam lemak peroksidasi, dan bekas elemen-elemen katalitik seperti tembaga.

## d). Vitamin K

Homeostatis atau perhentian pendarahan pada binatang dicapai dengan formasi benang-benang fibrin yang mencegah kehilangan darah. Produksi benang-benang fibrin adalah akhir dari reaksi trombin (sebuah enzim) yang bertindak mengubah protein fibrinogen untuk memproduksi fibrin.

Vitamin K tersusun dari 2-metil -1,4- naphthoquinone dan semua derivat-derivatnya menunjukkan aktivitas antipendarahan pada hewan yang di dalam tubuhnya cukup tersedia. Senyawa 2-metil-3-phytyl -1,4-naphthoquinone umumnya seperti vitamin K1 atau yang disebut vitamin K2 merupakan seri dari vitamin K dengan rantai sebuah transisomer dari substitusi 2-metil -1,4-naphtho-quinone sintesis oleh tumbuhan hijau dan bakteri merupakan aktivitas dari vitamin K.

Fungsi metabolisme utama vitamin K adalah sebagai enzim miosomal karboksilat peptida bentuk residu glutamil pada protein menjadi  $\gamma$ -karboksilglutamyl residu. Modifikasi pos-translasi dari pertanda ini membawa protein-protein berpartisipasi dalam reaksi spesifik protein -Ca<sup>2+</sup>- fosfolipid yang amat penting dalam hubungannya sebagai fungsi biologis. Penambahan keempat jenis vitamin K bebas koagulasi proenzim (faktor II, VII, IX, dan X), pembahan empat faktor karboksil (protein C, S, M, Z). Keempat protein tersebut mempunyai asam amino yang homolog pada protorombin, semuanya memberikan persediaan kalsium untuk proses aktivasi. Protein lain mengandung protein tulang osteocalsein yang dasarnya juga termodifikasi pos-translasi seperti pada vitamin K bebas.

Vitamin K terkandung dengan frekuensi rendah pada bintang, kecuali pada ayam yang mempunyai vitamin K tinggi dan mengandung antibiotik yang berpengaruh pada sintesis di usus .

Pengaruh spesies yang lain disebabkan sintesis vitamin K oleh bakteri pada jalan gastro intestinal, kecuali jika binatang tersebut mengandung zat antagonis/pelawan vitamin K (misalnya dicumarol) sehingga pengaruhnya menjadi jelas.

Vitamin K merupakan kebutuhan metabolis dari setiap mamalia, tapi hal tersebut dengan sistem pencernaan mikrobial (misalnya hewan pemamah biak dan beberapa yang mengandung bakteri penting dalam sistem gastrointestinal) tidak membutuhkan sumber vitamin makanan.

### 3). Unsur Mineral

Dalam penambahan akan senyawa yang berisi karbon hidrogen dan oksigen, tumbuhan-tumbuhan dan hewan-hewan memerlukan 20 sampai 30 unsur-unsur anorganik. Kebutuhan nutrisi untuk unsur-unsur anorganik esensial adalah

sungguh mirip semua sel hidup, mungkin disebabkan oleh evolusi dari organisme umum dan penggunaan reaksi metabolis yang sama dalam proses kehidupan. Banyak enzim membutuhkan ion logam yang bervalensi dua unsur-unsur transisi dari tabel periodik, turut serta dalam reaksi oksidasi reduksi (redoks).

Satu dari sebagian besar unsur-unsur menarik dari titik pandang evolusi adalah fosfor yang menempati peranan sangat penting dalam informasi transfer genetik (DNA dan RNA diester asam fosfor) dalam transfer energi (ATP, kreatinin fosfat, dan *fosfoenolpyruvat* anhidrida, amida, dan enol ester asam fosfat). Sebagai peraturan metabolisme (glukosa -6 - fosfat dan fruktosa -6-fosfat merupakan asam fosfat ester). Alasan utama yang memungkinkan fosfat untuk menempati tempat yang khusus (unik) antara unsur-unsur yang digunakannya dalam sistem kehidupan adalah mereka terionisasi pada sebuah pH fisiologis. Molekul-molekul murni yang berlistrik mempunyai nilai daya larut dalam

membran lemak, sedangkan molekul-molekul ionisasi dipertahankan dalam sel.

#### 4). Makro Mineral

##### a). Natrium (Na)

Pada umumnya konsentrat protein asal ternak kaya akan natrium (Na) (0,5% dari berat segar), sedangkan konsentrat protein asal tumbuhan mempunyai kandungan Na yang rendah (0,05–0,3%). Kandungan Na dari rumput segar berkisar 0,02–0,25%) dan kandungannya akan sangat rendah bila kandungan kalium dalam tanah tinggi. Pada sapi perah di puncak laktasi, suplai natrium dari rumput mungkin tidak memenuhi kebutuhan jika kandungan kurang dari 0,04%.

Natrium berhubungan dengan penekanan tekanan osmotis di cairan ekstraseluler, sehingga perlu mengatur volume cairan tubuh. Ransum yang rendah Na atau kehilangan Na yang berlebihan melalui kelenjar keringat atau urin akan mengarah ke pengurangan yang cukup terhadap konsentrasi Na sangat rendah dalam kompartemen cairan ekstraseluler. Akibatnya air akan dipindahkan dari kompartemen ke sel-sel jaringan untuk mengembalikan keseimbangan osmotik. Sel-sel akan menjadi kelebihan air.

Kebutuhan Na untuk babi sedang bertumbuh meningkat dari 0,4 ke 1 g/hari, sejalan dengan bobot badan meningkat dari 5 kg menjadi 100 kg. Sapi perah pada masa kering membutuhkan 89/hari dan laktasi penuh 20 g per hari, kebutuhan untuk domba 1 g/hari.

##### b). Chlorida (Cl)

Fungsi utama mineral dalam tubuh dengan ion Na adalah memelihara tekanan asmotik cairan ekstraseluler, klorida adalah anion utama dalam cairan ekstraseluler dan sangat penting dalam

pemeliharaan kenetralan elektrokimia. Dalam hal ini keseimbangan asam-basa melalui perubahan dalam konsentrasi ion berkarbonat.

Kebutuhan Cl pada sapi dengan penambahan bobot badan 0,5 kg/hari meningkat dari 1,8 ke 10,9 g/hari sejalan dengan peningkatan bobot badan dari 50 ke 400 kg. Sementara untuk domba yang sedang bertumbuh berkisar antara 0,4–1,6 g/hari sesuai dengan bobot badan dan tingkat perkembangan.

c). Kalium (K)

Konsentrasi protein asal tumbuhan kaya akan kalium 1–2% dari berat segar. Kandungan kalium dan rumput sangat dipengaruhi oleh kandungan pupuk K yang diberikan pada tanah. Perbandingan K:Na pada tanaman dipupuk dengan pupuk kalium meningkat sampai 50 : 1

Fungsi kalium dalam tubuh adalah memelihara tekanan osmotik ruang cairan interseluler dan untuk fungsi normal sistem saraf dan peralatan. Ion kalium juga bertindak sebagai aktivator dalam fosforilasi yang penting untuk metabolisme karbohidrat.

d). Kalsium (Ca)

Banyak terdapat di kacang-kacangan, konsentrat asal ternak, tepung tulang dan tepung ikan. Sumber kalsium utama dalam tubuh (99%) ditemukan pada kerangka dalam bentuk senyawa yang mengandung fosfat. Sebagian dari kalsium tulang adalah lebih dan dalam keseimbangan dengan ion-ion Ca dalam plasma. Plasma darah mengandung 2,1–2,6 ml kalsium per liter, setengahnya dalam bentuk kalsium terionisasi, dan sisanya dalam bentuk ikatan kalsium-protein. Jika pH turun (asidosis) ion Ca menurun. Pada ternak sedang menyusui, jumlah kalsium disekresikan dalam susu. Pada sapi perah, konsentrasi Ca dalam darah turun 0,3–0,4 mml/liter setelah pemerahan. Konsentrasi kalsium di bawah 1,2 ml akan menuju ke suatu kondisi yang disebut "*milk fever*".

Kalsium sangat penting untuk perkembangan kerangka dan sebagai aktivator enzim. Ca juga memainkan peranan penting dalam berbagai proses termasuk kontraksi otot dan koagulasi darah.

e). Fosfor (P)

Bahan makanan asal ternak mempunyai kandungan fosfor yang tinggi dan biasanya dalam bentuk tersedia. Pakan umum seperti tepung ikan, tulang dari daging merupakan sumber fosfor tertinggi. Biji-bijian biasanya mengandung 0,3–0,4% fosfor, sementara jerami sangat rendah akan fosfor.

Secara fisiologi fosfor berkaitan erat dengan kalsium. Namun demikian, antara 20 dan 25 g fosfor dalam tubuh terdapat dalam jaringan-jaringan lemak, sebaliknya dengan kalsium, hanya 1% yang ditemukan pada jaringan lain dibanding pada gigi dan tulang.

Fosfor banyak terlibat dalam berbagai proses metabolisme, terdapat dalam proses metabolisme intermedit dalam sintesis, degradasi karbohidrat protein, dan asam nukleat.

Pada ternak nonruminansia telah dibuktikan bahwa peningkatan nisbah Ca:P dalam ransum berpengaruh dengan penyerapan fosfor, sebaliknya nisbah fosfor yang tinggi terhadap kalsium dapat membatasi penyerapan kalsium.

Besarnya pengaruh ini berbeda-beda antara spesies dan bergantung pada status vitamin D dalam tubuh ternak. Pengaruh menjadi lebih besar bila konsumsi vitamin, P adalah rendah. Pada anak ayam nisbah optimum Ca:P adalah antara 1,5:1 dan 2:1 bila dihitung berdasarkan ketersediaan fosfor. Pada babi yang sedang bertumbuh, perubahan nisbah Ca:P dari 1:1 ke 2:1 mempunyai pengaruh kecil terhadap penggunaan Ca dan P, di mana nisbah di atas 2:1 mempunyai pengaruh negatif terhadap penggunaan fosfor.

Pada ruminansia sedang tumbuh kelihatannya kurang peka terhadap perubahan nisbah Ca:P dan nisbah meningkat sampai 8:1, meskipun demikian nisbah unsur ini dalam tubuh sekitar 1,8:1 dan pada susu 1,4 :1. Pada sapi yang sedang tumbuh dengan bobot badan dari 0,3 ke 1,0 kg/hari pada kondisi yang sama, kebutuhan fosfor meningkat dari 5 sampai dengan 13 gram/hari.

f). Magnesium (Mg)

Semua bahan makanan mengandung magnesium, konsentrasi protein asal hijauan biasanya mengandung magnesium 0,4–0,6 % dari bahan kering. Rumput dan kacang-kacangan juga kaya akan magnesium. Magnesium memainkan peranan penting pada banyak enzim yang memindahkan dan menguraikan kelompok fosfat. Magnesium juga terlibat dalam dekarboksilasi enzimatik, hidrolisa protein, dan peptida. Hiperiritabilitas dan kekejangan merupakan tanda khusus kekurangan magnesium pada semua jenis ternak, ini menunjukkan Mg membantu memelihara fungsi saraf normal. Magnesium juga untuk fungsi otot dan kelelahan otot sering terjadi pada ternak yang kekurangan Mg. Pada sapi perah, kekurangan Mg menyebabkan sebuah penyakit yang disebut "*grass tetany*". Kebutuhan Mg bergantung pada status fisiologis ternak. Kebutuhan dari sapi potong dengan berat 500 kg terletak antara 8 sampai 10 gram, bergantung pada tingkat pertumbuhan. Pada sapi perah dengan berat yang sama memproduksi susu 20 kg per hari, kebutuhan mencapai 20 gram.

g). Belerang (S)

Pada semua jenis ternak, belerang sangat penting dalam metabolisme protein, terutama protein yang mengandung asam amino *cystin*, *cystein*, dan *methionin*. Pada ternak ruminansia, belerang penting bila urea digunakan sebagai substitusi nitrogen untuk nitrogen protein. Pada kondisi ini, penambahan sulfur pada ransum yang mengandung

urea menguntungkan penggunaan belerang anorganik yang diberikan harus memperhatikan nisbah nitrogen terhadap belerang, yaitu optimal 10 : 1.

#### h). Besi (Fe)

Zat besi ditemukan pada semua jenis pakan, tetapi sumber utama adalah rumput dan jerami. Hanya sekitar 5–20% dari besi dalam makanan dapat digunakan oleh ternak. Besi dari zat besi yang ada di tubuh ternak 60% ditemukan dalam hemoglobin eritrosit. Besi juga terdapat pada mioglobin otot dalam protein-feritrin, pada berbagai enzim dan ikatan  $\alpha$  globulin transferin dalam plasma.

#### i). Seng (Zn)

Seng (Zink) merupakan bagian dari banyak enzim, zink terlibat dalam sintesis asam nukleat dan protein, serta metabolisme nukleopolisakarida.

Pada sapi, kambing, dan babi, kekurangan zink menyebabkan penyakit parakertosis dimanifestasikan dengan memerahnya kulit, diikuti oleh erupsi yang berkembang menjadi *scabies*.

#### J). Tembaga (Cu)

Semua hijauan makanan ternak mengandung tembaga, tetapi jumlahnya tergantung pada kandungan Cu dalam tanah. Banyak Cu dalam plasma darah berhubungan dengan globulin. Sisanya tembaga dalam plasma terikat longgar dengan albumin dan longgar ikatan fraksi ini memulai peningkatan pengambilan Cu. Organ-organ tertentu seperti hati, ginjal, dan limfa mempunyai konsentrasi yang lebih tinggi daripada jaringan lain. Cu merupakan sebuah aktivator enzim-enzim penting dan diperlukan untuk sintesis hemoglobin. Kekurangan Cu lebih umum pada ruminansia dibandingkan dengan nonruminansia, ditimbulkan baik dari rendahnya pengambilan Cu atau dari faktor yang

ada dalam ransum berpengaruh terhadap penggunaan Cu. Kekurangan Cu pada sapi dicirikan oleh pertumbuhan yang lambat, anemia, rapuhnya tulang, dan terkadang diare. Pada domba, kekurangan Cu menyebabkan penekanan tingkat pertumbuhan dan anemia.

Meskipun demikian pengaruh yang sangat nyata terjadi selama akhir kebuntingan dan awal *post* natal. Pada anak domba, kekurangan Cu menyebabkan perubahan ke generasi pada jaringan saraf, buta, inkoordinasi kaki belakang, dan imobilisasi tubuh.

#### k). Cobalt (Co)

Co dalam jumlah kecil tersebar luas pada hijauan makanan ternak. Jumlah Co pada tanaman bergantung pada kandungan Co dalam tanah di mana tanaman tumbuh.

Co merupakan bagian penting dari molekul vitamin B-12. Co menambah peranan vitamin B-12 dalam pembentukan sel darah merah dan biosintesis purin. Perannya dalam metabolisme propionat jaringan adalah sangat penting untuk ruminansia karena propionat yang dihasilkan dalam rumen merupakan sumber energi untuk ternak ruminansia. Vitamin B-12 diperlukan untuk mengubah propionat ke suksinat yang merupakan intermedia dalam siklus trikarboksilat. Kekurangan *Cobalt* pada ruminansia memperlihatkan gejala kurus dan kehilangan nafsu makan yang akhirnya kekurangan darah. Penyakit ini umum terjadi pada daerah konsentrasi *cobalt* turun di bawah 0,08 ppm.

#### l). Yod (I)

Yod ditemukan dalam jumlah kecil pada banyak hijauan ternak. Sumber terbaik yod adalah rumput laut dan tepung ikan. Pada daerah tertentu yang jauh dari laut kandungan yod dalam tanah sangat rendah. Fungsi yod adalah bahan penyusun hormon tiroksin yang dihasilkan oleh kelenjar tiroid.

m). Mangan (Mn)

Mangan sangat penting sebagai aktivator reaksi enzim tertentu yang berhubungan dengan metabolisme karbohidrat, protein, dan lemak. Mangan tersebar luas dalam makanan, sumber makanan yang kaya mangan adalah dedak padi dan kulit gandum. Tanda khusus dari kekurangan mangan adalah tidak normalnya pembentukan tulang yang disebut perosis atau *slipped* tendon pada unggas, dan pada sapi disebut *Red Calf Syndrome*.

## B. Pencernaan pada Ternak dengan Lambung Sederhana

### 1. Pencernaan oleh Enzim dan Air Ludah

Air ludah mempunyai fungsi membasahi makanan, melicinkan oesophagus, dan mulai pencernaan pati. Air ludah disekresikan dari kelenjar air ludah di mana sekresinya dimulai setelah beberapa gerakan mengunyah.

Tingkat sekresi air ludah dapat beradaptasi terhadap jenis makanan yang dimakan. Makanan kering menimbulkan sekresi air ludah yang kental di mana volumenya lebih sedikit dibandingkan dengan kebutuhan makanan basah. Jumlah volume rata-rata yang disekresikan sekitar 15 liter/hari pada babi, 40–50 liter/hari pada kuda.

Rangsangan untuk sekresi air ludah berasal dari reseptor dalam mulut, kelenjar menerima serabut saraf simpatik dan parasimpatik. Rangsangan serabut parasimpatik meningkatkan suplai darah ke kelenjar dan menyebabkan sekresi dalam jumlah yang besar. Rangsangan simpatik menurunkan suplai darah, menghambat aliran air ludah atau menyebabkan sekresi mukus air ludah. Pada ternak dengan lambung sederhana air ludah mempunyai pH 6,8–7,4, sedangkan pada ruminansia air ludahnya lebih basa dengan pH 8,1–8,8. Hal ini disebabkan oleh konsentrasi yang tinggi dari bikarbonat dan *phosphat* yang membuat air

ludah ruminansia. Aktivitas menelan secara arbitrer dibagi ke dalam tiga tahap. Tahap pertama kontrol volume sesudah makan, dikunyah dan dicampur dengan air ludah dibentuk sebuah bolus dan ditempatkan di bagian atas lidah. Lidah kemudian mengangkat ke langit-langit mulut, bolus digerakkan menuju pharink, pada waktu yang sama langit-langit lunak digerakkan menutup lubang hidung posterior dan dasar lidah menekan bolus masuk ke dalam pharink. Bolus masuk ke pharink di mana menyentuh daerah peka yang secara refleks memulai tahap ke-2, perjalanan bolus melalui pharink untuk menjaga makanan di luar dari aliran udara respirasi secara refleks dihambat dan pharink ditutup. Pharink dipendekkan dan kontraksi peristaltik otot-otot pharink yang menekan bolus ke dalam oesophagus. Tahap ke-3 terdiri atas sifat refleks peristaltik oesophagus yang dimulai oleh tekanan makanan dalam oesophagus. Makanan padat dibawa ke lambung pada kecepatan 3–4 cm/detik. Ternak dengan lambung sederhana mencakup karnivora, omnivore, dan beberapa herbivora. Beberapa perbedaan terlihat dalam fungsi lambung karena jenis makanan bervariasi pada ternak-ternak ini. Lambung dapat dibagi menjadi tiga bagian sesuai dengan tiga jenis makanan yang berbeda. Bagian mulut lambung dikenal sebagai kardiak, mengandung mukus kelenjar, kelenjar ini menghasilkan sekresi mukus bersifat basa yang mengandung enzim. Sekresi kelenjar kardiak tidak membantu banyak terhadap jumlah total cairan lambung. Fungsi utama sekresi ini adalah melindungi mukosa lambung terhadap asam klorida yang disekresikan dari kelenjar fundus. Bagian tengah dari lambung disebut fundus yang menghasilkan banyak cairan lambung. Kelenjar ini panjang, tubulus, sempit yang mengandung tiga tipe sel yaitu sel-sel kepala, sel-sel parietal, dan sel-sel leher mukus. Sel-sel kepala bertanggung jawab untuk ekresi enzim, sel-sel parietal untuk sekresi asam klorida (HCl) dan sel leher mukus untuk produksi mukus. Bagian pektoral lambung, visorus mengandung kelenjar yang menghasilkan sekresi mukus.

Sekresi cairan lambung adalah intermitten pada ternak yang sedang istirahat dengan lambung kosong, praktis sekresi tidak terjadi. Sekresi dimulai setelah ternak mulai makan, fase sekresi cairan lambung ini dikenal sebagai fase cephalik. Fase ini dikontrol oleh neuron aferen dari cita rasa dalam mulut dan neuron aferen dalam saraf vagus. Sekresi mulai 2–3 menit sesudah makanan masuk mulut dan berlangsung selama 1–2 jam. Jika makanan lebih dari 1–2 jam sekresi berlanjut.

Bila sebagian makanan yang dicerna mencapai rongga pilorus, sebuah hormon gastrin disekresikan dari membran mukus darah. Gastrin ini dibawa dalam darah ke fundus di mana ia merangsang sel. Untuk menghasilkan cairan lambung, makanan berlemak menghambat sekresi lambung, lemak merangsang mukosa duodenum untuk melepaskan hormon GIP (*Gastric Inhibitory Peptide*) yang menghambat sekresi HCl dan pepsin dari lambung. Bila lambung kosong, lambung berkontraksi sempurna, bila penuh kontraksi tonik siap terjadi terus-menerus dengan 2–3 gelombang/menit. Kontraksi berasal dari daerah kardiak dan berkembang menuju pilorus menyebabkan makanan yang telah dicerna (cime) mencapai rongga pilorus, di mana pengaruh kontraksi bercampur. Hanya partikel-partikel halus melewati duodenum dan ini membutuhkan pembukaan otot spincter selama evakuasi.

Gerakan lambung diatur oleh sistem saraf autonom, rangsangan saraf vagus meningkatkan motilitas dan rangsangan saraf simpatik menghambat motilitas.

Pengosongan lambung, pengosongan makanan dari lambung sesudah makan segera sesudah cime dialirkan melalui pilorus, begitu dimulai pengosongan diproses secara ritmik dan sejumlah kecil dievakuasi pada suatu waktu, tingkat pengosongan bergantung pada

materi dalam duodenum. Baik volume dan komposisi kimia kandungan duodenum adalah penting menghambat pengosongan lambung, penghambat kimia yang efektif adalah lemak, asam-asam lemak, peptida, asam amino, ion hydrogen, dan gula. Pengaruh substansi dalam duodenum adalah mengurangi gerakan peristaltik otot-otot lambung. Hal ini mengurangi gradien tekanan otot lambung dan duodenum yang berkembang pada setiap siklus kontraksi lambung dan bertanggung jawab untuk lewatnya cairan melalui pilorus.

## **2. Proses Pencernaan dalam Lambung**

Lambung karnivor kosong dalam beberapa jam setelah makan, sementara kuda dan babi membutuhkan untuk mengosongkan lambung yang berisi. Bila mereka makan masih terdapat beberapa material dari makanan yang terakhir tinggal dalam lambung, makanan yang baru ditelan akan diatur di lapisan atasnya. Aktivitas mencampur ini, pada lambung terjadi di daerah pilorus di mana gelombang peristaltik bekerja melalui dinding lambung cukup lama dari makanan yang datang untuk kontak dengan cairan lambung.

Pemecahan pati yang dipercepat oleh amilase saliva akan terus untuk beberapa waktu dalam lambung. pH optimum untuk amilase saliva adalah 7, tetapi hidrolisa akan terus pada tingkat ditolerir sampai pH turun 4,5. Proses pencernaan lambung ini dinamakan fase amilolitik. Enzim-enzim lain yang bekerja pada karbohidrat juga akan menjadi aktif pada periode ini. Kerja enzim adalah memecah pati dan polisakarida, selulosa tidak dicerna pada lambung sederhana. Cairan lambung merembes ke makanan dan pH turun sehingga menghambat amylase. Hal ini merangsang kerja pepsin yang mempunyai pH optimumnya sekitar 2.

Selama fase ini, fase amiloproteolitik, baik pati dan protein diuraikan. Bila pH turun terus, amilase secara sempurna dihambat dan

pepsin yang aktif. Selama fase ini, protein dihidrolisa menjadi polipeptida.

### 3. Pencernaan pada Usus Halus

Usus halus dimulai dari duodenum dan jejunum, ileum, cime dicampur oleh kontraksi dan relaksasi bagian-bagian dari usus halus pada interval kontraksi segmen yang diinstruksi oleh kontraksi peristaltik yang memindahkan cime masuk ke dalam saluran pencernaan. Dua kelenjar besar berhubungan dengan duodenum, hati, dan pankreas terdapat sekresi mengalir terus-menerus oleh cairan empedu dari hati. Cairan empedu disimpan dalam kantung empedu mengikuti rangsangan untuk tetap kantong empedu berkontraksi dan mengeluarkan isinya ke dalam duodenum.

Empedu mengandung garam-garam empedu dan berbagai bahan organik. Garam-garam empedu adalah garam-garam natrium dan kalium dari asam glycocholic dan taurocholic. Komponen utama bahan organik adalah *phospholitic*, kolesterol dan segmen empedu bilirubin dan biliverdin. Reaksi empedu adalah basa lemaknya dengan pH 7–8. Garam empedu bersama dengan lemak dari empedu memainkan peranan penting dalam pencernaan lemak di usus. Garam empedu mampu membentuk emulsi halus yang stabil di mana lemak makanan labil, mudah diserang oleh enzim-enzim pankreas. Berbagai senyawa mampu merangsang pembentukan empedu oleh hati. Rangsangan oleh reabsorpsi garam empedu sangat penting. Penyerapan lemak dan asam amino juga akan meningkatkan pembentukan empedu selama pencernaan. Adanya makanan dalam duodenum menyebabkan pelepasan hormon sekretin yang mempunyai rangsangan terhadap pembentukan empedu.

## RINGKASAN

1. Cairan internal tubuh hewan yaitu cairan selom, darah, dan cairan di dalam dan di antara sel dipelihara dalam keadaan relatif konstan, baik volume maupun kandungannya.
2. Pengaturan tubuh interna dapat dipersulit dengan adanya ekskresi limbah nitrogen yang pembuangannya memerlukan air. Sebagian besar limbah nitrogen adalah hasil deaminasi asam amino yang digunakan sebagai bahan bakar sel. Amonia produk yang beracun dan mempunyai daya larut tinggi dari deaminasi dikeluarkan langsung jika terdapat cukup air untuk mengencerkannya. Pada sebagian hewan amonia menjadi asam urea yang kurang beracun, tetapi perubahan ini memerlukan energi.
3. Ternak seperti hewan mamalia dan unggas mempunyai alat ekskresi tubulus yang memekat limbah nitrogen. Proses pemekatan melibatkan modifikasi cairan selom atau filtrat darah dengan reabsorbsri selektif dan sekresi.
4. Pengeringan, terutama penguapan dari kulit dan alat pernapasan adalah masalah utama dalam pengaturan cairan tubuh internal hewan darat. Berbagai strategi pengaturan telah berkembang yang membantu keseimbangan air yang hilang dengan air yang didapat.
5. Kandungan kalsium dalam darah selalu ada dalam keseimbangan. Pengaturan keseimbangan melibatkan berbagai hormon terutama para hormon yang bertindak hiperkalsemia dan kalsitonin yang mempunyai aktivitas hipokalsemia. Derivat vitamin D membantu peroses penyerapan dalam saluran pencernaan.
6. Dalam ginjal mamalia tiap nefron, unit structural, dan fungsional ginjal menerima filtrat dari satu simpul kapiler, glomerulus. Filtrat tersebut pada hakikatnya menyerupai plasma tanpa protein yang besar. Diterima dalam satu kapsul (kapsul Bowman) dan melalui tubulus, di mana glukosa, zat makanan lain, sedikit garam dan 90%

air direabsorpsi.

7. Ginjal mamalia dapat menghasilkan urin yang hipoosmotik atau hiperosmotik terhadap darah, bergantung pada cairan internalnya. Suatu urin hiperosmotik dihasilkan oleh putaran tusuk konde dari putaran Henle yang memungkinkan adanya gradien konsentrasi dari zat yang larut dan terjadinya ekskresi sejumlah besar air dari cairan dalam arus balik di tubulus penampung. Putaran Henle hanya terdapat pada ginjal burung dan mamalia, sedangkan vertebrata lain (ikan, amfibi dan reptil) tidak dapat menghasilkan urin dengan konsentrasi lebih tinggi dari pada konsentrasi darah.
8. Pengaturan terpadu dari osmolaritas dan volume cairan ekstraseluler pada mamalia melibatkan berbagai proses, yaitu kerja hormon (ADH, Aldosteron, dan sistem renin-angiotensin) dalam memelihara keseimbangan hidromineral dan sistem saraf pusat dalam mengatur tingkah laku minum.

Latihan berikut ini sengaja disusun untuk memantapkan Anda terhadap materi yang dibicarakan. Kerjakan latihan berikut dengan sungguh-sungguh!

1. Jelaskan dengan sebuah contoh bahwa cairan tubuh selalu ada dalam keseimbangan!
2. Bagaimana seekor ternak dapat mempertahankan cairan tubuhnya bila ditempatkan pada daerah yang kering dan panas?
3. Apa sebabnya limbah nitrogen merupakan masalah dalam metabolisme hidromineral?
4. Apa peranan kalsium dalam tubuh?
5. Jelaskan mekanisme pengaturan keseimbangan kalsium!
6. Jelaskan prinsip umum dalam pembuatan urin pada ginjal!
7. Apa peranan dari glomerulus, nefron, putaran Henle, dan tubulus kontortus proksimal dan distal dalam proses pembuatan urin?

8. Apa yang dimaksud dengan laju pembersihan?
9. Mengapa urin dari hewan mamalia hipertonis terhadap darah?
10. Jelaskan mekanisme pengaturan terpadu dalam mempertahankan osmoalritas dan volume cairan ekstrasel!

# **BAB VIII METABOLISME HIDROMINERAL DAN EKSKRESI AMONIAK (NH<sub>3</sub>)**

Pada sejumlah organisme, pemeliharaan keseimbangan osmosis sangat diperlukan untuk memelihara lingkungan internal yang stabil. Stabilitas komposisi lingkungan internal dijaga oleh sejumlah peranan dari sistem pengaturan dan metabolisme hidromineral. Sebagai contoh, meskipun kemungkinan kekurangan air sangat terbatas dibandingkan dengan kekurangan energetik (kalori), teknik penghematan air sangat tersebar pada organisme darat seperti reabsorpsi air oleh ginjal dan membatasi evaporasi. Konsumsi air harian oleh individu mamalia adalah 30 kali lebih rendah dibandingkan dengan satu tumbuhan pada unit masa yang sama.

Pada bab ini akan dibahas tentang pengaturan cairan internal, mekanisme ekskresi amoniak, homeostasi kalsium ekstrasel, dan fisiologi ginjal. Setelah mengikuti kuliah bab ini, Anda diharapkan akan mempunyai kemampuan-kemampuan berikut.

1. Menjelaskan bagaimana cairan internal dalam tubuh selalu dalam keadaan relatif konstan dan kendala-kendala cara pemeliharaannya.
2. Menjelaskan permasalahan hidratisasi pada hewan darat dan strategi penanganannya.
3. Menjelaskan mekanisme keluarnya limbah nitrogen hasil metabolisme protein.
4. Menjelaskan proses pembentukan urin.

## A. Volume dan Komposisi Cairan Tubuh

Cairan internal tubuh hewan yaitu cairan selom (rongga khusus), darah, cairan di dalam dan di antara sel dipelihara dalam keadaan relatif konstan, baik volume maupun kandungannya. Organisme hidup sebagian besar terdiri atas air. Seorang laki-laki dewasa dengan bobot badan 70 kg mengandung 49 liter air, kira-kira 35 liter di antaranya ada di dalam sel dan selebihnya adalah cairan ekstrasel tubuh. Volume cairan tubuh selalu dalam keadaan keseimbangan dinamis dan tersebar dalam berbagai kompartimen dan setiap hari terjadi pertukaran (Tabel 8.1). Volume darah mamalia dan unggas berkisar antara 7–10% (termasuk sel-sel darah) dari bobot badan. Hewan dengan ukuran besar mempunyai proporsi darah yang umumnya rendah. Untuk hewan yang sistem sirkulasi terbuka, volume darah digabung pada permukaan luas ekstrasel.

Beberapa cairan ekstrasel terdapat dalam ruang kecil antara sel, yang lainnya terdapat dalam rongga khusus seperti selom dan sebagian besar terdapat dalam sistem pembuluh darah. Komposisi cairan ekstrasel ada dalam keseimbangan osmotik dengan lingkungan intrasel serta mengandung garam-garam dan protein (Tabel 8.1).

Tabel 8.1 memperlihatkan bahwa kandungan natrium, *chloride*, dan glukosa pada cairan ekstrasel jauh lebih tinggi dibandingkan dengan cairan intrasel, sedangkan kandungan kalium, magnesium, fosfat, dan protein lebih tinggi pada cairan intrasel. Menjaga keseimbangan antara air yang hilang air yang diperoleh merupakan suatu proses yang rumit tidak seperti kita perkirakan. Beberapa faktor penting yang dapat menghambat regulasi cairan internal tubuh, yaitu (1) kadar garam mineral lingkungan tempat hewan itu hidup, (2) kebutuhan air untuk proses-proses fisiologis tertentu, (3) kebutuhan untuk memelihara keseimbangan garam internal, dan (4) pembuangan limbah nitrogen.

Tabel 8.1 Komposisi kimia cairan ekstrasel dan intrasel

Zat Kimia	Cairan Ekstrasel	Cairan Intrasel
Na <sup>+</sup> (mEq/l)	142.0	10.0
K <sup>+</sup> (mEq/l)	4.0	140.0
Ca <sup>++</sup> (mEq/l)	2.4	0.0
Mg <sup>++</sup> (mEq/l)	1.2	58.0
Cl <sup>-</sup> (mEq/l)	103.0	4.0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mEq/l)	28.0	10.0
Fosfat (mEq/l)	4.0	75.0
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mEq/l)	1.0	2.0
Glukosa (mg/dl)	90.0	0 – 20
Asam amino (mg/dl)	0.0	200.0
Kolesterol		
Fosfolipid	0.5	2 - 5.0
Lemak netral		
PO <sub>2</sub> (mm Hg)	35.0	20.0
PCO <sub>2</sub> (mm Hg)	46.0	50.0
pH	7.4	7.0
Protein (gr/dl)	2.0	16.0
(meq/l)	5.0	40.0

Sumber: Guyton AC (1991)

## B. Memelihara Keseimbangan Hidromineral

Hewan darat mempunyai kemudahan dalam mendapatkan oksigen, tetapi sebaliknya mereka mendapat hidrasi permanen setelah evaporasi yang terjadi pada tingkat pembungkus tubuh (kulit) bila dapat dilewati air dan pada tingkat paru-paru. Bahaya menjadi kering adalah masalah utama bagi hewan darat. Air hilang melalui urin dan feses, tetapi penguapan adalah jalur utama hilangnya air. Pada suhu tertentu satu volume udara tertentu mampu mengandung sejumlah tertentu uap

air. Perbedaan antara uap air yang sebenarnya ada dan jumlah yang ada jika udara itu jenuh disebut defisit kejenuhan.

Defisit kejenuhan menentukan curamnya gradien penguapan antara hewan dan lingkungan luar dan bergantung pada musim, iklim, habitat, dan waktu dalam sehari. Semuanya memengaruhi distribusi dan tingkah laku hewan darat.

Pada hewan endoterm (burung dan mamalia) mempunyai kendala secara fisiologis dalam melibatkan pengaturan cairan tubuh yang kompleks dan osmolaritas lingkungan internal, misalnya kontrol temperatur tubuh internal yang mengundang pergerakan cairan tubuh. Jadi kekurangan cairan tubuh sangat peka dimodulasi melalui transpirasi atau pertukaran panas (Bab Thermofisiologi) dan ginjal merupakan alat kontrol yang efektif dalam ekskresi amoniak ( $\text{NH}_3$ ) dan mineral-mineral terlarut.

Kemampuan adaptasi terhadap lingkungan yang kekurangan air adalah melalui pemanfaatan semaksimal mungkin minuman. Sebagai contoh, tikus kanguru yang banyak terdapat di padang pasir di barat daya Amerika Utara dalam memenuhi kebutuhan airnya dengan menggantungkan diri pada air yang dihasilkan oleh oksidasi makanan ( $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ ). Hewan tersebut tidak mempunyai kelenjar keringat, feses mengandung sedikit air, dan putaran Henle yang memanjang dapat menghasilkan urin hiperosmotik.

Pada hewan darat telah berkembang berbagai adaptasi yang meningkatkan kemungkinan pemeliharaan suatu keseimbangan antara air yang hilang dengan yang diperoleh. Strategi pokok penyesuaian yang pokok adalah sebagai berikut.

- Pengurangan penguapan melalui: (a) alat pertukaran gas internal, (b) modifikasibarier integumen, (c) menempati habitat basah, dan (d) kegiatan malam (nokturnal).

- Pengurangan hilangnya air dari ekskresi: (a) produksi limbah nitrogen yang tidak dapat larut, (b) produksi urin hiperosmotik, dan (c) keluaran urin yang rendah.
- Pengurangan hilangnya air dari egesi. Sebagai contoh, hewan yang hidup di gurun, menghemat air dengan membuat feces relatif kering.
- Toleransi terhadap hilangnya air internal.
- Pemanfaatan air oksidasi. Sebagai contoh, oksidasi 100 gram glukosa menghasilkan 60 gram air.

Sebagai contoh model adaptasi terhadap lingkungan yang miskin air adalah kehidupan tikus kanguru (*Dipodomys spectabilis*) yang hidup di Gurun Amerika Utara, di mana kebutuhan airnya hanya dipenuhi dengan memakan biji-bijian (kandungan airnya < 10%) dan merupakan air metabolis yang dihasilkan dari oksidasi bahan makanan menghasilkan H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub>. Adaptasi pada kehidupan gurun pasir ini memengaruhi terhadap kerja ginjal yang menghasilkan urin sangat hipertonis terhadap plasma darah (5.500 mOsmol per liter vs 300–1200 mOsmol/l pada sebagian besar mamalia).

### **C. Ekskresi Amoniak**

Pengaturan metabolisme hidromineral bermanfaat bagi pencegahan kekurangan air, di mana cairan tubuh sangat penting pada sejumlah hewan untuk membuang berbagai limbah metabolis, terutama amoniak yang berasal dari katabolisme.

Metabolisme oksidasi karbohidrat dan lemak menghasilkan air dan karbon dioksida, sebaliknya metabolisme protein dan asam-asam nukleat menghasilkan substansi nitrogen, seperti amoniak, urea, asam urat dan beberapa molekul dalam jumlah sedikit pada spesies tertentu

seperti kreatinin, asam hipurat, dan asam paraaminovipurat. Deaminasi asam amino terjadi dalam reaksi yang mengganti gugus amino dengan atom oksigen, mengubah asam amino menjadi asam keto.

Hati dan ginjal adalah tempat utama metabolisme asam amino pada vertebrata. Gugus amino yang dikeluarkan dalam proses deaminasi, timbul sebagai suatu molekul amonia yang beracun dan tidak boleh ditimbun serta harus dikeluarkan. Beberapa spesies hewan mengeluarkan limbah nitrogen yang kompleks, tetapi kurang beracun yang disintesis dari amonia dengan proses yang membutuhkan energi (ATP). Urea merupakan suatu senyawa sederhana yang disintesis dari karbon dioksida, dua gugus amino, dan 3 ATP adalah hasil limbah pada mamalia, amfibia dalam hati oleh suatu rangkaian reaksi (Gambar 8.2).

## **D. Homeostasis Kalsium Ekstraseluler**

Konsentrasi kalsium dalam darah (kalsemia) merupakan satu parameter yang stabil pada sejumlah hewan. Nilai kalsemia berkisar antara 2,2–2,6 mmol per liter (8,8–10,4 mg untuk 100 cc). Kalsium adalah unsur dalam jumlah banyak pada semua organisme diperkirakan 2% dari bobot badan pada manusia. Pengaturan kalsemia sangat erat hubungannya dengan ion  $\text{HPO}_{42-}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$ . Pengaturan kalsemia adalah contoh suatu kontrol yang dilakukan oleh kerja sama antara tiga hormon penting.

### **1. Peranan Fisiologis Kalsium**

Peranan mediator yang dinamis oleh Ca telah dibahas pada bab sebelumnya. Di antara berbagai proses dalam tubuh, di mana  $\text{Ca}^{2+}$  terlibat sebagai agen pengikat dalam penyusunan mikrobutubul, proses eksitasi neuro maskular, permeabilitas seluler, kohesi antara sel-sel epitel, pembelahan sel, rangsangan kontraksi, sekresi, dan sejumlah mekanisme lain seperti respons hormonal terhadap berbagai rangsangan, koagulasi darah, dan sejumlah reaksi enzimatik.

Kalsium dalam darah terdapat dalam tiga bentuk berikatan dengan protein (Ca-Prot) (40 %), senyawa kompleks yang dapat berdifusi sekitar 10% dan ion kalsium (Ca<sup>2+</sup> sekitar 50 %). Dari aspek fisiologis ion kalsium yang memegang peranan penting. Ion Ca<sup>2+</sup> ada dalam keseimbangan dengan bentuk lain dari kalsium darah, terutama dengan Ca-Prot. Nilai konstanta pada T = 25°C dan pH 7,35 adalah:

$$K = \frac{(\text{Ca}^{2+}) (\text{Prot}^-)}{\text{Ca Prot}} = 10^{-2,2}$$

Adanya keragaman protein plasma terutama albumin akan berpengaruh terhadap koensentrasi Ca<sup>2+</sup>. Gangguan fisiologi secara umum pada organ mungkin disebabkan adanya perubahan ion Ca ekstra seluler. Perubahan keseimbangan asam basa atau eksitasi rikme perubahan waktu juga menyebabkan perubahan Ca<sup>2+</sup> dalam darah.

**2. Hormon dan Pengaturan Kalsemia**

Keseimbangan kalsium suatu kompartimen adalah hasil kalsium yang masuk dan yang keluar. Pergerakan kalsium pada hewan vertebrata terjadi antara berbagai kompartimen, misalnya pada saluran alat pencernaan, cairan ekstraseluler, cairan intraseluler, jaringan tulang dan ginjal. Kalsium masuk ke dalam organisme melalui penyerapan alat pencernaan dan meninggalkan lingkungan internal melalui ekskresi urin atau disimpan dalam jaringan tulang.

Berbagai kelenjar endokrin berpartisipasi di dalam pengaturan kalsemia dan signal pengaturan yang penting adalah konsentrasi Ca<sup>2+</sup> plasma darah (umpan balik negatif).

Parahormon (PTH) yang dihasilkan oleh sel-sel utama dari kelenjar tiroid merupakan hormon polipeptida tersusun dari 84 asam amino. Sekresi dan sintesis parahormon sangat bergantung pada konsentrasi Ca<sup>2+</sup> lingkungan ekstraseluler.

Ketika terjadi penurunan kalsemia, sekresi PTH sangat cepat dan pengaruh hormon ini adalah sebagai berikut.

1. Pada konsentrasi tinggi, PTH merangsang aktivitas fagositosis dari osteoklas (sel-sel yang terlibat dalam penguraian jaringan tulang) dan sekresi enzim hialuronidase yang diekspresikan oleh penguraian matrik tulang, melepaskan kalsium, dan komponen-komponen bahan organik (hidroksiprolin yang terbentuk oleh hidrolisa kolagen ditemukan dalam urin setelah proses tersebut). Pada konsentrasi basal PTH akan mempunyai pengaruh pelepasan tulang.
2. PTH merangsang sintesis 1,25 dehidroksikolekalsiferol dan prekursor 25 dehidroksi, pada tingkat sel ginjal tubulus kontortus proksima dan **pars rekta**. Derivat 1,25 hidroksi dapat berpengaruh terhadap bagian tubulus yang terletak pada ujung tempat sintesis.
3. Pengaruh PTH terhadap ginjal adalah peningkatan reabsorpsi  $\text{Ca}^{2+}$  pada tingkat nefron dan menghambat  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Akibatnya peningkatan kalsemia selalu disertai penurunan fosfatemia.

Kalsitonin adalah hormon yang dihasilkan oleh sel-sel para folikel (sel C) dari kelenjar tiroid dan terbentuk dari 32 asam amino. Kalsitonin disekresikan ketika level kalsium tinggi dalam darah plasma dan adanya rangsangan ketika hormon tertentu dari saluran pencernaan disekresikan (terutama gastrin). Pengaruh biologis kalsitonin adalah bertentangan dengan hormon PTH.

- Menghambat resorpsi tulang dengan menghalangi dalam beberapa menit aktivitas fagositosis osteoklas.
- Pengaruhnya terhadap ginjal terutama dalam pemeliharaan elektrolit  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$ .

Derivat Vitamin D. Dua bentuk vitamin D adalah vitamin D2 (ergokalsiferol) dan vitamin D3 (kolekalsiferol) yang keduanya sering

ditemukan dalam makanan. Kolekalsiferol juga dapat disintesis oleh kulit, dibuat dari 7 dehidro-Kolesterol setelah radiasi yang tepat oleh sinar ultra violet. Model sintesis lain adalah rangsangan oleh makanan yang kurang kalsium, tetapi pengaturan sintesis ini sangat kompleks dan bergantung pada level PTH.

Semua senyawa 25-dehidroksi yang terdapat dalam hati dapat diubah menjadi dua prekursor vitamin (vitamin D<sub>2</sub> vitamin D<sub>3</sub>). Berbagai peranan kedua hormon tersebut adalah penyerapan kalsium dan fosfat pada saluran pencernaan dan mineralisasi tulang (pada dosis rendah). Pada saluran pencernaan kedua vitamin terlibat dalam sintesis sebuah protein pengangkut kalsium (kalsium binding protein) yang memudahkan penyerapan kalsium dalam proses pencernaan. Interaksi antara tiga famili hormon dalam mengatur kalsemia diringkaskan pada

Estrogen mempunyai peranan hiperkalsemia yang sangat penting pada unggas, terutama pada proses vitelogenesis. Konsentrasi ion kalsium dalam darah tidak dipengaruhi oleh keragamannya secara periodik dari kalsemia. Pada unggas, kalsium diperlukan untuk pembentukan korban telur yang berasal dari tulang medula, tanpa diketahui mekanisme mobilisasinya, peningkatan penyerapan kalsium oleh usus berpartisipasi dalam peningkatan kalsium dalam kerabang telur.

## **E. Fisiologi Ginjal**

Ginjal sangat berperan dalam sistem urin yang menjaga lingkungan internal tubuh. Ginjal tidak hanya mengeluarkan hasil buangan metabolisme, tetapi juga membantu mengatur keseimbangan air, keseimbangan asam-basa, kadar elektrolit, dan kadar berbagai substansi dalam darah. Semuanya dicapai melalui penyaringan sejumlah besar cairan dan molekul-molekul kecil lainnya melalui

glomerulus. Sejumlah kecil zat-zat direabsorpsi oleh sel-sel tubulus, baik secara pasif melalui proses osmosis dan difusi maupun secara aktif melalui transpor aktif. Urin adalah hasil akhir yang terdapat dalam saluran pengumpul.

### **1. Struktur Anatomi Ginjal Vertebrata**

Ginjal vertebrata berfungsi atas prinsip ultrafiltrasi plasma darah diikuti dengan pertukaran berbagai zat terlarut sepanjang saluran bahan urin pada nefron. Ginjal vertebrata ini menerima darah cukup berlebihan, misalnya pada manusia, ginjal menerima sekitar 25% berat dari total darah yang dipompa dari jantung, sedangkan beratnya hanya 1/100 dari berat tubuh. Pada hewan vertebrata ini, ginjal merupakan sepasang organ yang terletak sebelah dorsal dari selom di kedua sisi aorta. Terdiri atas unit-unit yang disebut tubulus ginjal atau nefron yang ujungnya buntu dan menerima filtrat darah. Ujung proksimal tiap nefron yang disebut kapsul Bowman, merupakan bola berongga dari sel epitel skuama yang satu ujungnya terdesak ke dalam suatu simpul kapiler yang disebut glomerulus. Kapsul Bowman dan glomerulus merupakan korpuskelrenal. Dinding atau barrier filter, yang harus dilalui cairan agar dapat sampai pada lumen kapsul Bowman terdiri atas endotel bagian dalam kapiler yang mempunyai banyak pori besar, suatu membran dasar tengah, dan lapisan sel luar yang disebut podosif. Podosif adalah sel-sel besar dengan penyaluran primer dan sekunder yang menjalani satu dengan lainnya. Celah-celah di antara jalinan itulah jalur yang dilewati cairan. Pori endotel dan celah-celah podosit membuat *barrier* filter jauh lebih permeabel dari pada anyaman kapiler lain, tetapi masih dapat mencegah lewatnya molekul-molekul yang lebih kecil atau dengan berat molekul 40.000. Sisa nefron merupakan tubulus yang sebagian besar terdiri atas sel epitel kubus dan pada mamalia dibagi lagi menjadi suatu tubulus konvulus proksimal, putaran Henle, dan tubulus konvulasi distal. Suatu tubulus penampung menerima aliran dari beberapa nefron

menuju pelvis renal, yaitu suatu ruang dalam ginjal pada ujung proksimal ureter.

Putaran (putaran) Henle merupakan suatu bagian dari nefron dan ukuran sangat kecil, yang hanya ditemukan pada unggas dan mamalia, di mana peranannya dalam konsentrasi urin sangat penting. Vertebrata di mana ginjalnya tanpa putaran Henle tidak menghasilkan urin hipertonik dibandingkan dengan konsentrasi darah dan organ-organ lainnya sangat penting untuk mengeluarkan kelebihan zat-zat terlarut dalam darah.

## **2. Fisiologi Nefron**

Ultrafiltrat glomerulus mempunyai komposisi yang sama dengan plasma darah. Sekitar 20% dari plasma yang bersirkulasi pada glomerulus melewati nefron (bagian saringan) untuk membentuk urin primitif (bahan urin). Pada manusia, jumlahnya sekitar 200 per hari untuk 2 ginjal yang melibatkan proses reabsorpsi kurang lebih sama dengan plasma awal (yang disaring) karena organisme tidak membiarkan kehilangan cairan dan zat-zat yang terlarut dalam jumlah yang sama sehingga 99% air dan solute diabsorpsi selama 24 jam.

Reabsorpsi tubulus adalah selektif dan ditujukan pada konsentrasi hasil-hasil buangan dari metabolisme, seperti halnya urea dan mengambil solute (zat-zat terlarut, seperti glukosa dan berbagai ion (1,5 s/d 2 kg NaCl direabsorpsi per hari oleh manusia).

Sekresi tubulus telah diketahui untuk berbagai zat, sebagai contoh obat-obatan tertentu atau ion-ion (H<sup>+</sup>, NH<sup>4+</sup>), sebanding dengan pengaturan keseimbangan asam-basa.

### **2.1 Filtrasi Glomerulus**

Filtrasi air dan zat-zat terlarut (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, glukosa, urea) adalah fungsi langsung dari dimensi partikel-partikel solute: serum albumin

(masa molekul 69.000) atau hemoglobin (MM 68000) praktis tidak ada dalam ultrafiltrat sedangkan inulin (masa molekul 5.000) atau insulin (5.500) terdapat dalam ultrafiltrat pada konsentrasi yang sama dengan yang ada dalam darah.

Proses ultrafiltrasi didasarkan pada struktur dari saringan yang dibentuk oleh berbagai tipe sel yang ada dan adanya tekanan hidrostatis atau osmotik yang terjadi pada perbatasan antara darah dan urin primitif.

Perlu diketahui bahwa energi yang diperlukan untuk filtrasi khusus berasal dari kerja jantung. Tingkat filtrasi glomerulus adalah betul-betul konstan meskipun ada perbedaan tekanan arteri yang dapat memengaruhi. Kelihatannya pengaturan ini didasarkan pada sistem renin angiotensine (dijelaskan pada bab berikut), pengaturannya dikontrol oleh kepekaan alat "jukstaglomerulus". Alat ini merupakan mekanisme umpan balik yang memungkinkan kadar zat terlarut di dalam tubulus konvolusi distal untuk mengatur konstiksi dan dilatasi arteriol aferen dan eferen ke dan dari glomerulus.

Tingkat filtrasi glomerulus dapat ditentukan dengan penyuntikan ke dalam aliran darah suatu senyawa yang bebas disaring oleh glomerulus, tetapi tidak direabsorpsi atau disekresi dalam tubulus (zat X). Jumlah total zat X dalam plasma sama dengan di dalam filtrat glomerulus. Sampel darah dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi ini.

Zat X tidak direabsorpsi atau disekresi dalam tubulus, semua yang disaring akan nampak pada urin. Oleh karena itu jumlah total yang disaring per menit akan sama dengan volume urin diekskresikan per menit dikali konsentrasi X dalam urin.

Misal:

- P adalah konsentrasi X dalam plasma
- U adalah konsentrasi X dalam urin

- V adalah volume urin per menit
  - GFR adalah volume filtrat glomerulus
  - Jumlah total yang disaring = GFR x P
  - Jumlah X yang disaring = U x V
- maka:  $U \times V = GFR \times P$      $GFR = U \times V/P$

Laju pembersihan dinyatakan ( $U \times PV/P$  adalah plasma yang dapat dibersihkan secara total dari suatu zat per menit. Sebagai contoh, laju pembersihan polisakarida inulin yang tidak disekresikan dan direabsorpsi oleh tubulus = 125 ml per menit. Bila suatu zat mempunyai nilai GFR < 125, zat tersebut direabsorpsi oleh tubulus dan sebaliknya bila nilainya > 125 ada zat yang disekresikan dari tubulus.

## 2.2 Reabsorpsi pada Tubulus

Analisis percobaan dari sifat berbagai bagian dari nefron dengan berbagai teknik membawa kesimpulan seperti dibawah ini, khususnya pada ginjal mamalia )

## 2.3 Tubulus Kontortus Proximal

Suatu transpor aktif dari Na<sup>+</sup> dapat mereabsorpsi 75% dari Na<sup>+</sup> hasil penyaringan, air dan CL<sup>-</sup> mengikuti gerakan pasif dari Na<sup>+</sup>. Glukosa yang bebas saring direabsorpsi secara keseluruhan pada tingkat ini dalam kondisi fisiologis.

Ketika cairan tubulus meninggalkan tubulus kontortus proksimal (TKP), cairan ini adalah isotonik terhadap plasma (300 m Osmol/l) tetapi konsentrasinya sedikit berkurang dibandingkan ketika pada ultrafiltrasi. Jadi zat-zat yang tidak di reabsorpsi mempunyai konsentrasi lebih dengan konsentrasinya pada darah (misal urea).

## 2.4 Bagian Putaran Henle yang Menurun

Tidak ada transpor aktif yang diketahui pada tingkat ini dan permeabilitasnya rendah terhadap NaCl dan urea, tetapi permeabilitas tinggi terhadap air.

## 2.5 Bagian Putaran Henle yang Meningkat

Pada bagian ini, terjadi transpor aktif ion  $\text{Cl}^-$  dari dalam menuju ke luar nefron. Berdasarkan penelitian farmakologi dan elektrofisiologi pada tikus memperlihatkan suatu transpor aktif  $\text{Na}^+$  yang memengaruhi sistem berlawanan dengan gradien konsentrasinya (dengan mengeluarkan ion  $\text{Cl}^-$ ). Cairan yang berasal dari awal tubulus kontortus distal adalah hipotonik dengan plasma.

Pada bagian putaran Henle gradien konsentrasi dari kortiko papillair dibuat oleh sistem pertukaran dengan melawan arus, yaitu pengurangan air dan suatu penambahan solute dalam tubulus. Kapasitas dari konsentrasi urin secara langsung berhubungan dengan panjangnya putaran Henle.

Gradien osmotik terjadi karena mekanisme ini memungkinkan bagi air tambahan untuk diabsorpsi kembali secara pasif dari urin hiperosmotik untuk diproduksi. Air hanya mengikuti gradien osmotik yang bergerak dari tempat dengan tekanan osmotik rendah (konsentrasi tinggi) ke tempat tekanan osmotik tinggi (konsentrasi air rendah). Filtrat glomerulus yang isoosmotik dengan darah tubulus proksimal, pada waktu mengalir di dalam putaran Henle kehilangan air. Filtrat tersebut tidak mendapatkan air kembali ketika berada di kaki Henle yang naik karena sel-sel di bagian ini mempunyai permeabilitas yang rendah terhadap air. Walaupun demikian filtrat semakin menjadi encer karena sejumlah besar  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  dikeluarkan. Pada waktu filtrat mencapai tubulus distal, filtrat kembali dalam keadaan isoosmotis atau kadang hipoosmotik terhadap darah. Sekarang filtrat turun dalam medula lagi, kali ini ke dalam tubulus penampung. Filtrat mengalir arus balik terhadap gradien Natriumklorida yang berdekatan dalam filtrat dari bagian putaran Henle yang naik dan mengeluarkan air ke ruang interstium di sekitarnya. Sekarang filtrat tubulus mencapai 1300 s/d

1400 mOsmol/1 pada manusia. Anti Diuretik Hormon (ADH) sudah mulai merangsang reabsorpsi Na<sup>+</sup> pada bagian nefron ini.

### **3. Tubulus Kontortus Distal**

Beberapa bagian secara berurutan mempunyai sifat-sifat yang berbeda, bergantung kepada spesiesnya: K<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, NH<sub>3</sub>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> dan HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> saling bertukar.

#### **Tubulus Kolektifus (Penampung)**

Pada bagian ini, terjadi terutama reabsorpsi air yang diatur oleh hormon ADH (anti diuretik hormon) dari cairan hipotonis yang menembus dalam tubulus. Hasil tubulus penampung adalah urin hipotonik dibandingkan dengan plasma ketika reabsorpsi air terjadi, sebaliknya dilarutkan tanpa ada ADH. Aldosteron hanya bekerja pada tubulus kolektifus dengan merangsang reabsorpsi Na<sup>+</sup>.

#### **Sekresi Tubulus**

Bila zat-zat yang ada dalam plasma ditemukan di urin dalam kuantitas superior (konsentrasi zat dalam urin x volume urin yang dikeluarkan per hari) dari kuantitas yang telah disaring (konsentrasi zat dalam plasma x volume filtrat per hari), kita dapat menyimpulkan bahwa zat-zat tersebut disekresikan oleh bagian-bagian tertentu dari ginjal. Seperti kasus untuk proton, ion-ion K<sup>+</sup>, phenol merah, penisilin, tingkat reabsorpsi, dan tingkat sekresi terjadi secara maksimal.

## **F. Pendekatan Pengaturan Terpadu**

Berbagai hormon (ADH, Aldosterone, dan sistem renin-angiotensine) mempunyai peranan penting dalam memelihara keseimbangan hidromineral juga sistem saraf pusat berpartisipasi pada tingkat lain (tingkah laku berkeringat dan napsu makan spesifik untuk mineral tertentu) pada keseimbangan ini.

## **1. Pembatas bagi Variasi Osmolaritas atau Volume CES (Cairan Ekstra Sel)**

Suatu penurunan minum air minuman atau kehilangan cairan atau garam (keluarnya air ludah berlebihan, muntah, pendarahan) akan memodifikasi keseimbangan hidromineral dalam CES dan kemudian dalam sel, kalau tidak dilakukan suatu penggantian. Kita ketahui bahwa pengaruh dehidratasi pada manusia, meskipun kurang kuat adalah mematikan dengan cepat, misalnya satu penurunan osmolaritas menuju nilai mendekati 250 mOsmol/l menyebabkan keracunan/gangguan tubuh dengan gangguan yang erat dengan gangguan pertukaran ion-ion dan resikonya mati koma.

Kompensasi dari variasi dari volume CES memanggil mekanisme cepat seperti hemostasi pada saat pendarahan, penyesuaian segera sistem sirkulasi (pengaturan tekanan arteri), dan mekanisme restorasi dari keseimbangan awal.

## **2. Haus dan Kontrol Konsumsi Air**

Daerah tertentu (inti) hipotalamus bervariasi menurut species, terlibat dalam kontrol tingkah laku disik (keluar keringat).

- Ketika ransangan *stereotaxic* dilakukan dengan bantuan mikroelektroda hewan tidak berhenti minum.
- Setelah perusakan pusat-pusat hipotalamus, hewan tidak mau minum lagi sebaliknya pusat lapar dan kenyang, tetangganya telah dapat berfungsi normal.

Rangsangan normal aktivasi dari pusat-pusat haus adalah sebagai berikut.

- Peningkatan osmolaritas plasma, sinyal ini ditangkap oleh reseptor spesialis (osmoreseptor hipotalamus). Mikro-injeksi larutan hipertonik dalam sirkulasi darah dekat reseptor menyebabkan haus dan minum air pada hewan percobaan.

- Penurunan volume dari CES (*hypovolemia*) setelah hemoragi, tanpa modifikasi segera osmolaritas. Hypovolemia bekerja pada hipotalamus via peningkatan konsentrasi angiotensine II yang merangsang daerah tertentu diencephalon.
- Berhentinya minum, umumnya sebelum osmolaritas CES mencapai nilai yang ditetapkan. Mekanisme yang dapat mengatur volume air yang dikonsumsi menurut kebutuhan pada saat tertentu belum diketahui.

## G. ADH (Antidiuretic Hormon)

ADH berasal dari hipotalamus, disekresikan dalam sirkulasi oleh neurohipofisa begitu osmolaritas plasma meningkat beberapa mOsmol/l (sekitar 1%). Pada prinsipnya, hormon ini bekerja pada nefron (Gambar 8.7) dengan meningkatkan permeabilitas air pada tabung kolektivus dan reabsorpsi pasif air, akibatnya ada eksistensi gradien medula tekanan osmotik dengan merangsang transport NaCl oleh bagian yang naik dari putaran Henle pada bagian medula yang mempermudah pemeliharaan gradien kortiko-kapiler dari tekanan osmotik di mana ini bergantung pada tingkat konsentrasi urin di ginjal.

ADH juga mempunyai pengaruh lain, selain pada ginjal.

- Pada konsentrasi tinggi menyebabkan vasonstriksi dari sejumlah pembuluh darah peripherik.
- ADH merupakan salah satu faktor agregasi *plaquettaire* (*trombocyte*).

Kedua efek ini mudah berpartisipasi untuk retensi cairannya ketika terjadi pendarahan. ADH mempunyai aksi glukogenolitik dan glukoneogenik pada hati. Waktu paruh ADH sangat singkat dalam plasma (kurang dari 10 menit), ini memberikan penyesuaian yang cepat dari fungsi ginjal. "*Diabetes insipide*" adalah suatu gejala yang dihasilkan oleh kekurangan ADH. Penderita akan mengeluarkan urin berlimpah dan

akibatnya minum air tanpa batas (puluhan liter pada konsentrasi tertentu).

## H. Sistem Renin-Angiotensine dan Sekresi Aldosterone

Renin adalah enzim proteolitik yang dihasilkan oleh sel-sel otot halus arteri aferen yang terletak pada pertemuan dengan glomerulus. Enzim ini terdapat terutama dalam plasma bersirkulasi

Seperti substratnya, angiotensinogen berasal dari hati. Prekursor renin adalah prorenin, diaktifkan oleh holikrein asal jaringan. Sekresi renin di bawah kontrol kompleks oleh keragaman tekanan arteri, volume plasma, sistem saraf, beta adrenergic, dan *prostacyline*. Di bawah kontrol renin, angiotensinogen (glikoprotein) melepaskan suatu decapeptida Angiotensin I yang seterusnya menjadi aktif dalam bentuk angiotensin II (oktapeptida) oleh kerja suatu enzim konversi (kininase) berasal dari endothelium.

- Angiotensin II adalah faktor vaso konstriktor yang paling kuat dan bekerja terhadap arteriol.
- Angitensin II juga memengaruhi *corticosurrenal* untuk mensekresi aldosteron.
- Aldosteron adalah mineralkortikoid yang paling efektif dalam meningkatkan reabsorpsi  $\text{Na}^+$  dari urin (tubulus penampung), air ludah, keringat. Faktor lain yang merangsang sekresi aldosteon adalah pendarahan, pengurangan konsumsi  $\text{Na}^+$ , dan berbagai cekaman (operasi, kawatir).

# BAB IX

## METABOLISME ENERGI

Metabolisme energi suatu organisme merupakan kesatuan reaksi-reaksi biokimia yang dapat mengubah kandungan energi dalam ransum/pakan menjadi ATP. Secara keseluruhan, metabolisme energi dapat menghasilkan ATP melalui glikolisis anareobik terutama oleh oksidasi molekul organik, dapat menghasilkan kemampuan reduktor (NADH dan NADPH) melalui jalan pentosa fosfat, oksidasi asam lemak dan siklus trikarboksilat, dan dapat mensuplai karbon yang akan melayani pada sistem molekul organik.

Setelah proses pencernaan, penyerapan memperkaya lingkungan interior dengan zat-zat makanan yang dapat diambil oleh berbagai sel organisme. Setiap sel dengan bantuan enzim dapat mempunyai kekuatan untuk menyimpan molekul-molekul yang mempunyai nilai energi tinggi. Misalnya, sel-sel adiposit menyimpan lemak dan sel-sel hati dan otot dapat menyimpan cadangan energi masing-masing dalam bentuk glikogen selama periode *post-prandiale* (beberapa jam setelah makan pada manusia). Ketika organisme dalam keadaan periode *post-absorptive* (sekitar 12 jam setelah makan pada manusia), situasi akan berbeda: sebagian jaringan tetap peminta substrat energi sebaliknya lingkungan internal cenderung kurang. Cadangan energi yang sebelumnya diakumulasi akan dimobilisasi secara cepat untuk memenuhi permintaan jaringan tubuh. Pada kasus puasa cukup lama, latihan otot intensif berhadapan dengan masalah dingin, kebuntingan, cekaman yang merupakan penyesuaian lain metabolisme energi yang menjadi perlu.

Berbagai jalur metabolis potensial yang ada dalam sejumlah jaringan telah banyak dipelajari sejak setengah abad, tetapi pengaturan

metabolis yang dikenal dengan mendetail hanya pada sejumlah kecil spesies. Data data yang ada tentang manusia dan hewan kecil percobaan (tikus dan mencit).

Pada bab ini akan dibahas prinsip-prinsip pengaturan metabolisme energi, yang pertama adalah mikroregulasi dari jalur metabolisme pada tingkat seluler dengan mencari bukti-bukti yang dapat menjelaskan bagaimana tepatnya atau mengapa sebuah sel melakukan metabolisme. Kedua adalah makroregulasi aliran substrat energi yang melibatkan suatu kerjasama antara organ akan dibahas pada berbagai situasi fisiologis.

## **A. Energi dan Mikro Regulasi**

### **1. Prinsip-prinsip Substrat Energi**

#### **1.1 Cadangan Energi**

Seperti telah dibicarakan sebelumnya, baik ATP maupun fosfatgen (sebagai contoh kreatin fosfat) bukan merupakan cadangan energi yang dapat dipakai dalam sel-sel. Dua bentuk utama cadangan energi adalah karbohidrat dan lemak.

Bentuk cadangan dari karbohidrat dalam bentuk glikogen pada hewan yang dapat disediakan sebagai cadangan energi yang dapat dimobilisasi secara cepat, tetapi setiap gram glikogen memerlukan akumulasi simultan satu sampai dua gram air untuk memelihara osmolaritas seluler. Jadi peranan cadangan dalam bentuk glikogen adalah terbatas karena setiap gram jaringan yang mengakumulasi glikogen hanya menyediakan 6–8 kJ. Sebaliknya lemak, molekul-molekul hidrophobes disimpan tanpa adanya air dan jaringan lemak dapat menyimpan sampai 90% dari beratnya dalam bentuk lemak, untuk berat jaringan yang sama. Jadi penyimpanan energi dalam bentuk lemak lebih penting dibandingkan dengan glikogen (nilai energi

lemak: 38 kJ per gram; akumulasi tanpa air). Cadangan energi pada manusia dipresentasikan pada Tabel 9.1.

### 1.2 Substrat Energi Bersirkulasi

Substrat energi yang bersirkulasi lebih banyak variasinya dibandingkan dengan bentuk cadangan yang mengikuti eksistensi interkonversi metabolis. Konsentrasi darah dari berbagai substrat energi seperti glukosa, laktat, asam lemak non-ester (AGNE), asetat, propionat, butirat, badan keton (asetoasetat dan  $\beta$  hidroksibutirat), dan asam amino sangat bervariasi sesuai dengan keadaan fisiologis (Tabel 9.2) .

Tabel 9.1 Proporsi substrat energi utama (M1J) pada manusia dengan berat 70 kg

Jaringan	Trigliserida	Protein	Glikogen	Glukosa	A.L.Non-ester
Lemak	585	-	-	-	-
Otot	11,7	171,4	6		
Hati			1,5		
CES	0,16	-		0,3	0,016

Tabel 9.2 Rataan konsentrasi (mmol/liter) beberapa substrat energi yang bersirkulasi dalam darah manusia pada periode sesudah makan (10 jam setelah makan) dan puasa

	Glukosa	Asam Lemak bebas	Aceto- acetat	$\beta$ HIDROKSI BUTIRAT	Alanin, Leu- cinedanglutamin
Periode post - absorptive	4.8	0.6	0.01	0.01	0.0.9
Puasa 3 hari	3.8	1.25	1.5	1.35	1.1
Puasa 30-40 hari	3.6	1.50	4.5	6.1	0.6

## 2. Konsumsi Jaringan

### 2.1 Keragaman Penggunaan Substrat Energi

Molekul-molekul organik tidak semua mempunyai nilai energi yang sama dan sel-sel memperlihatkan satu spesialisasi tertentu dalam sikap mengkonsumsi substrat energi. Substrat energi yang digunakan terutama oleh sejumlah jaringan atau sel-sel manusia dipresentasikan pada Tabel 9.3.

Tabel 9.3 Substrat energi yang digunakan oleh berbagai jaringan manusia

Jaringan atau Sel-sel	Glukosa	Asam lemak	Badan keton	Asam amino
Eritrosit	v	-	-	-
Sel medula adrenal	v	-	-	-
Neuron	v	-	v*	v
Serabut otot kerangka				
-aktivitas rendah	-	v	v	v
-aktivitas tinggi	v	-	-	-
Hati	-	v	-	v
Jantung	-	v	v	-
Sel korteks ginjal	-	v	v	-

\* Ketika puasa dalam waktu lama

Untuk organisme tingkat tinggi, ketersediaan glukosa sangat diperlukan untuk berbagai alasan.

- Glukosa cocok untuk semua tipe seluler untuk sintesis glikoprotein dan membran glikolipid.
- Substrat glikolisis, glukosa diperlukan dalam kondisi anaerobik, demikian juga semua sel tanpa mitokondria seperti eritrosit yang baru dewasa.
- Glukosa adalah substrat pilihan neuron di luar periode puasa (kekurangan makanan).

## 2.2 Mekanisme Regulasi Intraseluler

Semua sel tidak mampu dengan perlengkapan enzimatnya, menjalankan semua jalur metabolisme energi (misalnya glikolisis, glikogenolisis, glikogenogenesis, glukoneogenesis, lipolisis dan lipogenesis, ketogenesis). Konsumsi dan pemakaian substrat energi diatur di tingkat sel oleh berbagai faktor berikut:

- a). Ketersediaan substrat. Konsentrasi darah dan penyesuaian debit darah lokal adalah peka untuk berubahnya ketersediaan substrat energi pada tingkat jaringan.
- b). Permeabilitas membran terhadap substrat dan modulasi penangkapannya di bawah kontrol hormonal. Sistem transpor dari sel-sel otot dan jaringan lemak sangat terbatas untuk penggunaan glukosa dan dapat dirangsang oleh insulin. Membran hepatosit tidak bebas dilewati oleh glukosa, glukosa menembus sel hepatosit seperti pada sel lainnya melalui suatu mekanisme difusi yang dipermudah.
- c). Adanya enzim-enzim yang dapat memetabolisir substrat dan karakter-karakter spesifiknya.

## **B. Kontrol Hormonal terhadap Metabolisme**

### **1. Tempat Kerja Hormon yang Memengaruhi Metabolisme**

Metabolisme dari tiga kelompok zat makanan: karbohidrat, lemak, dan protein diatur oleh hormon. Namun demikian, pengaturan metabolisme oleh hormon hanya terjadi pada satu atau dua tempat yang merupakan kunci dari rangkaian reaksi metabolisme dalam tubuh.

Pengambilan karbohidrat ke dalam sel-sel dan enzim-enzim yang memengaruhi penyimpanan karbohidrat diatur oleh hormon. Insulin merangsang glukosa masuk ke dalam sel dan merangsang enzim sintetase glikogen yang bertanggung jawab untuk mengubah glukosa-6-phosphat menjadi glikogen sebagai produk cadangan. Glukagon dan

adrenalin bekerja berlawanan dengan insulin dengan memengaruhi enzim *phosphatase* glikogen. Pengaruh ini pada *phosphatase* glikogen dan enzim sintetase dibawa oleh suatu rangkaian reaksi yang kompleks.

Pengambilan asam amino ke dalam sel dirangsang oleh hormon pertumbuhan (GH), insulin, dan dihambat oleh hormon glukokortikoid seperti hidrokortison. GH bertindak pula seperti insulin untuk merangsang beberapa enzim yang bertanggung jawab untuk sintesis protein, sedangkan hidrocotison mempunyai efek yang berlawanan.

Asam-asam lemak bebas melewati membran-membran sel dan hormon tidak berpengaruh terhadap proses ini. Meskipun demikian, insulin merangsang enzim sintetase trigliserid yang mempercepat konversi gliserol dan asam lemak bebas menjadi lemak pada jaringan adipose. Glukagon, adrenalin dan glukokortikoid mengaktifkan enzim lipase trigliserida yang membebaskan asam-asam lemak dan gliserol dari lemak. Tirosin terlihat membantu kerja katabolisme dari berbagai hormon.

## **2. Kerja Insulin sebagai Hormon Anabolisme**

Insulin adalah regulator hormonal yang sangat penting dalam metabolisme energetik. Hormon ini dihasilkan dan disekresikan oleh sel- $\beta$  pulau langerhan kelenjar pankreas (Bab sistem endokrin), ketika glisemia (kadar glukosa dalam darah) meningkat. Dia memberi petunjuk status gizi organisme dan mempermudah penyimpanan cadangan metabolisme energi, demikian juga sintesis protein.

Pengaruh insulin terhadap jaringan-jaringan utama yang terlibat dalam metabolisme energi diringkaskan pada Tabel 9.4.

Ketika terjadi diabetes gula, kekurangan atau tidak adanya sekresi insulin menyebabkan hiperglisemia permanen (kadang-kadang berhubungan dengan kurangnya glukosa intraseluler), glukosurie (kadar glukosa tinggi dalam urin), poliurin akibat peningkatan osmolaritas urin

di tubulus ginjal sehingga ekskresi glukosa akan mengganggu reabsorpsi ion dan air, pengurusan dan peningkatan konsentrasi badan keton dalam darah (asidosis).

Insulin merupakan satu-satunya hormon hipoglisemia, sedangkan yang lainnya mempunyai pengaruh hiperglisemia.

Tabel 9.4 Pengaruh-pengaruh utama dari hormon insulin terhadap jaringan yang terlibat dalam metabolisme energi

	Hati	Jaringan lemak	Otot kerangka
Transpor glukosa		+	+
Transpor asam amino		+	+
Sintesis glikogen	+		
Glikogenolisis	-		
Glukoneogenesis	-		
Ketogenesis	-		
Lipogenesis	+	+	
Lipolisis	-	-	
Sintesis protein	+	+	+
Proteolisis	-	-	-

+ = merangsang - = menghambat ; Rieutort, 1982b

### 3. Kerja Hormon Glukagon

Hormon ini merangsang glukoneogenesis dan menyebabkan glikogenolisis, kerjanya antagonis dengan insulin. Sekresi hormon Glukagon oleh sel  $\hat{A}$  kelenjar pankreas dirangsang oleh peningkatan aminoasidemia (konsentrasi asam amino dalam darah, Cholesistokinin-Pankreozimin) gastrin, kortisol atau kortikosteron, latihan otot, situasi stres, stimulan  $\beta$  adrenergic, dan asetilkolin.

Insulin menghambat sekresi glukagon, termasuk somatostatin, glukosa, asam lemak non-ester (AGNE), sekretin juga mempunyai aksi

yang sama. Sel sasaran utama glukagon adalah hati yang merupakan satu-satunya organ peka terhadap konsentrasi fisiologis glukagon dan karena posisi anatominya menerima lebih banyak konsentrasi hormon pankreas (vena porta hepatica dialiri darah yang berasal dari alat pencernaan, limfa, dan pankreas).

Kerja glukagon terhadap hati adalah:

- merangsang glikogenolisis dan menghambat sintesis glikogen, melalui rangkaian reaksi enzimatik yang dimodulasi oleh AMPc;
- penurunan sintesis asam lemak melalui penurunan produksi piruvat dan turunya aktivitas asetilko-A karboksilase; dan
- peningkatan oksidasi asam lemak dan aktivasi ketogenesis.
- Menghambat glikolisis dengan menghambat piruvat kinase dan posfofruktosekinase dan rangsangan glukoneogenesis.

#### **4. Catekolamin**

Aktivasi sistem simpatik menyebabkan pelepasan noradrenalin dan adrenalin yang menyebabkan di antara sejumlah kerja pada organisme, suatu hiperglisemia sementara. Hiperglisemia setelah kerja catekolamina terhadap:

- merangsang glikogenolisis dan glukoneogenesis hati. Merangsang glikogenolisis otot dengan rendahnya penggunaan glukosa plasmatik; dan
- peningkatan lipolisis jaringan lemak.

## **C. Makroregulasi dan Metabolisme Energi**

### **1. Profil Metabolis dari Jaringan Utama yang Terlibat dalam Metabolis Energi**

#### **1.1 Jaringan Saraf**

Jaringan ini tidak mempunyai cadangan energi dan kebutuhannya permanen, contoh kebutuhan pada manusia sebanyak 120 gram glukosa selama 24 jam atau sekitar setengah dari nilai metabolisme basal.

Lainnya seluruh proses dipadukan oleh sistem saraf pusat di mana terdapat pusat-pusat lapar dan lapar.

Di luar periode puasa, jaringan saraf hanya mengonsumsi glukosa. Asam-asam lemak non-ester (AGNA), substrat energi lain yang potensial berikatan dengan serum albumin dan tidak dapat melewati hambatan hemomening.

Semua molekul-molekul larut dalam air tidak dapat mencapai jaringan interstisial dari darah, hanya ada dua mekanisme transpor yang mungkin.

1. Pelarutan dalam lemak membran, misalnya untuk steroid.
2. Transpor khusus oleh enzim yang ada dalam membran sel-sel endotelium, misalnya untuk hormon tiroid dan berbagai zat makanan seperti glukosa, asam amino, badan keton, dan kolin.

Badan keton, substrat lain yang potensial dalam konsentrasi yang sangat rendah dalam darah mewakili suplai energetik yang cukup, kecuali selama periode puasa panjang di mana menjadi sebaliknya.

### 1.2 Jaringan Otot

Pada waktu istirahat, otot mengonsumsi terutama asam lemak. Dia juga dapat mengonsumsi glukosa dan badan keton (sumber utama energi jantung).

Cadangan glikogen dalam otot cukup banyak dan glikogenolisis dirangsang dengan segera oleh aktivitas otot, setelah adanya variasi konsentrasi  $Ca^{2+}$ . Glukosa 6 fosfat yang dihasilkan ditransformasi menjadi piruvat yang memberikan terutama asam laktat pada glikolisis anaerobik, kecuali ketika latihan kurang intensif dan waktunya panjang di mana piruvat dioksidasi. Laktat lewat dalam darah kemudian diambil oleh hati yang ditransformasi menjadi glukosa dan glukosa dapat tersebar menuju ke otot. Bentuk ini adalah siklus asam laktat atau siklus Cori.

Otot juga dapat menghasilkan alanin melalui transaminasi piruvat dan asam amino ini mencapai hati yang mengubahnya menjadi glukosa. Proses-proses ini sejalan dengan siklus alanin atau siklus Felig. Siklus alanin dapat sekaligus membawa bahan organik nitrogen menuju hati (di mana dapat terbentuk urea) dan membawa karbon.

### 1.3 Jaringan Lemak

Aktivitas metabolis dari jaringan lemak adalah terutama dalam esterifikasi asam-asam lemak, di mana pelepasannya berasal dari trigliserida. Pada manusia, asam-asam lemak dibuat terutama oleh hati yang melepaskannya dalam sirkulasi (vena hepatica) dalam bentuk lipoprotein dengan kepadatan rendah (VLDL). Jaringan lemak menangkap asam-asam lemak yang dilepaskan dari VLDL oleh lipoprotein lipase (terletak dalam endotelium pembuluh darah) berikatan dengan koenzim A untuk mengaktifkan dan mentransfer ke  $\hat{A}$ -gliseroposfat untuk menghasilkan trigliserida. Sintesis trigliserida ini memerlukan glukosa untuk melengkapi rangkaian trikarbon dalam bentuk gliserol 3 fosfat: jaringan lemak putih tanpa kinase yang akan dapat memfosforilasi gliserol endogen. Ketersediaan glukosa adalah faktor regulasi dari esterifikasi asam-asam lemak dalam jaringan lemak. Semakin banyak glukosa (setelah makan), semakin meningkat cadangan trigliserida, ini menerangkan bahwa glukosa lebih bersifat lipogenik dibandingkan dengan lemak itu sendiri.

Suatu enzim bekerja regulasi hidrolisa trigliserida dalam jaringan lemak. lipase hormono-dependante. Enzim ini mungkin fosforilasi atau dephosforilasi, kerja hormon lewat oleh keragaman konsentrasi AMPc, seperti untuk metabolisme glikogen otot atau hati.

Hati seorang manusia dapat menangkap karbon berasal dari glukosa yang mengubahnya menjadi glikogen. Sebaliknya, hati dapat melepaskan glukosa:

- dari G6P berasal dari glikogen (adanya glukose 6 posfatase),
- oleh GNG mulai dari semua substrat glukoformateur: laktat, alanin (berasal dari otot), gliserol (berasal dari jaringan lemak), asam amino glukoneogenetik (asal bahan makan atau berasal dari mobilisasi periperik terus-menerus akibat pengaruh glukokortikoid atau penurunan insulin).

Hati mempunyai peranan betul-betul glukostat: menangkap glukosa ketika glisemia darah porta adalah lebih dari 8,3 atau 8,4 mmol per liter dan sebaliknya melepaskan glukosa jika konsentrasi menjadi di bawah dari vanilla tersebut. Fungsi hati ini bergantung pada:

- autoregulasi oleh glisemia yang berpengaruh terhadap enzim hepahati; dan
- pengaruh hormon pankreas utamanya.

#### Lemak

Hati menyintesis asam-asam lemak ketika bahan makan kaya energi berlebihan. Setelah esterifikasi menjadi trigliserida, hati mengeluarkannya dalam bentuk VLDL (*very low densities protein*), salah satu bentuk tranpor lemak berhubungan dengan protein (Gambar 7.4). VLDL akan diambil kembali oleh jaringan lemak. Ketika puasa, asam-asam lemak yang berasal dari peri-peri dirubah menjadi badan keton oleh hati.

## **D. Adaptasi Metabolis dalam Berbagai Situasi Fisologis**

Aliran substrat energi yang berpindah pada manusia, setelah makan campuran (terdiri dari karbohidrat, lemak, dan protein) atau puasa panjang (lebih dari 3 hari). Adaptasi metabolis pada puasa singkat, seperti yang diamati pada waktu periode posabsorpsi, tidak sampai pada ketogenesis tetapi hanya glikogenolisis hati, mencapai 75% produksi

glukosa. Kemudian GNG hati untuk menutupi permintaan tambahan akan glukosa (berasal dari laktat, piruvat, dan asam amino yang dibebaskan oleh otak otot).

## E. Pengaturan Terpadu Metabolisme Energi: Lapar dan Kenyang

Penelitian akhir-akhir ini telah membuktikan unsur regulasi di manaantisipasi adaptasi hormonal yang bekerja setelah mengambil makanan. Berbagai tingkat integrasi telah diobservasi dan saluran pencernaan dipilih sebagai titik awal dari pengaturan yang dikenal:

- begitu kontak makanan dengan sel-sel menuju rongga usus; dan
- sebelum zat-zat makanan menembus dalam lambung, begitu kontak dengan rongga mulut.

Lainnya, seluruh proses dipadukan oleh sistem saraf pusat di mana terdapat pusat-pusat lapar dan kenyang.

### 1. *Axe Entero-Insulaire*

Pada tingkat regulasi ini berhubungan dengan koordinasi fungsional yang mengamati antara usus dan pulau-pulau langerhan. Sel-sel endokrin dari mukosa intestinal (sekresi hormon gastrointestinal), terletak oleh tempat antara sel-sel penyerapan, memperlihatkan spesialisasi yang khusus. Mereka melepaskan kandungan hormonnya ke permukaan basal begitu kombinasi tertentu dari sinyal-sinyal pada tingkat permukaan *apikalnya* berbalik menuju rangsangan (*chahay*) usus (glukosa, asam amino, asam lemak, pH basa atau asam). Hormon-hormon dilepaskan berasal dari kelenjar pankreas di mana hormon tersebut merangsang sel-sel endokrin usus.

Permainan ini dari sekresi hormon pankreas memulai sebelum zat-zat makan tidak datang dalam konsentrasi yang tinggi dalam darah yang mengalir ke pankreas.

## **2. Respons Oro-Anticipatris**

Begitu organisme mengunyah makan, kita mencatat satu proses awal dari sekresi alat pencernaan (misalnya sekresi saliva), tetapi juga sekresi endokrin sebagai contoh pelepasan insuli, katekolamin. Apa pun responsnya, mengantisipasi terhadap evolusi yang akan datang metabolisme general disebut oro-antipatris.

## **3. Pusat-pusat Pengaturan: Lapar dan Kenyang**

Percobaan merangsang dan merusak bagian-bagian tertentu dari encephalum telah menentukan peranan integrasi dari hipotalamus dalam pengaturan pengambilan makan.

Inti-inti ventromedian (VMN: *ventro medial nucleus*) hipotalamus memperlihatkan pusat-pusat yang bertanggung jawab untuk kenyang. Perusakan bagian ini mencegah persepsi semua rasa kenyang dan individu tidak berhenti makan (*hiperphagie*) yang mengarah kegemukan (gemuk hipotalamik).

Pada hipotalamus lateral, sebaliknya terdapat satu pusat yang memudahkan pengambilan makanan. Perusakan dari pusat ini menyebabkan *hipophagie* kronis dan menguruskan ternak.

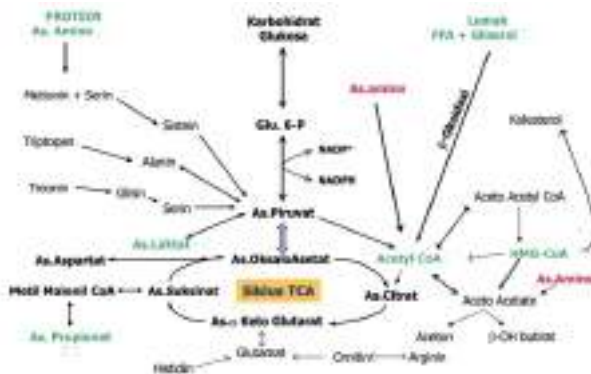
enyelidikan secara elektrofisiologis memperlihatkan bahwa kedua pusat ini memadukan semua informasi berasal dari sejumlah daerah *encephalik* yang terlibat dalam refleks penglihatan, pendengaran, penciuman, perabaan pengecapan yang berkaitan dengan pengambilan makan.

## **F. Metabolisme Energi Zat-zat Nutrisi**

Pengertian metabolisme menurut pengertian bahasa artinya “perubahan”, dalam arti semua enzim yang mengatalis (mempercepat)

reaksi kimia yang terjadi dalam suatu organisme atau pada sel-sel suatu individu. Produk metabolisme adalah energi dalam bentuk energi kimia (*Adenosin Tri Phospat/ATP*) yang akan digunakan untuk hidup pokok, pertumbuhan, reproduksi, produksi ternak (telur, susu, dan daging), serta perbaikan jaringan/sel yang rusak.

Metabolisme dibagi dalam dua kelompok, yaitu anabolisme dan katabolisme. Anabolisme merupakan reaksi biokimia yang terlibat dalam pembentukan bagian-bagian sel atau produk sel (molekul kompleks) dari bahan-bahan/molekul yang sederhana. Reaksi anabolisme merupakan reaksi endergonik yang membutuhkan *input* energi untuk berlangsungnya proses reaksi. Sementara katabolisme merupakan proses pemecahan molekul-molekul kompleks menjadi molekul sederhana yang melibatkan reaksi eksergonik, di mana pada akhir reaksi melibatkan reaksi oksidatif yang melepaskan energi.



Gambar 9.1 Skema general metabolisme zat-zat nutrisi

Sumber: Grignon dan Davidian (1985); Dauzir (1984)

Bagian-bagian kompleks yang merupakan bagian dari sel atau struktur intraseluler secara kontinu terus dibentuk dalam tubuh organisme hidup, dan pada waktu yang sama molekul-molekul kompleks dipecah menjadi molekul-molekul sederhana. Produk akhir dari metabolisme yang tidak ditransformasi oleh tubuh akan dikeluarkan melalui kelenjar spesifik, yaitu organ sekresi. Metabolisme melibatkan berbagai zat-zat nutrisi seperti protein, karbohidrat, lipid/

lemak, air, vitamin, dan garam-garam mineral. Proses metabolisme juga dikontrol dan diatur oleh sistem saraf dan sistem hormonal (lihat subbab sebelumnya).

Protein, karbohidrat, dan lemak setelah mengalami proses pencernaan dan penyerapan produk akhir pencernaan terus akan mengalami proses metabolisme seperti yang disajikan pada Gambar 9.1.

### **1. Metabolisme Protein dan Asam Amino**

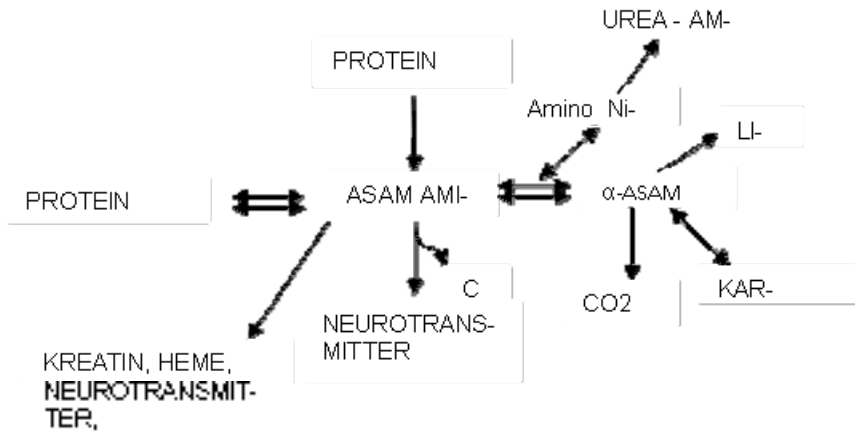
Protein dalam tubuh dalam keadaan keseimbangan dinamik. Terdapat pemecahan dan resintesis protein secara terus menerus, yaitu proses katabolisme dan anabolisme. Pada ternak dewasa, tidak bunting dan tidak laktasi, katabolisme protein sebanding dengan anabolisme protein, dan ternak dalam keadaan demikian dikatakan dalam **keseimbangan nitrogen**. Ini berarti nitrogen dalam makanan sebanding dengan nitrogen yang diekskresikan. Pada ternak yang sedang tumbuh anabolisme melebihi katabolisme dan ternak dalam keadaan keseimbangan nitrogen positif. Jika ternak kelaparan dalam periode yang lama, nitrogen yang diekskresikan akan melebihi dari nitrogen yang diambil, dan ternak akan menjadi dalam keadaan keseimbangan nitrogen negatif.

Asam-amino diperlukan untuk sintesis protein dalam sel-sel yang diambil dari pool asam amino bebas dalam plasma darah. Pool ini ditunjang oleh asam amino yang diabsorpsi oleh usus, asam amino berasal dari penguraian jaringan protein dan asam amino yang disintesis di hati. Konsentrasi asam amino dalam plasma darah berkisar antara 0,45–0,60 gram per liter.

Sintesis sebuah protein merupakan suatu proses yang kompleks, di mana asam amino diikat bersama dalam suatu rangkaian khusus dan rangkaian ini menentukan sifat-sifat biologis dari protein khusus. Sintesis

protein terjadi di sel-sel sitoplasma pada permukaan ribosom, di mana rangkaian asam aminonya disandi oleh basa-basa asam ribonukleat. Sintesis protein pada ternak muda lebih besar dari pada ternak dewasa pada ransum yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa sintesis protein tidak bergantung pada protein yang dicerna dan merupakan fungsi dari keadaan fisiologis dari ternak.

Langkah pertama dalam penguaraian asam amino melibatkan pemindahan atau pengurangan kelompok amine. Reaksi transaminasi adalah konversi satu asam amino ke asam keto yang sesuai dan konversi ini bersifat simultan asam keto lain menjadi asam amino. Deaminasi adalah proses di mana kelompok amine diputar dengan konsekuensi melepaskan amoniak. Residu nitrogen bebas dari asam amino deaminasi dioksidasi menjadi karbon dioksida dan air pada siklus asam sitrat. Sebagian energi yang dibebaskan disimpan dalam ikatan fosfat kaya energi.



Gambar 9.2. Skema general Metabolisme Protein dan asam-asam amino

Banyak amoniak terbentuk oleh deaminasi asam amino diubah menjadi urea yang diekskresikan dalam urin. Senyawa dasar

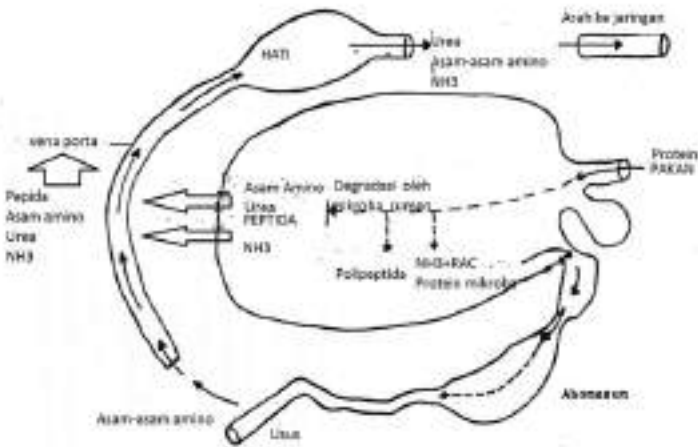
membutuhkan untuk sintesis urea adalah 2 molekul amoniak dan 1 molekul karbon dioksida.

Pada ternak ruminansia, protein ransum didegradasi di rumen dan tingkat degradasinya bergantung pada sumber protein. Peptida-peptida yang terbentuk akan dihidrolisa menjadi asam amino, kemudian asam-asam amino dengan cepat dideaminasi. Kadar dari aktivitas proteolitik dalam rumen meningkat sejalan dengan kandungan protein dalam ransum, tetapi aktivitas deaminasi selalu tinggi.

Jadi konsentrasi peptida-peptida dan asam-asam amino dalam cairan rumen selalu rendah.

Amoniak yang terbentuk melalui deaminasi asam amino dapat diabsorpsi melalui dinding rumen masuk ke dalam aliran darah portal, lewat ke retikulorumen dengan lewatnya makan tercerna ke omasum atau diinkorporasikan ke dalam protein mikroba. Amoniak yang meninggalkan rumen melalui makanan tercerna diabsorpsi ke dalam darah pro dan diangkut ke hati. Di hati amoniak diinkorporasikan menjadi urea, sebagian besar diekskresikan melalui urin. Meskipun demikian, tidak semua urea yang disintesis diekskresikan, sebagian masuk ke usus, baik difusi langsung melewati dinding usus ke dalam darah maupun disekresikan oleh kelenjar air ludah (Gambar 9.3). Urea yang berdifusi ke dalam alat pencernaan sekitar 50% masuk ke dalam rumen dan 50% masuk ke usus halus dan usus besar.

Urea yang masuk ke dalam rumen baik dari sumber endogen maupun dari ransum dihidrolisis dengan cepat menjadi karbon dioksida dan amoniak. Amoniak ini merupakan sumber nitrogen tersedia untuk digunakan oleh mikroba untuk pertumbuhannya. Proses ini dikenal sebagai siklus urea dalam rumen.



Gambar 9.3. Skema umum degradasi protein di dalam rumen ternak ruminansia

## 2. Metabolisme Lemak

Lemak yang penting secara biologis adalah trigliserida, fosfolipid, dan sterol. Lemak dalam sel-sel ada dua tipe utama, yaitu lemak berstruktur terutama ditemukan dalam membran sel dan lemak netral disimpan sebagai cadangan energi dalam sel adiposa pada tubuh ternak.

Kandungan lemak plasma darah sekitar 3 gram per liter. Sekitar 50% dari kadar tersebut adalah fosfolipid, 30% trigliserida dan 20% kolesterol. Selain fraksi utama ini, plasma mengandung sejumlah kecil asam lemak bebas. Asam-asam lemak bebas mempunyai tingkat "turn over" sangat cepat dan mewakili bentuk utama yang mana asam-lemak ditransfer dari depot lemak ke tempat oksidasi di jaringan lain. Oksidasi asam lemak terjadi di mitokondria oleh suatu proses yang dikenal sebagai beta-oksidasi. Dengan proses ini, asam lemak diuraikan menjadi asetil koenzim A (asetil-CoA) yang masuk ke dalam siklus asam sitrat (Gambar 13.6) dan dioksidasi menjadi karbon dioksida dan air. Energi yang dilepaskan oleh oksidasi ini disimpan sebagai ikatan kaya energi dalam bentuk ATP.

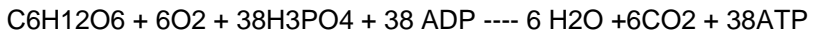
Banyak jaringan dapat menyintesis asam lemak dari Asetil-koA. Hanya sejumlah kecil asam dengan 12 dan 14 karbon terbentuk, tetapi tidak ada yang disintesis lebih dari 16 atom karbon. *Pathway?* untuk sintesis asam lemak dari asetil-koA yang memerlukan energi tidak sederhana dan kebalikan dari *pathway* untuk oksidasi lemak.

### **3. Metabolisme Karbohidrat**

Sebagian dari glukosa yang diserap disimpan sebagai glikogen dalam hati. Glikogen hati mewakili cadangan energi utama yang siap dapat dimobilisasi bila dibutuhkan. Konsentrasi glukosa dalam darah adalah lebih tinggi pada ternak dengan lambung sederhana dibandingkan dengan ternak ruminansia (babi 4,4–6,7 mmol/l, kuda 3,0–5,3 mmol/l dan sapi 2,2–3,8 mmol/l). Glukosa yang dibutuhkan dibawa masuk ke dalam sel dimana dia akan difosforilasi membentuk glukosa-6-fosfat. Senyawa ini dapat disimpan sebagai glikogen di hati atau mengalami serangkaian reaksi kimia untuk membentuk asam piruvat.

Pada kondisi aerobik, semua sel kecuali eritrosit akan mengoksidasi asam piruvat menjadi karbon dioksida dan air. Oksidasi ini terjadi melalui serangkaian reaksi kimia yang dikenal sebagai siklus asam sitrat atau siklus asam trikarboksilat (Gambar 13.6). Langkah pertama melibatkan dekarboksilasi oksidatif dari asam piruvat menjadi asetil-koA, diikuti oleh kondensasi satu molekul asetil-koA dan satu molekul oksaloasetat untuk membentuk satu molekul asam sitrat. Sepanjang rangkaian reaksi dekarboksilasi dan oksidasi, asam sitrat diuraikan menjadi oksaloasetat, karbon dioksida dan air.

Selama metabolisme karbohidrat, baik aerobik maupun anareobik, energi yang dihasilkan adalah dalam bentuk ikatan fosfat kaya energi (ATP). Jumlah energi yang diperoleh selama penguraian satu molekul glukosa adalah 38 ikatan fosfat. Dari semua reaksi dapat disimpulkan berikut:



Energi yang dihasilkan oleh hidrolisa ATP menjadi ADP sekitar 50 kJ, ini berarti bahwa setiap molekul glukosa yang dimetabolisir menghasilkan 1900 kJ. Energi yang dapat dimetabolisir dari glukosa adalah 2900 kJ per molekul, sehingga tingkat penggunaannya adalah  $1900/2900 \times 100 = 65$  persen. Sisanya 35% hanya sebagai panas tetapi digunakan dalam menjaga temperatur tubuh.

Pada ternak ruminansia, karbohidrat difermentasikan menjadi asam asetat, propionat, butirrat dalam rumen. Asam-asam ini diabsorpsi dari rumen dan berpartisipasi dalam metabolisme energi. Tidak ada glukosa diabsorpsi pada ternak ruminansia. Asam asetat masuk ke *pathways* metabolisme sebagai asetil-koA dan dapat digunakan dalam sintesis lemak (persentase lemak tinggi dalam susu). Asam butirrat diubah ke asetoasetat dan asetil-koA dan juga dapat digunakan dalam sintesis lemak. Kedua asam ini bersifat ketogenik. Asam propionat masuk ke dalam titik lain dari siklus asam trikarboksilat dan dapat digunakan dalam sintesis glukosa dan glikogen dari asam piruvat (glukoneogenesis). Oleh karena itu asam propionat bersifat glukogenik.

#### 4. Energi

Kebutuhan energi untuk hidup pokok adalah jumlah energi ternak yang harus digunakan untuk berbagai proses dan reaksi-reaksi yang esensial untuk hidup. Kebutuhan untuk produksi adalah jumlah tambahan energi yang diperlukan untuk menunjang produksi susu, telur, daging, dan lemak atau untuk memenuhi kehilangan energi oleh tubuh dalam kerja otot. Jumlah energi yang tersedia untuk tubuh ternak bergantung pada: (1) jumlah konsumsi pakan dan (2) besarnya kehilangan yang terjadi selama proses pencernaan dan metabolisme. Pembagian energi pakan sampai menjadi energi yang dapat digunakan ternak dapat diringkaskan sebagai berikut.

Energi bruto, Energi feses, Energi dapat dicerna, Energi metabolisme, Energi di urin, dan gas (CH<sub>4</sub>), Peningkatan panas, Energi bersih, Hidup pokok, Energi untuk produksi, Energi untuk reproduksi.

Energi *input* dan *output* seharusnya diukur dalam joule (J). Satuan unit lain yang masih dipakai dalam literatur makanan ternak adalah kalori (cal). Satu kalori adalah jumlah panas yang dibutuhkan untuk meningkatkan temperatur 1 gram air sebanyak 1°C. Jadi 1 unit kilo kalori mewakili jumlah panas yang dibutuhkan untuk meningkatkan 1 kg air sebanyak 1°C, 1 kal setara dengan 4,186 kj.

Energi bruto (*gross energy*) bahan makanan adalah jumlah panas dilepaskan bila pakan tersebut dibakar secara sempurna pada bom kalorimeter di mana karbon dan hidrogen secara sempurna dioksidasi menjadi CO<sub>2</sub> dari H<sub>2</sub>O. Nilai Energi bruto hanya menunjukkan keadaan kandungan energi pakan, bukan energi yang dapat diperoleh ternak. Hanya sebagian makanan yang dapat dicerna ternak menyediakan energi yang berguna. Sebagian yang tidak dicerna hilang melalui feses, bahan lain diekskresikan oleh tubuh sebelum dioksidasi secara sempurna. Nitrogen yang diekskresikan melalui urin berbentuk urea, asam hipurat, dan amoniak, ekskresi ini menyebabkan kehilangan energi. Pada ternak ruminansia, produksi gas hasil pembakaran terutama metan juga merupakan proses kehilangan energi.

Energi metabolisme (EM) adalah energi bruto (EB) dikurangi jumlah panas dari hasil metabolisme pada feses, gas fermentasi, dan urin. Tidak semua energi metabolisme dapat digunakan ternak untuk tujuan produksi atau memenuhi kebutuhan hidup pokoknya. Hal ini disebabkan adanya kerja internal yang harus dilakukan, misalnya dalam perenggutan rumput dan pengunyahan. Terdapat suatu pembuangan energi dalam perpindahan zat nutrisi yang diserap ke jaringan. Energi yang terlibat dalam transformasi metabolis dari energi metabolis dibuang dalam

bentuk panas, di mana energi tersebut dipakai dalam kerja pencernaan dan akhirnya kehilangan. Hal ini mungkin di bawah kondisi tertentu untuk memelihara tubuh ternak hangat, tetapi secara umum panas adalah limbah metabolisme dan pada iklim sangat panas dapat menyebabkan ternak mengurangi konsumsinya.

Energi neto suatu pakan merupakan energi yang secara aktual ternak untuk memelihara proses-proses yang pokok dan pertumbuhan, deposisi lemak dan protein dalam tubuhnya untuk memproduksi fetus dan produksi susu. Jadi energi neto adalah energi metabolis dikurangi panas yang dihasilkan oleh pencernaan dan metabolisme. Net energi suatu pakan dapat menjadi negatif jika energi metabolisme yang disuplai kurang dari energi yang dikeluarkan dalam penggunaannya. Jerami mempunyai nilai rendah untuk ruminansia dan kuda yang membelanjakan banyak energi pada waktu makan dan mencerna jika menggunakan jerami dalam bentuk yang dapat dimetabolisir.

# BAB X

## FISIOLOGI OTOT

Otot adalah sistem biokontraktil di mana sel-sel atau bagian dari sel, memanjang, dan dikhususkan untuk menimbulkan tegangan pada sumbu hewan besar dan tranpor makanan, gas, darah, dan bahan-bahan lain. Kontraksi otot ini merupakan hasil kontraksi sel-sel yang berbentuk panjang, silinder, atau gelendong yang masing-masing mengandung serabut kontraktile mikroskopik yang panjang dan paralel disebut miofibril.

Sel-sel otot melakukan kerja mekanik dengan cara kontraksi, menjadi pendek dan tebal, serta tidak melakukan kerja mendorong. Pada vertebrata terdapat 3 macam jaringan otot, yaitu otot kerangka otot jantung dan otot licin (Gambar 10.1).



Gambar 10.1 Berbagai jenis serabut otot ; Sumber: Verma PS, VK Agarwar, BS Tyagi (1996)

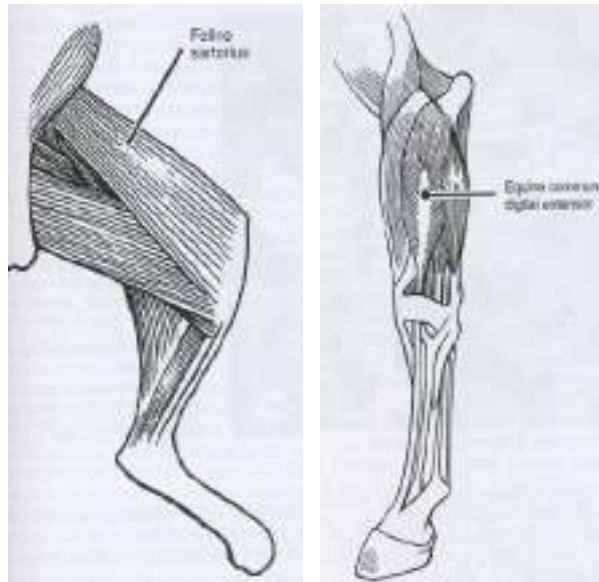
1. Otot jantung: hanya terdapat pada dinding jantung.
2. Otot licin (otot polos): terdapat di dinding saluran pencernaan, saluran air kencing, saluran kelamin, dinding arteri, dan vena.
3. Otot kerangka (otot bergaris melintang): massa otot yang bertaut pada tulang dan menggerakkan tulang-tulang tubuh.

Pada beberapa protozoa terdapat batang-batang kontraktil dan pada spons di sekitar lubang tempat air dikeluarkan dari rongga sentral, terdapat sel-sel kontraktil sederhana. Sebagai contoh, sel-sel mioepitel yang membantu mengeluarkan sekresi dari kelenjar-kelenjar keringat dan kelenjar susu. Namun kebanyakan sel otot vertebrata merupakan bagian dari jaringan otot jantung, otot licin, dan otot kerangka. Sel-sel yang memanjang atau serabut dari jaringan ini mengandung fibril kontraktil. Unsur-unsur kontraktil dari otot jantung dan otot kerangka disusun sedemikian rupa sehingga serabut otot jika dilihat di bawah mikroskop, nampak seperti bergaris melintang. Otot licin dan otot kerangka terdapat pada avertebrata. Sebagaimana halnya pada vertebrata, pada avertebrata juga terdapat otot bergaris melintang, di mana diperlukan gerakan yang cepat dan singkat. Ubur-ubur yang berenang dengan cepat mempunyai pita yang terdiri atas otot, bergaris melintang dan hampir semua otot tetrapoda bergaris melintang.

Pada kebanyakan hewan, kelompok serabut terikat menjadi satu dengan jaringan ikat di mana terdapat pembuluh darah dan uraf saraf. Namun beberapa otot yang sangat kecil pada avertebrata hanya terdiri atas beberapa serabut otot dan sedikit jaringan ikat. Kolagen yang merupakan bagian penting dari jaringan ikat vertebrata tidak terdapat pada artropoda. Perbedaan sifat-sifat ketiga jenis otot dipresentasikan pada Tabel 10.1.

Pada vertebrata, pertautan otot dengan kerangka tulang adalah oleh jaringan ikat yang beberapa di antaranya bersambung dengan

jaringan ikat periosteum yang melapisi tulang dan beberapa di antaranya masuk ke dalam tulang. Jaringan ikat antara tulang dan otot dapat membentuk tendon yang berbentuk seperti tali (Gambar 10.2).



Gambar 10.2 Skema pertautan otot pada tulang ; Sumber: Bailey JG (2004)

Otot bekerja hanya dengan kontraksi dan harus melawan daya antagonistik. Otot aduktor yang menyebabkan cangkang tiram tertutup, bekerja melawan daya ligamen pegas yang elastis yang terdapat pada engsel cangkang. Jika otot itu mengendur, ligamen membuka katup cangkang dan otot kembali ke panjang semula. Kebanyakan otot tersusun dalam pasangan yang antagonis. Sebagai contoh, otot bisep dan trisep pada lengan. Kontraksi otot bisep menyebabkan mengecilnya sudut antara lengan atas dan lengan bawah, gerakan ini disebut fleksio (penekukan) dan kontraksi triseps membesarkan sudut ini atau ekstensio (pelurusan).

Peranan kontraksi otot dalam fisiologi organisme multiseluler adalah sangat besar. Unsur-unsur otot tidak hanya terlibat ketika terjadi perpindahan bagian-bagian tertentu dari organisme, misalnya bergerak atau keseluruhan organisme (misalnya berjalan, berenang atau terbang, tetapi juga pada sejumlah gerakan internal yang melibatkan tenaga dari kontraksi. Misalnya pengeluaran darah, pertukaran zat antara lingkungan sekitarnya, perkembangan zat-zat makanan dalam sistem saluran pencernaan. Masa otot total (otot kerangka dan otot licin) pada manusia merupakan 40–50% dari masa tubuh dan secara keseluruhan jaringan otot merupakan pemakai energi yang terbesar dari energi yang dikonsumsi setiap hari.

Spektrum kebutuhan energi untuk gerak menyebar mulai dari tingkat molekul (sebagai contoh: transpor aktif dari ion-ion organik dan anorganik melewati membran sel) sampai ke skala yang lebih besar seperti migrasi pada suatu populasi hewan. Adanya keragaman fenomena gerakan mungkin merupakan hasil keragaman tersebut yang sama pada mekanisme yang menghasilkan keragaman tersebut. Oleh karena itu, studi komprehensif tentang mekanisme gerakan otot sangat diperlukan.

Setelah mengikuti kuliah fisiologi otot anda akan dapat:

- Menjelaskan bagaimana mekanisme individu otot atau kelompok otot berinteraksi menghasilkan suatu gerakan.
- Menjelaskan hubungan kontraksi otot dengan sistem sarap, sistem neurohomonal, dan energi metabolisme.

## **A. Otot Bergaris Melintang (Otot Kerangka)**

### **1. Struktur Serabut Otot Bergaris Melintang**

Sel otot bergaris melintang merupakan perkecualian dari dalil bahwa sel hanya mempunyai satu nukleus. Tiap sel otot kerangka

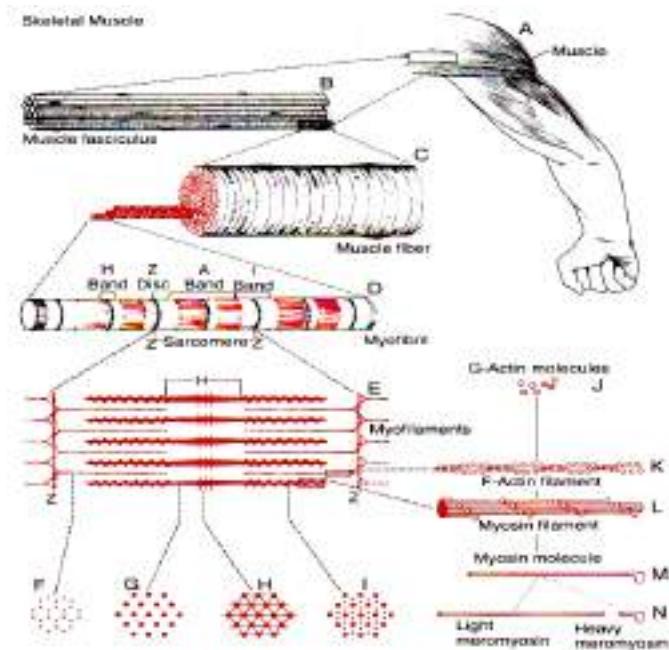
mempunyai banyak nukleus karena sel-sel ini secara embrionik berkembang dari sel-sel yang lebih kecil yang berfungsi antara ujung dengan ujung. Kedudukan nukleus otot kerangka sangat panjang, yaitu lebih dari 2 cm. Tebal serabut otot berkisar dari 10 sampai 100 mm, aktivitas yang terus-menerus meningkatkan ketebalan otot. Miofibril otot kerangka mempunyai pita-pita melintang gelap berseling terang disebut lurik. Sitoplasma serabut otot bergaris melintang penuh dengan miofibril yang longitudinal yang dapat dilihat oleh mikroskop cahaya (Gambar 10.3)

Tabel 10.1 Perbandingan karakteristik jaringan otot pada hewan vertebrata

Karakter	Otot kerangka	Otot Licin	Otot Jantung
Tempat	Melekat pada kerangka	Dinding jeroan, lambung, usus dll	Dinding jantung
Bentuk Serabut	Memanjang silindris, ujung tumpul	Memanjang berbentuk gelendong, ujung lancip	Memanjang silindris, serabut 9 sel bercabang dan menyatu
Jumlah nukelus tiap serabut (sel)	Banyak	Satu	Satu
Letak nukelus	Tepi (perifer)	Tengah	Tengah
Garis melintang	Ada	Tidak ada	Ada
Kecepatan kontraksi (berkerut)	Paling cepat	Paling lambat	Sedang (intermediate)
Kemampuan tetap kontraksi	Sebentar	Lama	Sedang
Tipe kontrol	Menurut kemauan	Tidak menurut kemauan	Tidak menurut kemauan

Dengan elektron mikroskop dan analisis biokimia dapat dibuktikan bahwa tiap miofibril terdiri atas sejumlah besar protein miofilamen longitudinal yang terdiri atas dua macam filamen, tipis dan tebal. Filamen tipis terdiri atas monomer aktin globular yang ada hubungannya dengan kompleks tropomiosin dan troponin. Filamen tebal terdiri atas ekor-ekor molekul miosin yang memanjang. Kepala molekul miosin ini menjulur ke arah filamen tipis sebagai jembatan silang yang potensial yang dapat menghubungkan filamen-filamen tersebut. Tiap kepala dan

ekor disatukan dengan satu engsel. Filamen itu disusun demikian rupa sehingga satu filamen tebal dikelilingi oleh enam filamen tipis. Kepala miosin itu mengitari filamen tebal, sehingga dengan semua filamen tipis yang mengelilinginya dapat dibuat jembatan silang (Gambar 10.3). Filamen tebal yang lebih padat berhubungan satu sama lain dan membentuk pita A yang lebih gelap dan anisotropik dalam cahaya polar. Filamen tipis membentuk pita I yang lebih terang dan isotropik. Kedua jenis filamen itu bertumpang tindih sebagian yang menyebabkan adanya bagian yang lebih padat dan bagian kurang padat pada pita A (cawan Hensen atau Zone H). Garis Z, tempat bertautnya filamen tipis, menyebrangi miofibril di pusat pita I. Bagian miofibril yang terletak antara dua garis Z disebut sarkomer.

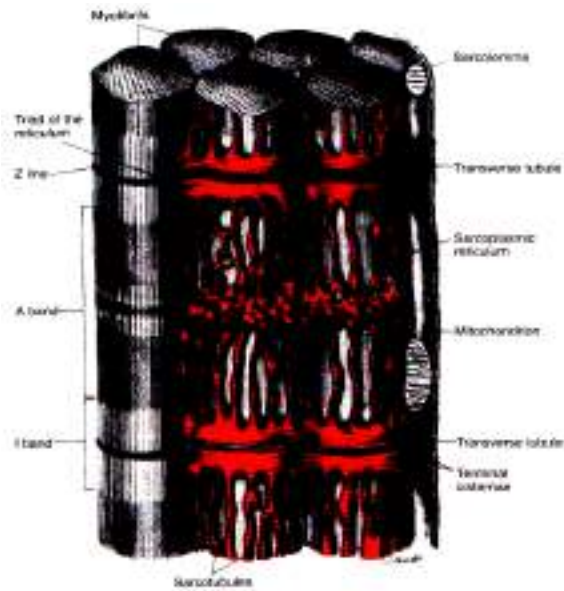


Gambar 10.3 Diagram struktur otot kerangka ; Sumber: Guyton AC (1991)

Filamen tipis dibentuk dari 2 rantai unit globular yang membentuk pilinan rangkap yang panjang. Molekul tropomiosin adalah filamen panjang yang terletak pada alur antara 2 rantai aktin. Tiap filamen halus mengandung 300–400 molekul aktin dan 40–60 molekul tropomiosin. Molekul troponin merupakan unit globuler kecil yang terletak berselang-selang sepanjang molekul tropomiosin yang panjang (Gambar 10.2 F. G. H. I).

## **2. Sistem Sarkotubulus**

Fibril-fibril otot dikelilingi oleh bentukan-bentukan yang tersusun dari membran yang tampak pada fotomikrograf elektron sebagai lepuh-lepuh sel dan tubulus-tubulus. Bentukan-bentukan ini merupakan sistem T dan retikulum sarkoplasma. Sistem T dari tubulus melintang yang merupakan kelanjutan dari membran serabut otot membentuk kisi-kisi yang ditembus oleh fibril-fibril otot (Gambar 10.4). Ruang antara 2 lapisan sistem T merupakan perluasan dari ruangan ekstrasel. Retikulum sarkoplasma membentuk sebuah tirai yang teratur sekitar tiap-tiap fibril di antara hubungan-hubungan dengan sistem T yang pada otot kerangka mamalia adalah pada pertemuan dari jalur A dan I. Pada pertemuan ini susunan sistem T tengah dengan retikulum sarkoplasma pada kedua sisinya memungkinkan penggunaan nama triad untuk menguraikan sistem ini. Fungsi sistem T adalah untuk penghantaran potensial aksi yang cepat dari membran sel keseluruhan fibril dalam otot. Retikulum sarkoplasma mempunyai hubungan dengan gerakan  $Ca^{++}$  dan metabolisme otot.



Gambar 10.4 Sistem tubulus/retikulum sarkoplasma trasversal dari otot katak  
Sumber: Guyton AC (1991)

### 3. Sifat-sifat Listrik Otot Bergaris Melintang

Peristiwa listrik pada otot kerangka dan arus ion yang mendasarinya adalah sama seperti pada saraf, walaupun terdapat beberapa perbedaan kuantitatif dalam waktu dan besarnya. Potensial membran diam otot kerangka adalah kira-kira -90 mV. Potensial aksi berlangsung kira-kira 2–4 milidetik (milisecon) dan dihantarkan sepanjang serabut otot dengan kecepatan kira-kira 5 meter/detik (m/s). Masa refrakter absolut adalah 1–3 ms dan polarisasi kemudian dengan perubahan-perubahan pada ambang untuk perangsangan listrik dan rangsangan relatif panjang. Kontraksi otot kerangka umumnya sedikit lebih panjang daripada kontraksi saraf.

### 4. Kontraksi Otot Bergaris Melintang

Jika otot kerangka berkontraksi, pita I menyempit dan zone H dapat hilang karena garis Z saling mendekat dan bila otot ditegangkan garis Z

saling menjauh (Gambar 10.3). Sewaktu otot memendek, filamen halus akan saling mendekati, apabila pemendekan ini jelas, filamen-filamen tapaknya akan saling menutupi. Derajat penyempitan pita I bergantung pada kekuatan kontraksi.

Teori yang menerangkan kontraksi otot berdasarkan pengamatan dari perubahan-perubahan struktur sarkomer selama kontraksi disebut filamen penggelincir dari kontraksi otot (*The Sliding-filament Theory of Contraction*).

Pada waktu istirahat tidak ada interaksi antara filamen-filamen karena tempat aktif pada filamen aktin dimana kepala miosin itu dapat terikat, diblokir oleh tropomiosin. Jika suatu serabut otot dirangsang, pada membran plasma atau sarkolema terjadi perubahan-perubahan yang menyebabkan dihilangkannya blokade tempat-tempat aktif tersebut. Pada waktu istirahat, plasmalema mempunyai muatan listrik yang disebut potensial rehat yang disebabkan oleh konsentrasi  $\text{Na}^+$  yang tinggi di luar. Jika suatu impuls saraf sampai pada suatu ujung neuron atau keping akhir motor, suatu zat transmitter biasanya disebut asetilkolin yang dilepaskan oleh ujung neuron dan menyebabkan perubahan permeabilitas sarkolema sedemikian rupa, sehingga ion  $\text{Na}^+$  mengalir dengan cepat kedalam. Hal ini untuk sesaat membalikkan muatan listrik dan merupakan potensial aksi. Potensial aksi ini merambat dan menyebar dengan cepat melalui sarkolema dan jauh ke dalam serabut, tempat sarkolema terlipat sebagai tubulus melintang. Pada banyak otot, tubulus ini terletak di dekat garis Z.

Ion  $\text{Ca}^{++}$  yang ada di dalam kantung simpanan retikulum sarkolema, yaitu sisterna, kemudian dilepaskan dan bersenyawa dengan troponin dan mengubah konfigurasinya sedemikian rupa sehingga tropomiosin ditarik dari tempat pada aktin. Sekarang kepala miosin mengikat diri pada tempat ini.

Proses depolarisasi serabut otot memulai kontraksi dinamakan rangkaian eksitasi-kontraksi. Potensial aksi dihantarkan keseluruh fibril dalam serabut melalui sistem T. Ini memacu pembebasan  $Ca^{++}$  dari lepuh-lepuh ujung, yaitu kantong-kantong samping dari retikulum sarkoplasma yang berdekatan dengan sistem T.  $Ca^{++}$  akan mengawali kontraksi dengan mengikat pada troponin C. Pada otot diam, troponin I terikat sangat erat pada aktin dan tropomiosin menutupi daerah di mana kepala miosin berikatan dengan aktin. Jadi, kompleks troponin-tropomiosin merupakan suatu protein pelepas yang menghambat interaksi antara aktin dan miosin. Apabila  $Ca^{++}$  yang dibebaskan oleh potensial aksi mengikat pada troponin C, ikatan troponin I dengan aktin diduga melemah, dan memungkinkan tropomiosin bergerak ke samping. Gerakan ini membebaskan daerah ikatan untuk kepala miosin, sehingga ATP dipecahkan terjadilah kontraksi.

Tujuh permukaan pengikatan miosin tidak ditutupi untuk tiap-tiap molekul troponin yang mengikat ion kalsium. Setelah pembebasan  $Ca^{++}$ , retikulum sarkoplasma mulai menimbun  $Ca^{++}$ ,  $Ca^{++}$  secara aktif dipompa ke dalam bagian membujur dari retikulum dan dari sini berdifusi ke lepuh-lepuh pada ujungnya, di mana  $Ca^{++}$  disimpan. Apabila konsentrasi  $Ca^{++}$  di luar retikulum telah cukup diturunkan, interaksi kimia antara miosin dan aktin akan berhenti dan otot melemas (relaksasi). Bila transpor aktif  $Ca^{++}$  dihambat, relaksasi tidak terjadi meskipun tidak ada lagi potensial aksi, kontraksi bertahan yang ditimbulkan dinamakan kontraktur. Jadi, relaksasi dan kontraksi otot keduanya memerlukan ATP. Otot yang tidak mempunyai sumber ATP akan tetap berkontraksi. Kita mengenal hal ini sebagai kekejangan otot atau setelah meninggal sebagai **rigor mortis**.

Pengikatan dan pelepasan tiap kepala miosin menggunakan satu molekul ATP. Jika persediaan ATP yang sedikit dalam sel itu habis terpakai, ATP disintesis lagi dari ADP dengan pemindahan satu gugus

fosfat dari fosfat lain yang kaya energi, yaitu kreatin fosfat pada otot vertebrata dan avertebrata dan arginin fosfat pada kebanyakan otot vertebrata. Akhirnya fosfat kaya energi ini dibuat lagi dengan metabolisme makanan dalam daur glikolitik dan asam sitrat.

## **B. Otot Licin dan Otot Jantung**

Pembahasan tentang otot licin dan otot jantung tidak sebanyak otot bergaris melintang karena penelitian-penelitian tentang otot ini tidak sebanyak otot kerangka.

### **1. Otot Licin**

Otot licin tidak memperlihatkan garis bersilang dan hanya mengandung satu atau dua jenis filamen, mempunyai dua ujung yang lancip, dan letak nukleus di sentral. Otot licin ditemukan pada semua jenis hewan multiseluler. Otot licin tersebar dalam tubuh hewan, menyusun bagian penting dari dinding organ seperti saluran pencernaan, sistem reproduksi, dan pembuluh darah. Pada bagian-bagian tertentu, otot licin membentuk sebuah lapisan yang melapisi suatu saluran. Fungsi utama biasanya menekan isi satu ruang atau mengosongkan isi ruang. Otot licin sudah lama digunakan sebagai salah satu jaringan yang disukai untuk penelitian aktivitas obat-obatan atau zat kimia lainnya oleh farmakologis.

#### **1.1 Struktur Otot Licin**

Serabut otot licin selalu merupakan sel-sel tunggal yang mengandung hanya satu nukleus. Biasanya dalam bentuk benang dan sedikit lebih kecil. Pada vertebrata, panjang selnya sekitar 50–300  $\mu\text{m}$  dan berdiameter 5–50  $\mu\text{m}$ . Pada beberapa invertebrata, serabut otot licin adalah lebih besar misalnya pada nematoda, seperti *Ascaris*, diameter selnya mencapai 1 mm.

Banyak sel otot licin kekurangan inervasi langsung sel-sel lainnya secara langsung diinervasi oleh satu atau beberapa saraf pada ujung dari permukaan. Sel-sel dengan ujung ganda mungkin diinervasi oleh lebih dari sel saraf. Persimpangan neuromuskular pada otot licin adalah lebih sederhana dalam strukturnya dari pada *motor end plate* otot bergaris melintang.

Retikulum sarkoplasma terdapat pada otot licin vertebrata dan otot licin klasik lainnya. Tubulus transversal (T tubulus) tidak ada. Mitokondria juga terdapat pada otot licin, tetapi variasi dalam jumlah, ukuran, dan distribusinya belum banyak dipelajari.

Bagian kontraktile pada otot licin terbuat dari fibril-fibril ultramikroskopik. Namun demikian, terdapat ketidakteraturan dalam pola dan distribusinya. Filamen tipis dan Filamen tebal keduanya ada, di mana tipis umumnya lebih banyak. Filamen tipis terdiri dari aktin dan tropomiosin, sedangkan filamen tebal tersusun dari miosin.

## 1.2 Komposisi Kimia

Pada otot licin vertebrata, komposisi anorganik dan berat molekul organik terlihat sama dengan otot kerang pada hewan yang sama. Namun demikian, terdapat variasi yang penting dalam komposisi organik pada sejumlah otot licin.

Sel-sel kontraktile dari otot licin vertebrata tersusun dari aktin miosin dan tropomiosin yang pada dasarnya komposisi dan sifat-sifatnya sama dengan otot kerangka. Aktin dan tropomiosin secara proporsional lebih banyak dari yang ada pada otot kerangka.

## 1.3 Kontraksi Otot Licin

Mekanisme dasar kontraksi otot licin sama dengan kontraksi otot bergaris melintang. Serabut-serabutnya mengandung aktin dan miosin, tetapi miofilamen ini tersebar dan tidak terdapat dalam register

(Gambar 10.3). Serabut otot licin jauh lebih kecil dari serabut otot kerangka, sehingga ion Ca tidak disimpan dalam retikulum sarkoplasma tetapi dalam cairan ekstraseluler.

Aktivitas menyangkut pemasukan ion  $Ca^{++}$ , kemudian pembentukan jembatan silang antara aktin dan miosin. Pada waktu jembatan itu terbentuk, filamen aktin menarik "benda padat" yang berada di posisi tetap dalam sitoplasma dan serabut itu memendek.

Meskipun serabut otot licin di berbagai alat tampaknya hampir sama, tetapi otot itu mempunyai sifat yang berbeda-beda otot licin vertebrata dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu multiunit dan visceral. Serabut otot licin multiunit terdapat pada iris dan badan silier mata, membentuk otot arektor pili rambut dan terdapat di dinding pembuluh darah. Sel-sel ini dirangsang untuk berkontraksi oleh impuls saraf yang mencapai tiap serabut pada keping akhir motor serabut-serabut tertentu, seperti serabut radial yang membuka pupil dari iris, diaktifkan oleh neuron dari sistem saraf simpatik. Lainnya termasuk serat sirkular di iris yang menutup pupil, diaktifkan oleh sistem saraf parasimpatik. Serabut otot licin visceral yang merupakan bagian dari dinding saluran pencernaan, uterus dan alat visceral lainnya tergabung lebih padat. Hanya beberapa serabut serabut saja yang mempunyai keping akhir, tetapi aksi potensial yang timbul pada satu serabut dapat pada unit motornya. Otot mata yang menjadi celah penghubung yang menyatukan plasma membran pada sejumlah tempat dengan erat. Kelompok-kelompok otot licin visceral biasanya menerima inervasi simpatik maupun para simpatik. Hal ini menghasilkan efek yang antagonistik pada alat-alat yang satu menyebabkan kontraksi, yang lain mencegahnya. Otot licin visceral juga mempunyai aktivitas spontan dan akan berkontraksi jika diregangkan, seperti halnya jika organ itu berisi cairan atau darah.

Meskipun kekurangan organisasi struktural dari fibril intraseluler, kontraksi otot licin hasil dari mekanisme pergeseran filamen (*Sliding filamen*). Ion  $Ca^{++}$  bebas memainkan peranan penting dalam kontraksi otot licin seperti halnya yang terjadi pada otot kerangka. Kurang berkembangnya retikulum sarkoplasma, nampaknya berhubungan dengan penggunaan cairan ekstraseluler sebagai sumber  $Ca^{++}$  yang dibutuhkan, meskipun sumber intraseluler juga digunakan. Mekanisme pemenuhan energi pada otot licin belum banyak diketahui dengan baik. Komponen yang biasa digunakan adalah adenosin trifosfat (ATP) dan kreatin fosfat (CP), tetapi kandungan kreatin fosfat dalam otot licin lebih rendah dari pada otot bergaris melintang.

## **2. Otot Jantung**

### **2.1 Struktur Otot Jantung**

Otot jantung adalah uniseluler dan tidak multiseluler. Garis pada otot jantung adalah sama seperti pada otot kerangka dan terdapat garis-garis Z. Serabut-serabut otot bercabang-cabang dan saling berhubungan, tetapi masing-masing adalah unit yang lengkap dikelilingi oleh membran sel. *Intercalated disk* (cakram sisipan) yang nampak pada serabut dengan mikroskop elektron sebagai membran sel yang terikat sangat erat. Otot-otot atrium terpisah dari otot-otot ventrikel, tetapi dalam tiap kelompok, masing-masing serabut otot disatukan dengan erat oleh ikatan khusus yang hanya merupakan rintangan kecil bagi menyebarnya potensial aksi dari serabut keserabut lain. Secara fungsional otot atrium dan ventrikel masing-masing bekerja sebagai satu unit atau sinsitium.

Sistem T pada otot jantung terletak pada garis Z bukan pada batas A - I (seperti pada otot kerangka vertebrata). Otot jantung mengandung banyak mitokondria yang memanjang dan berhubungan erat dengan fibril.

## 2.2 Komposisi Kimia

Pada hewan yang sama, kandungan anorganik otot jantung umumnya sama dengan kandungan anorganik otot kerangka. Sangat sukar menyamaratakan kandungan organik otot jantung berat molekulnya rendah karena otot jantung bervariasi sekali dalam kebutuhan metabolismenya pada organisme yang berbeda. Sebagai contoh, jantung burung dan mamalia mempunyai kapasitas rendah untuk fungsi metabolisme anaerobik, sedangkan jantung berbagai hewan ektoterm mempunyai kapasitas yang lebih besar untuk fungsi tersebut. Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh perbedaan dalam tingkat perkembangan dari sel-sel untuk proses glikolisis anaerobik.

Sel-sel kontraktile otot jantung sama seperti halnya pada otot kerangka. Meskipun demikian, miosin jantung berbeda sedikit miosin otot kerangka yaitu miosinnya lebih besar, memisah pada waktu dihidrolisa oleh enzim proteolitik, dan memperlihatkan aktivitas ATPase rendah terhadap kondisi tertentu. Namun perbedaan ini tidak memengaruhi perbedaan fungsi miosin pada kedua jenis otot.

## 2.3 Kontraksi Otot Jantung

Potensial aksi sarkolema bertanggung jawab terhadap eksitasi pada otot-otot jantung seperti halnya pada otot kerangka. Telah dibuktikan pada bagian dari otot jantung yang diisolasi memperlihatkan kontraksi spontan. Peranan "*pacemaker*" dan sistem penyaluran impuls sangat besar terhadap aktivitas spontan ini.

Potensial aksi jantung benar-benar sangat lama (lebih dari 1 detik pada jantung katak pada temperatur kamar) dan transmisi interseluler melalui cakram sisipan adalah dengan cara listrik atau dengan cara mekanisme kimia yang beroperasi pada berbagai sinaps sistem saraf. Siklus kontraksi otot jantung lebih lama dari yang terjadi pada otot

kerangka. Pada ventrikel jantung katak lama kontraksinya proporsional dengan lama potensial aksi. Jantung katak dapat disamakan dengan otot invertebrata yaitu otot remis. Miokardium mamalia lebih menyerupai otot kerangka cepat.

Proses-proses rangkaian eksitasi-kontraksi dan kontraksi itu sendiri nampaknya sama antara otot jantung dan otot kerangka. Namun demikian, terdapat beberapa perbedaan kuantitatif. Sebagai contoh, kepekaan dari otot jantung terhadap  $Ca^{++}$  lebih besar pada otot jantung dari pada otot kerangka. Afinitas  $Ca^{++}$  dari troponin jantung hanya 1/3 dari troponin otot kerangka. Aktivitas ATPase miosin jantung adalah lebih rendah dibandingkan dengan yang ditemukan pada miosin otot kerangka. Adanya variasi tingkat perkembangan retikulum sarkoplasma juga menghasilkan beberapa perbedaan dalam mekanisme yang lebih mendetail. Cairan ekstraseluler dan via sarkolema adalah sumber  $Ca^{++}$  yang dibutuhkan untuk masuknya kontraksi tunggal selama potensial aksi, terutama sebelum fase dasar. Ion  $Ca^{++}$  sisa yang dibutuhkan berasal dari "*binding sites*" membran intraseluler, terutama dalam sarkolema.

Rangsangan menimbulkan potensial aksi yang beredar yang bertanggung jawab untuk permulaan kontraksi. Depolarisasi berlangsung dengan cepat dan terdapat pelintasan berlebih (*overshoot*), seperti pada otot kerangka dan saraf. Akan tetapi diikuti oleh sebuah dataran (*plateau*) sebelum potensial membran kembali pada garis dasar. Pada jantung mamalia, depolarisasi berlangsung kira-kira 2 milidetik, tetapi fase datar dan repolarisasi mengambil 200 milidetik atau lebih. Oleh karena itu repolarisasi tidak lengkap sebelum kontraksi mengakhiri separuhnya.

Seperti pada jaringan peka rangsang lainnya, perubahan kontraksi  $K^+$  di luar sel memengaruhi potensial membran diam otot jantung,

sedangkan perubahan pada konsentrasi  $\text{Na}^+$  di luar sel memengaruhi potensial aksi. Depolarisasi inisial yang cepat dan pelintasan berlebih disebabkan naiknya dengan cepat permeabilitas  $\text{Na}^+$  yang sama terjadi pada saraf dan otot kerangka, sedangkan fase datar kedua disebabkan kenaikan permeabilitas kalsium yang memulai awal, kurang kuat, dan lebih memanjang.

Fase ketiga adalah manifestasi kenaikan permeabilitas  $\text{K}^+$  yang terlambat. Kenaikan ini menyebabkan arus keluar  $\text{K}^+$  yang melingkapi repolarisasi.

Pada otot jantung, waktu repolarisasi akan menurun apabila frekuensi jantung meningkat. Pada frekuensi jantung 75 per menit waktu potensial aksi (0,25 detik) menjadi 70% lebih lama dari waktu itu pada frekuensi jantung 200 per menit (0,15 detik).

#### 2.4 Jaringan Pacemaker (*Pacemaker*)

Jantung terus berdenyut setelah semua saraf yang menuju jaringan pacemaker dipotong-potong, sesungguhnya bila jantung dipotong-otong akan terus berdenyut. Ini disebabkan adanya jaringan pacemaker khusus dalam jantung yang dapat membangkitkan potensial aksi yang berulang. Jaringan pengatur sistem penghantar yang normal mengedarkan impuls ke seluruh jantung.

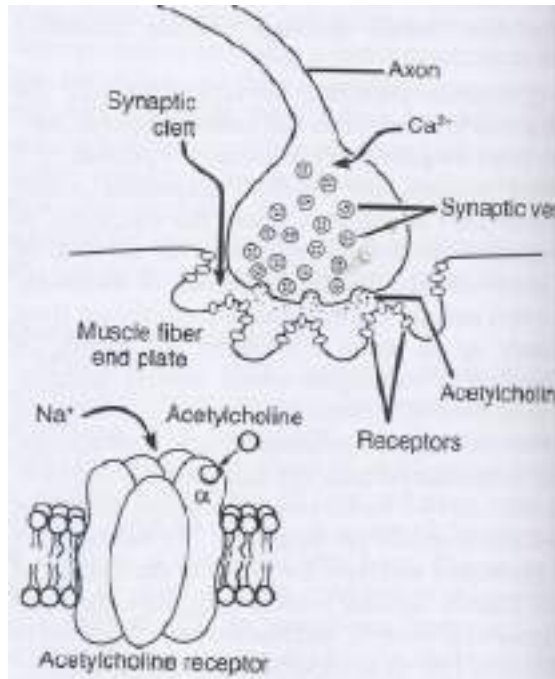
Jaringan pacemaker mempunyai ciri khas ialah potensial membran yang tidak stabil. Bukan mempunyai potensial yang tetap terdapat antara impuls, melainkan potensial yang menurun dengan tetap pada tiap potensial aksi, berakhir sampai titik-titik dicapai dan potensial aksi baru terpacu. Depolarisasi lamban antara potensial aksi baru dinamakan potensial pacemaker.

## C. Fisiologi Kontraksi Otot

### 1. Unit Motor

Menurut ahli fisiologi, kontraksi otot adalah suatu aktivitas yang menghasilkan suatu tegangan dalam otot. Biasanya kontraksi itu disebabkan oleh suatu impuls saraf. Dalam sebuah otot vertebrata yang khas, sebuah neuron akan bercabang sedemikian rupa sehingga mempunyai satu atau lebih keping akhir motor pada tiap-tiap serabut otot. Neuron dan serabut-serabut otot yang dilayani merupakan suatu unit motor. Jumlah serabut-serabut otot dalam satu unit motor berbeda-beda dan derajat kehalusan kontrol aktivitas suatu otot berbanding terbalik dengan jumlah serabut otot yang terdapat pada pada unit motornya. Otot mata yang menggerakkan mata kita hanya mempunyai dua atau tiga serabut tiap unit, sedangkan beberapa otot kaki kita mempunyai beberapa ratus per unit.

Sel-sel otot kerangka yang dirangsang akan berkontraksi melalui potensial aksi dihasilkan oleh sel-sel saraf yang dinamakan motor neuron. Akson setiap motor neuron dapat menginerfasi satu sel otot atau beberapa sel. Satu unit motor terdiri dari neuron motor dan semua serabut otot kerangka diinervasi. Serabut otot kerangka secara individu, begitu distimulasi bisa berkontraksi secara penuh sehingga menghasilkan tenaga atau sama sekali tidak beraksi. Secara keseluruhan otot kerangka tersusun dari banyak unit motor. Oleh karena itu tenaga kontraksinya bervariasi, bergantung pada sistem saraf pusat yang merangsang sejumlah unit motor tertentu. Unit motor yang terbesar, di mana satu akson menyuplai banyak serabut otot ditemukan pada otot paha dan otot tubuh. Unit motor yang terkecil di mana satu akson hanya dapat mensuplai beberapa serabut otot ditemukan pada gerakan otot mata. Daerah lokalisasi komunikasi antara akson dan serabut otot dinamakan *neuronmuscular junction* (Gambar 10.5).



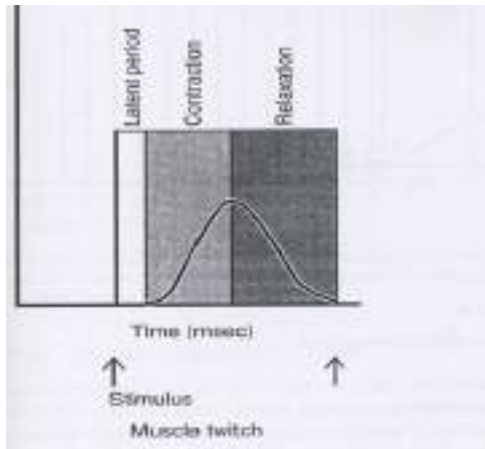
Gambar 10.5 Skema dari neuron *junction* dan hubungannya dengan saluran reseptor asetilkolin

*Neuromuscular junction* (pertautan otot/saraf terjadi pada ujung serabut otot daerah serabut otot ini dikenal sebagai tempat terakhir, di mana akson tidak benar-benar kontak serabut otot tapi dipisahkan dengan celah yang lebarnya 50 nm. Istilah *neuromuscular junction* juga dikenal sebagai motor terminal atau *motor end plate*, juga merupakan bentuk khusus dari sinap.

## 2. Tahapan Kontraksi

Serabut otot dapat diaktifkan oleh suatu impuls saraf tunggal, tetapi mungkin dibutuhkan dua atau tiga impuls beruntun yang cepat. Impuls pertama mencetuskan suatu perubahan yang menjadi landasan bagi perubahan berikutnya jika impuls datang sebelum efek impuls pertama itu hilang. Impuls pertama tersebut dikatakan memudahkan aktivasi.

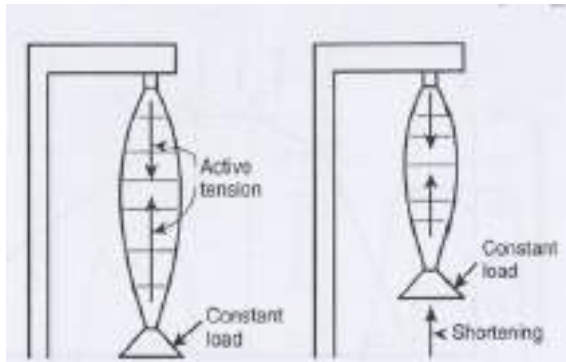
Aktivasi membutuhkan waktu beberapa milisekon karena itu ada suatu penundaan atau periode laten antara aplikasi stimulus dan permulaan pebuatan jembatan silang dan memendeknya unsur kontraktil (Gambar 10.6). Pengaruh pertama adalah meregangkan komponen-komponen elastis di dalam otot, termasuk daerah engsel molekul miosin, jaringan ikat dan tendon. Tegangan timbul dan dalam periode kontraksi ini otot dapat memendek. Tegangan berkurang dalam periode relaksasi yang berlangsung lebih lama.



Gambar 10.6. Fase-fase kontraksi otot pada saat dirangsang

Jika otot bekerja melawan beban yang tetap dan jika terjadi tegangan, otot secara keseluruhan akan memendek dan kontraksinya dinamakan isotonik atau kerja positif. Jika ujung otot terpaut pada tulang yang tidak bebas bergerak dan jika unsur elastis diregangkan, terjadi pemendekan dan tegangan internal tetapi tidak terjadi pemendekan otot secara keseluruhan. Hal ini disebut *kontraksi isometrik*. Pada kontraksi kerja negatif, panjang otot bertambah jika terjadi tegangan. Pada waktu kita berdiri setelah duduk, otot di bagian belakang paha berkontraksi ketika otot menarik paha ke bawah panggul, tetapi pada waktu bersamaan memanjang ketika kaki tempat

bertautnya, melurus (Gambar 10.7) memperlihatkan karakteristik dari kontraksi isotonik dan isoetrik kerutan tunggal (*single twitch*) dalam memberikan respons terhadap rangsangan depolarisasi tunggal.



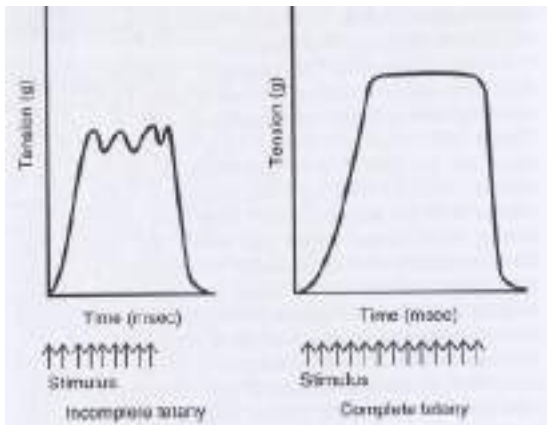
Kontraksi isometrik: Te-  
ngangan berkembang tetapi  
otot tidak memendek

Kontraksi isotonik: tegan-  
gan berkembang dan  
terjadi pemendekan otot

Gambar 10.7 Skema perbedaan kontaksi otot isometrik dan isotonik  
Sumber: Bailey JG (2004)

Jika suatu unit motor dirangsang dengan listrik melalui neuron, suatu rangsangan tunggal dengan intensitas ambang akan menyebabkan suatu getaran sederhana. Hal ini merupakan fenomena semua atau sama sekali tidak karena aksi potensial menjalar ke seluruh serabut dan getaran itu maksimal, satu rangsangan yang lebih kuat tidak akan menyebabkan getaran yang lebih kuat. Tingkat kekuatan kontraksi dapat berkembang dengan dua cara. Jika rangsangan kedua sampai di motor unit sebelum efek rangsangan pertama habis, suatu getaran ke dua akan ditimbulkan pada yang pertama. Ini dapat terjadi karena getaran tersebut berlangsung begitu cepat sehingga tidak melibatkan seluruh kepala miosin atau merenggangkan semua komponen elastis. Fenomena ini disebut sumasi temporal. Jika rangsangan itu mencapai motor unit

begitu cepat sehingga tidak terjadi relaksasi antara getaran-getaran, tegangan berkembang begitu cepat sampai mencapai titik di mana tegangan tidak dapat bertambah lagi, meskipun laju rangsangan itu ditingkatkan. Otot itu dalam keadaan tetanus dan keadaan ini akan bertambah sampai rangsangan itu berhenti atau otot itu capai (Gambar 10.8). Tetanus sempurna terjadi jika tidak ada relaksasi di antara rangsangan dan tetanus tidak sempurna bila terdapat masa relaksasi tidak sempurna di antara rangsangan sumasi.



Gambar 10.8 Dua bentuk kontraksi otot tetanus

Selama tetanus sempurna, tegangan yang dihasilkan adalah 4 kali tegangan pada kontraksi kerutan tunggal. Respons kontraktile dapat juga ditingkatkan dengan menambah jumlah motor unit, suatu fenomena yang disebut sumasi spesial.

Unit-unit motor di dalam otot jarang aktif dalam waktu yang bersamaan jika beberapa otot istirahat dan yang lainnya berkontraksi. Dengan cara ini otot dapat berkontraksi selama waktu yang lama tanpa kecapaian. Sebagian besar otot dalam tubuh kita selalu berada dalam kontraksi parsial, yang disebut tonus. Hal ini menyebabkan alat-alat berada dalam hubungan spesial yang baik terhadap satu sama lain.

### **3. Jenis Otot**

Agar otot itu bekerja secara efisien dalam gerakan, tegangan yang dikembangkan dan kecepatan kontraksinya harus sesuai dengan keadaan di mana hal itu dilakukan. Dalam hal ini sifat-sifat itu tidak sama. Kebanyakan otot kerangka vertebrata tingkat tinggi adalah otot kejang atau fasik.

Otot-otot fasik berbeda-beda dalam kecepatan kontraksi dan kelelahan. Serabut fasik lamban yang digunakan dalam kontraksi postural yang lama dan gerakan lamban sering berwarna merah karena mengandung hemoglobin otot (mioglobin). Afinitas mioglobin terhadap oksigen lebih tinggi daripada hemoglobin dalam darah, sehingga mioglobin mempercepat pemindahan oksigen dari darah ke otot. Mitokondria terdapat dalam jumlah yang besar karena sebagian besar energi dari serabut fasik lamban didapat dari fosforilasi oksidatif. Serabut-serabut ini berkontraksi secara pelan dan tidak lebih cepat daripada laju penyaluran oksigen dan makanan padanya.

Serabut-serabut ini tidak berhutang oksigen dan tidak mudah letih. Serabut fasik cepat atau serabut glikolitik, dipakai bila diperlukan aktivitas yang pendek dan cepat tidak mempunyai mioglobin dan berwarna keputih-putihan jumlah mitokondria sedikit karena energi yang diperlukan didapat secara cepat dari glikolisis anaerobik glikogen yang disimpan. Serabut ini berkontraksi cepat tetapi membuat hutang oksigen dan mudah letih. Setelah ledakan aktivitas, energi tersebut diisi kembali. Kadang-kadang serabut fasik cepat dan lamban dipisahkan dalam otot yang berbeda-beda, contoh yang lazim adalah daging gelap dan daging putih ayam, tetapi biasanya dalam satu otot terdapat campuran kedua serabut tersebut. Sistem dua serabut cepat dan lamban adalah efisien, tetapi dari segi ruang dan bobot tidak ekonomis. Hal ini bukan merupakan masalah bagi kebanyakan vertebrata karena hewan tersebut relatif besar.

Beberapa otot vertebrata adalah tonik. Otot tonik mirip serabut fasik lamban dalam kelambanan kontraksi dan keletihan, tetapi berbeda karena mempunyai keping akhir motor yang banyak pada tiap serabut. Serabut-serabut ini bukan semua atau sama sekali tidak. Aktivasi oleh suatu impuls saraf hanya terbatas pada beberapa sarkomer karena aksi potensial tidak merambat jauh. Peningkatan daya didapat dengan frekuensi impuls yang lebih banyak sehingga menyebabkan penyebaran aksipotensial yang lebih luas. Pada mamalia serabut tonik terdapat pada keadaan di mana peningkatan daya diperlukan dalam otot kecil, seperti pada otot mata dan serabut intrafusal pada gelondong otot.

#### **4. Daya, Kerja, dan Tenaga**

Daya yang dapat ditimbulkan oleh otot bergantung pada fungsi dari sejumlah jembatan silang yang dapat dibentuk pada suatu saat dan pembentukan jembatan silang ini bergantung pada jumlah serabut yang terdapat dalam otot. Jumlah serabut dapat dihitung dengan menentukan luas irisan melintang, sehingga daya adalah sebanding dengan irisan melintang otot. Daya kontraksi maksimum per satuan luas untuk sejumlah otot ternyata hampir sama, berkisar antara kira-kira  $4\text{--}6 \text{ kg cm}^{-2}$  untuk berbagai otot seperti aduktor tiram, otot kaki belakang, dan otot kaki manusia.

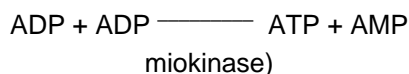
Kerja yang dapat dilakukan oleh otot yaitu hasil dari daya yang dikeluarkan sepanjang jarak yang dijalani oleh daya per unit otot, yaitu per gram juga sangat sama, tetapi jelas sangat berbeda untuk seluruh otot. Otot besar yang mempunyai luas irisan melintang dan daya yang besar dan cukup lama untuk berkontraksi dalam jarak yang lumayan (biasanya sepertiga dari panjangnya pada waktu istirahat) dapat bekerja lebih banyak daripada otot kecil. Jumlah keseluruhan kerja sebanding dengan masa otot.

Suatu kualitas lain yang sangat berbeda dalam satuan dasar adalah tenaga karena tenaga adalah laju pelaksanaan kerja yaitu kerja/waktu. Otot kecil celurut dapat berkontraksi sepertiga panjangnya jauh lebih cepat daripada otot gajah yang besar. Jadi tenaga otot celurut itu per gram ototnya jauh lebih besar.

Kontraksi lebih cepat, sehingga daur pembentukan dan pelepasan jembatan silang juga jauh lebih cepat karena satu molekul ATP dipakai untuk jembatan silang, sehingga per gram otot lebih banyak terpakai ATP. Di samping pertimbangan permukaan volume, hal ini merupakan faktor penting dalam menjelaskan sebab-akibat tingkat metabolisme yang tinggi pada hewan kecil.

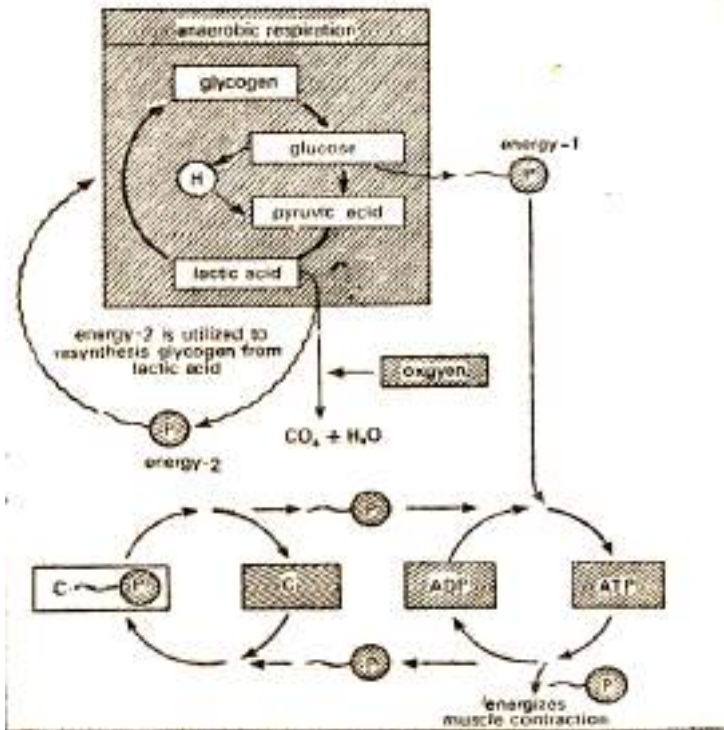
## **D. Aspek Energi Kontraksi Otot**

Kontraksi otot memerlukan energi dan otot diibaratkan sebagai "suatu mesin untuk mengubah energi kimia menjadi energi mekanik". Sumber langsung dari energi ini adalah derivat-derivat fosfat organik yang kaya energi dalam otot, sumber terakhir adalah metabolisme antara dari karbohidrat dan lipida. Hidrosis ATP untuk menyediakan energi untuk kontraksi telah dibicarakan diatas (sub-bab B). ATP dibutuhkan untuk dua peristiwa penting selama kontraksi, ketika terjadi pelekatan miosin-aktin dan transpor aktif kedalam retikulum sarkoplasma. Diestimasi bahwa jumlah ATP yang dihidrolisa untuk relaksasi sekitar 1/3 dari konsumsi ATP, sedangkan untuk kontraksi yaitu dua per tiga. Konsentrasi ATP dalam sarkoplasma adalah rendah (2–4 mmol per liter) dan harus diregenerasi dengan cepat. Beberapa proses regenerasi ATP terjadi setelah atau selama kontraksi. Salah satu proses yang melibatkan dua cara fosforisasi yang menghasilkan ATP asal dari ADP. Dua molekul ADP dapat memberikan satu ATP, reaksinya dikatalisir oleh enzim otot yang bernama miokinase.



ADP dapat diubah menjadi ATP berasal dari molekul yang kaya energi terdapat pada sitoplasma, disebut phospagen. Pada vertebrata dan beberapa invertebrata, kreatin fosfat mewakili sumber energi sedangkan pada invertebrata umumnya arginin fosfat.

Penggunaan energi oleh otot dengan laju kontraksi yang relatif pelan, tidak akan melebihi laju penyaluran energi dan oksigen dari metabolisme makanan. Namun serabut-serabut yang digunakan dalam aktivitas yang tinggi menyimpan glikogen dalam jumlah besar. Jika kecepatan penyaluran oksigen tidak seperti yang diperlukan untuk fosforilasi oksidatif, kebutuhan energi itu dipenuhi dengan glikolisis anaerobik glikogen. Asam piruvat yang dihasilkan oleh proses ini tidak dapat masuk ke dalam daur asam sitrat tanpa oksigen, sehingga asam piruvat diubah menjadi asam laktat yang kemudian berdifusi keluar sel. Jika oksigen tersedia lagi, sebagian besar asam laktat akan diubah menjadi glukosa (terutama dalam hati) yang akan dikembalikan pada serabut-serabut otot dan menjadi glikogen otot. Jumlah oksigen yang diperlukan untuk memindahkan asam laktat yang tertimbun merupakan hutang oksigen. Setelah bekerja berat, seekor hewan akan bernapas dalam sampai hutang ini terbayar. Mekanisme ini sangat penting bagi hewan karena hal ini memungkinkan hewan untuk melakukan kontraksi otot secara kuat dan berulang-ulang dalam keadaan darurat tanpa dibatasi oleh laju penyaluran oksigen dalam ruangan.



Gambar 10.9 Diagram yang memperlihatkan reaksi biokimia yang terlibat dalam proses metabolisme reaksi otot

## RINGKASAN

1. Sel-sel otot yang memanjang biasanya terikat menjadi satu oleh jaringan ikat dan disusun dalam serabut otot. Otot melakukan kerja hanya dengan kontraksi dan harus melawan daya antagonis.
2. Terdapat 3 jenis otot pada hewan vertebrate, yaitu otot kerangka, otot licin, dan otot jantung. Karakteristik ketiga jenis otot dibedakan berdasarkan struktur molekulnya, sifat dari kontraksi, dan tempat adanya.

3. Otot kerangka terbentuk dari kumpulan-kumpulan serabut otot yang masing-masing mengandung serabut kontraktile mikroskopik yang panjang disebut miofibril yang terdiri atas protein miosin dan aktin.
4. Fibril-fibril otot dilengkapi dengan sistem sarkotubulus yang terdiri dari sistem T dan retikulum sarkoplasma yang berfungsi dalam penyebaran potensial aksi yang cepat ke seluruh fibril otot dan berperan dalam metabolisme otot.
5. Jika otot kerangka dirangsang, ion kalsium dilepaskan dan kepala-kepala pada filamen miosin mengikat diri pada tempat-tempat aktif pada aktin miofilamen yang sekarang bebas. Kepala-kepala itu membengkok sedikit, melepaskan diri, dan mengikat diri lagi pada tempat aktif di dekatnya. Satu molekul ATP digunakan dalam satu daur pertautan, pembengkokkan, dan pelepasan kepala miosin. Pengeluaran kalsium menyebabkan pemblokiran tempat aktif dan mencegah kontraksi lebih lanjut.
6. Otot licin tidak mempunyai garis-garis melintang, mempunyai ujung lancip, letak nukleus di sentral, dan kontraksi tidak terkontrol. Otot licin berkontraksi sangat lambat, tetapi dapat ada dalam keadaan kontraksi yang cukup lama. Terdapat dalam dinding saluran pencernaan, saluran air kencing, dinding arteri, dan vena.
7. Otot jantung hanya terdapat pada dinding jantung. Otot jantung mempunyai garis-garis melintang, tetapi letak nukleus di pusat. Serabut otot jantung bercabang-cabang dan beranastomosis secara erat. Kontraksi otot jantung tidak terkontrol. Otot jantung mempunyai jaringan pemacu khusus yang mendukung kontraksi jantung tampak melibatkan sistem saraf.
8. Tahapan kontraksi otot meliputi periode laten, yakni periode mengawali respons kerutan, periode kontraksi yaitu periode timbulnya tegangan, dan periode relaksasi yaitu periode berkurangnya tegangan.

9. Respons kontraktile otot sangat dipengaruhi oleh besarnya rangsangan, frekuensi rangsangan, dan jumlah motor unit. Rangsangan yang berulang sebelum relaksasi menyebabkan aktivasi tambahan dari unsur-unsur kontraktile dan respons akan ditambahkan pada kontraksi yang sudah ada. Semua ini akan menimbulkan fenomena sumasi temporal, tetanus, dan sumasi spesial.
10. Kebanyakan otot vertebrata tingkat tinggi adalah otot getar atau otot fasik yang unit motornya bekerja secara semua atau tidak sama sekali. Peningkatan tegangan datang baik dari sumasi temporal maupun sumasi spesial. Banyak otot mengandung baik serabut fasik lambat yang mendapat energi dari fosforisasi oksidatif maupun serabut fasik cepat yang mendapat energi dari glikolisis anaerobik. Serabut-serabut otot tonik tidak bekerja secara semua atau tidak sama sekali. Peningkatan daya datang dari laju rangsangan dan jarak penyebaran aksi potensial melalui serabut.
11. Energi untuk resistensi ATP pertama berasal dari pemindahan gugus fosfat ke ADP dari fosfat kreatin atau fosfat arginin, dan dari metabolisme makanan.
12. Otot-otot yang berkontraksi lebih cepat daripada penyaluran oksigen yang diperlukan, menimbun glikogen secara anaerobik menjadi asam laktat.

Latihan berikut ini disengaja disusun untuk memantapkan Anda terhadap materi yang baru dibicarakan. Kerjakan latihan berikut dengan sungguh-sungguh!

1. Apa yang dimaksud dengan otot?
2. Apa perbedaan otot yang dimiliki oleh hewan vertebrata dan invertebrata?
3. Ada berapa jenis otot dan sebutkan terdapat pada organ apa! Apa perbedaan antara jenis otot tersebut?

4. Apa perbedaan otot aduktor dan ektensor?
5. Jelaskan karakteristik dari otot kerangka!
6. Jelaskan teori pergeseran filamen dari kontraksi otot!
7. Jelaskan hubungan kontraksi otot kerangka dengan pemakaian energi!
8. Apa perbedaan sifat hantaran listrik pada sistem dan sistem kontraksi otot?
9. Jelaskan perbedaan struktur otot licin dan otot jantung!
10. Jelaskan perbedaan otot licin multiunit dan otot licin visceral!
11. Terangkan proses rangkaian eksitasi-kontraksi pada otot jantung!
12. Mengapa jantung yang telah diisolasi masih bisa berdenyut?
13. Jelaskan apa yang dimaksud dengan unit motor?
14. Jelaskan perbedaan kontraksi isotonik dengan kontraksi isometrik!
15. Terangkan apa yang dimaksud dengan sumasi temporal, tetanus, sumasi spesial, tonus, dan tetanus tidak sempurna!
16. Jelaskan perbedaan kontraksi antara serabut fasik lambat dan serabut fasik cepat!
17. Jelaskan proses penggunaan energi untuk kontraksi otot!
18. Jelaskan perbedaan fosforisasi oksidatif dan glikolisis anaerobik!

# BAB XI

## FISIOLOGI REPRODUKSI

Reproduksi adalah pembentukan individu baru dari individu yang telah ada dan merupakan ciri khas dari semua organisme hidup. Proses reproduksi tidak diperlukan untuk kelangsungan hidup tiap organisme, tetapi tanpa reproduksi spesies akan punah. Pada reproduksi aseksual suatu induk tunggal membagi diri, bertunas, atau memecah diri untuk menghasilkan dua keturunan atau lebih yang mempunyai sifat menurun identik dengan induknya, misalnya dengan pembelahan biner terjadi pada hewan bersel satu (protozoa) dan dengan pertunasan terjadi pada hidra dan planaria. Reproduksi seksual melibatkan dua induk yang masing-masing menyumbangkan satu sel reproduktif khusus, suatu gamet yang kemudian bergabung untuk membentuk suatu individu baru, sebagai contoh pada hewan tingkat tinggi (vertebrata, mamalia). Secara biologis reproduksi seksual menguntungkan karena adanya percampuran genom yang menghasilkan rekombinasi baru pada turunannya dan memberi kemungkinan mendapatkan keturunan yang lebih baik dari kedua orang tuanya.

Kelangsungan individu sebagian ditujukan untuk memenuhi kemampuan reproduksi yang mutlak bagi kelestarian spesies. Untuk terjadinya proses reproduksi seksual, hewan perlu mempunyai organ reproduksi yang mampu menghasilkan gamet harus melalui proses perkawinan (khususnya bagi hewan bereproduksi seksual) dan adanya kemampuan induk betina untuk membesarkannya dalam kandungan sampai melahirkan.

Organ reproduksi primair adalah testis pada jantan dan ovarium pada betina. Testis menghasilkan gamet jantan atau spermatozoa dan

ovarium menghasilkan gamet betina atau ovum. Pada mamalia betina fungsi ovarium adalah siklus di alam dan berkaitan dengan perubahan siklus dalam organ kelamin lain. Perubahan uterus melibatkan persiapan endometrium untuk penerimaan ovum yang berhasil dibuahi. Jika fertilisasi tidak terjadi, lapisan permukaan uterus menjadi atropi pada nonprimata dan dirusak oleh pendarahan (mentruasi) pada primata. Perubahan siklus dalam fungsi ovarium juga dicerminkan dalam tingkah laku kelamin. Pada nonprimata betina siklus dikenal sebagai siklus estrus, sedangkan pada primata diketahui sebagai siklus menstruasi.

Bab ini akan menguraikan peranan hormonal dalam proses reproduksi, proses pembentukan gamet jantan dan betina sampai dengan fertilisasi dan dilanjutkan sampai melahirkan, siklus reproduksi dan kontrol siklus reproduksi.

Diharapkan setelah mengikuti kuliah sistem reproduksi, Anda akan mampu:

- menjelaskan peranan hormon dalam proses reproduksi;
- menjelaskan perbedaan dan persamaan antara proses spermatogenesis dan oogenesis;
- menjelaskan perubahan fisiologis (hormonal dan aktivitas ovarium) yang terjadi selama satu siklus berahi dan menjelang berahi dan terjadinya ovulasi;
- menjelaskan terjadinya proses pembuahan dan pengaturan hormonal dalam proses kebuntingan; dan
- menjelaskan mekanisme terjadinya kelahiran.

## **A. Peranan Hormon dalam Proses-proses Reproduksi**

Fungsi ovarium dan testis dikontrol oleh hormon-hormon yang disekresikan oleh kelenjar pituitari anterior. Sistem saraf pusat mengatur

fungsi pituitari melalui hormon pelepas (*Gonad-trophin Releasing Hormone*).

Gonad itu sendiri adalah kelenjar endokrin yang menghasilkan dan mensekresikan steroid yang mengatur fungsi reproduksi. Hormon yang disekresikan gonad juga mengatur perkembangan tubuh ternak dan karakter kelamin sekunder. Pada ternak muda prepubertas gonad mensekresikan sejumlah kecil hormon. Pada pubertas gonad matang dan mulai berfungsi. Umur pada saat mulainya gonad berfungsi terjadi bervariasi. Pada ternak, pubertas terjadi sebagai berikut: kuda 15–18 bulan, sapi 12–15 bulan, kambing dan domba 8–12 bulan, dan babi 6–8 bulan.

### **1. Gonadotropin Hipofisa**

Kelenjar hipofisa anterior mensekresikan tiga hormon yang penting untuk reproduksi. *Follicle stimulating hormone* (FSH) merangsang pertumbuhan folikel-folikel ovarium, tetapi pematangan akhir folikel membutuhkan adanya kedua, yaitu *luteinizing hormone* (LH). Kedua hormon ini (FSH dan LH) menyebabkan ovulasi dan pembentukan korpus luteum. Hormon ketiga adalah prolaktin yang membantu memelihara korpus luteum pada hewan mengerat. Pada sebagian besar ternak, fungsi utamanya adalah untuk menjamin perkembangan kelenjar mammae dan memulai sekresi susu. Pada jantan FSH membantu memelihara proses spermatogenesis, sedangkan LH merangsang sel-sel interstisial menghasilkan testosteron.

### **2. Hormon Testis**

Hormon kelamin jantan dihasilkan pada sel-sel interstisial testis. Beberapa androgen dihasilkan, tetapi yang penting adalah testosteron. Hormon ini bertanggung jawab untuk perkembangan karakter kelamin sekunder. Kastrasi ternak prepubertas memberikan gambaran jelas tentang pentingnya androgen, pada ternak yang dikastrasi: penis,

skrotum, dan karakter kelamin sekunder gagal untuk berkembang. Pada sapi Bali, kastrasi yang dilakukan pada jantan muda akan menyebabkan jantan muda tidak berubah warna bulunya menjadi hitam, tetapi tetap warna merah bata. Hormon androgen juga mengatur aktivitas sekresi dari kelenjar prostat dan vesikel seminalis.

Fungsi endokrin testis diatur oleh mekanisme umpan balik negatif. Penyuntikan androgen menghambat pelepasan LH dari hipofisa anterior dan menyebabkan testis atropi. Sebaliknya, konsentrasi rendah androgen dalam darah merangsang produksi LH yang menstimulasi produksi androgen.

Suatu rangkaian tipik dari perubahan organ reproduksi mengikuti hipofisektomi (pengeluaran hipofisa). Testis atropi dengan cepat dan spermatozoa berhenti dibagikan ke epididimis. Sel-sel interstisial antara tubulus mengalami perubahan menurun dan berhenti mensekresikan progesteron. Organ-organ pembantu (prostat, vesikel seminalis, dan saluran tubulus) dihambat pertumbuhannya oleh testosteron, atropi dan tidak berfungsi. Atropi sel-sel interstisial disebabkan oleh kekurangan LH, sedangkan atropi jaringan spermatogenetik disebabkan oleh kekurangan produksi androgen oleh sel-sel interstisial. Jika hipofisektomi dilakukan sebelum dewasa, testis dan organ reproduksi sekunder gagal untuk membesar dan berdiferensiasi sehingga tidak akan normal kembali.

### **3. Hormon-hormon Ovarium**

Hormon-hormon kelamin betina diproduksi di ovarium adalah estrogen dan progesteron. Sebelum awal pubertas produksi hormon ini adalah rendah. Bila sekresi hormon di ovarium nyata, ternak akan memulai siklus reproduksi secara terus-menerus sampai terjadi perkawinan.

Terdapat peningkatan drastis dalam ukuran ovarium pada saat pubertas, tetapi perkembangan sempurna dari siklus estrus adalah fenomena bertahap didahului oleh siklus tidak sempurna. Ini merupakan periode steril ternak dewasa, selama periode ini aktivitas siklus hanya disertai oleh beberapa betina subur. Setelah periode tersebut, dewasa kawin dengan kelamin penuh dapat dicapai secara bertahap, meskipun pada suatu kelompok betina muda siap masih banyak yang kurang yang subur pada perkawinan pertama.

Pada beberapa jenis ternak yang hidup di daerah beriklim subtropis, siklus berahi (estrus) hanya terjadi selama musim kawin dan pada periode bukan musim kawin ternak betina dalam keadaan anestrus (tidak berahi). Sebagai contoh, kuda timbul berahi pada musim semi dan panas, sedangkan domba dan kambing liar berahinya muncul pada musim gugur. Siklus berahi pada sapi dan babi berlangsung sepanjang tahun. Pada semua ternak siklus berahi diinterupsi selama periode kebuntingan.

Estrogen dihasilkan dalam sel-sel granulosa pada folikel yang sedang tumbuh dan matang pada ovarium. Pengaruh estrogen dapat didemonstrasikan dengan ovariektomi (dikeluarkan ovariumnya dari tubuh ternak). Ovariektomi pada ternak muda menghasilkan kegagalan perkembangan dari tuba falopii, uterus, vagina dan kelenjar mammae.

Pada ternak dewasa estrogen menyebabkan sel-sel dalam vagina berkembang dan serviks membuka. Kondisi uterus bervariasi sesuai dengan fungsi ovarium. Pada ternak masih muda, organ uterus kecil, kelenjar endometrium tidak berkembang baik dan miometrium tipis dan tidak memperlihatkan motilitas. Di bawah pengaruh estrogen, kelenjar endometrium meningkat dalam ukurannya dan jumlah sel-sel otot licin dalam miometrium meningkat serta ada motilitas uterus. Pada betina yang tidak bunting, progesteron dihasilkan dalam korpus luteum setelah

terjadinya ovulasi. Progesteron dilepaskan secara normal setelah periode rangsangan estrogen dan banyak pengaruh yang tidak diwujudkan bila ternak tidak mengalami perlakuan estrogen. Telah banyak laporkan pengaruh progesteron dilihat pada uterus. Setelah estrogen menyebabkan endometrium berproliferasi, selanjutnya progesteron memperbesar kelenjar endometrium dan menyebabkan endometrium mensekresikan. Motilitas uterus menurun dan respons uterus terhadap estrogen dan oksitosin dihilangkan.

Selama periode kebuntingan terdapat kesinambungan fase luteal dari siklus estrus. Progesteron adalah penting untuk menjaga kebuntingan pada semua tahap dan penurunan kadar progesteron akan diikuti oleh keguguran atau kelahiran prematur. Sumber progesteron selama kebuntingan bervariasi sesuai dengan spesies. Pada ternak, sumber progesteron adalah ovarium pada awal kebuntingan dan plasenta setelah sepertiga umur kebuntingan.

Sekresi hormon di ovarium diatur oleh FSH dan LH dari lobus anterior kelenjar hipofisa. Setelah hifopisektomi pada betina, ovulasi berhenti, korpus luteum tidak lama hidupnya, folikel-folikel tidak matang, dan ukuran ovarium menurun. Sel-sel interstitial mengalami degenerasi, nukleusnya mengerut dan sitoplasma menurun. Produksi estrogen dan progesteron turun drastis. Karena adanya kekurangan hormon ovarium, organ-organ reproduksi sekunder ikut berhenti pertumbuhannya, dan kembali ke struktur yang menyerupai keadaan infantil (anak-anak).

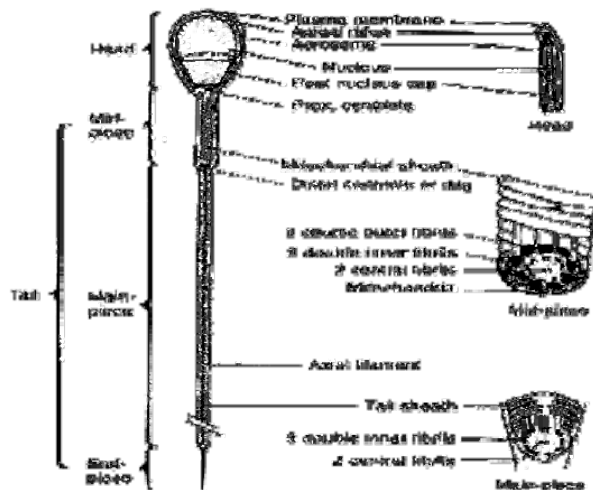
Jika FSH disuntikkan kedalam betina yang sangat muda, ovarium akan membesar dan folikel-folikel kecil akan berkembang. Meskipun demikian folikel tidak menghasilkan estrogen secara sempurna bila LH tidak diberikan.

## B. Spermatogenesis

Spermatozoa merupakan sel-sel sangat kecil dibandingkan dengan ovosit. Sel-sel ini mempunyai dua fungsi utama, yaitu:

- membawa cadangan haploid dari gene-gene spermatozoa ke ovosit; dan
- mengaktifkan program perkembangan sel telur yang telah dibuahi.

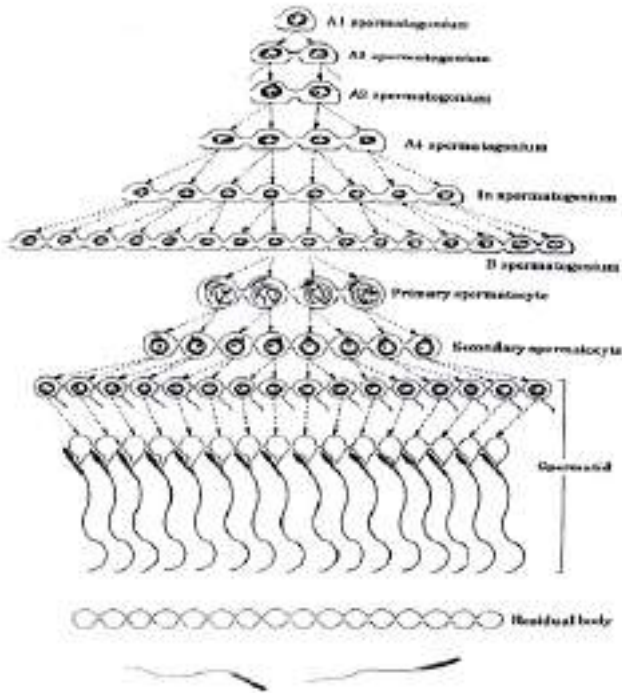
Sebagian besar spermatozoa tanpa organel sel seperti ribosom, retikulum endoplasma, badan golgi, tetapi mengandung sejumlah mitokondria (Gambar 11.1). ADN terkandung dalam inti spermatozoa membentuk suatu massa sangat kompak dan sama sekali tidak ada aktivitas sebelum terjadi pembuahan. Vesikula akrosomial mengandung enzim-enzim hidrolitik (pada invertebrata tertentu, spermatozoa mengandung juga protein spesifik yang dapat melekatkan spermatozoa ke membran ovum) yang mudah dilepaskan oleh eksositos. Gerakan flagela bergantung pada produksi ATP oleh mitokondria pada bagian intermedia. Pada mamalia sumber utama energi metabolisme adalah fruktosa yang dihasilkan oleh vesikula seminalis.



Gambar 11.1 Struktur dan morfologi sperma

### 1. Terjadinya dan Kontrol Spermatogenesis pada Mamalia

Produksi spermatozoa hanya dimulai pada waktu puber, tetapi prosesnya berjalan secara kontinu di dalam tubuli seminiferi (Gambar 11.2). Produksi sel spermatozoa bergantung pada sekresi yang cukup dari hormon gonadotropin hipofisa (LH dan FSH). Sel-sel benih primordial (spermatogonium, diploid) terletak pada daerah pinggiran tubuli dan berlipat ganda melalui pembelahan sel mitosis. Sebagian sel-sel berhenti membelah dan berdiferensiasi menjadi spermatosit primer kemudian mengalami proses meiosis. Meiosis primer ini menghasilkan dua spermatosit sekunder (haploid), kemudian mengalami pembelahan meiosis sekunder menjadi empat spermatid yang berdiferensiasi menjadi spermatozoa. Fase terakhir ini disebut spermiogenesis (Gambar 11.2).



Gambar 11.2. Tahapan proses pembentukan sperma (spermatogenesis)

Satu keutamaan dari fisiologis sel-sel benih jantan adalah bahwa dia tidak berhenti secara total pembelahan sitoplasmanya, baik ketika mitosis maupun pada waktu meiosis. Spermatozoa tinggal bergabung dalam satu tempat *syncytium* sampai stade terakhir spermiogenesis. Keadaan ini menyebabkan satu sinkronisasi pembelahan sel-sel berasal dari spermatogoni sendiri dan gelombang pelepasan spermatozoa sepanjang tubuli seminiferi.

Selama berbagai fase pematangan spermatozoa yang lamanya beberapa minggu pada sebagian besar mamalia (pada manusia memerlukan waktu 6 minggu untuk proses transformasi spermatogonium menjadi spermatozoa), berbagai tipe sel derivat dari spermatosit primer tinggal melekat dalam bagian dalam sel-sel sertoli (sel-sel besar yang berhubungan dengan membran basal tubuli seminiferi).

Sel-sel sertoli mempunyai fungsi endokrin, yaitu mensekresikan suatu hormon dikenal sebagai inhibin dan kadar inhibin ini meningkat sejalan dengan aktivitas spermatogenesis inhibin mengatur sekresi FSH oleh hipofisa. Di bawah kerja FSH atau/dan testosteron, sel-sel sertoli menyekresikan satu protein berikatan dengan steroid androgen (Androgen binding protein: ABP) yang menjamin konsentrasi androgen yang tinggi dalam tubuli seminiferi karena ABP mempunyai afinitas tinggi untuk androgen.

Sel-sel spermatozoa yang dilepas dalam saluran tubuli seminiferi masih belum matang dan tidak bergerak. Pematangannya berlangsung selama transit pada berbagai saluran reproduksi jantan: rete testis, epididimis, saluran *vas deferent*, dan saluran ejakulator. Pada waktu di epididimis, spermatozoa menerima kemampuan motilitas, gerakan secara linier, di mana sebelumnya gerakan spermatozoa sirkulair tanpa arah.

Pada beberapa spesies, spermatozoa harus menerima lagi suatu kapasitas, diterima pada waktu tinggal di saluran reproduksi betina pada fase folikular. Berbagai mekanisme pengaturan gametogenesis pada jantan oleh hormon. Gametogenesis jantan sangat peka terhadap temperatur intratestis pada hampir semua mamalia. Posisi testis dalam skrotum menjamin temperatur beberapa derajat lebih rendah dari pada abdomen yang merupakan kondisi cocok untuk spermatogenesis. Kriptochid merupakan penyimpangan migrasi testis dalam skrotum, yaitu penyebab suatu involusi semua sel-sel benih, sebaliknya sel-sel sertoli dan sel-sel interstisial tidak dipengaruhi. Pengaruh temperatur ini terlihat berkaitan dengan tingginya kepekaan panas dari lisosom spermatosit dan spermatozoa yang melepaskan enzim-enzimnya dan menyebabkan penurunan sel-sel benih.

## 2. Semen

Semen terdiri atas sel spermatozoa dan cairan seminal. Spermatozoa dibentuk dalam testis dan disimpan dalam epididimis, sedangkan cairan seminal dikontribusikan oleh organ kelamin tambahan. Konsentrasi spermatozoa bervariasi menurut spesies (Tabel 11.1).

Tabel 11.1 Volume, konsentrasi spermatozoa, dan pH ejakulasi berbagai jenis ternak

Ternak	Volume (ml)	Jumlah Spermatozoa mm <sup>3</sup>	pH
Sapi	4–8	1.000.000	6,4–7,8
Domba	0,5–2	3.000.000	5,9–7,3
Kuda	30–200	100.000	6,2–7,8
Babi	150–400	100.000	7,3–7,9

Cairan seminal dibedakan oleh kandungan prostaglandin, cholin, asam sitrat, fruktosa, dan substansi lainnya yang tidak diketemukan dalam kuantitas besar dalam tubuh ternak. Cairan seminal berperan

sebagai penyangga (*buffer*) yang mempunyai ion bikarbonat, sitrat dan protein. Ini sangat penting untuk perlindungan spermatozoa dalam saluran reproduksi betina, di mana pH menjadi rendah disebabkan oleh tingginya konsentrasi ion hidrogen dari sekresi vagina.

### 3. Ejakulasi

Ereksi penis terjadi karena disebabkan peningkatan kekejangan organ penis. Baik dilatasi arteri maupun penurunan dalam aliran vena dari penis terlibat dalam proses ereksi. Aliran masuk dari darah melebihi aliran keluar sehingga menghasilkan peningkatan tekanan dalam jaringan erektil pada penis. Bila penis kuda berereksi, peningkatan yang nyata dalam diameter sama halnya dengan panjang karena secara komparatif jumlah jaringan erektil sama banyaknya dengan jumlah jaringan ikatnya. Pada ruminansia dan babi, penis berereksi memanjang lurus mulai dari fleksur sigmoid. Meskipun kekejangan meningkat, panjang dan diameter penis yang berereksi sama dengan pada waktu penis berelaksasi

Ejakulasi merupakan sebuah refleks yang melibatkan pengosongan epididimis, uretra, dan kelenjar kelamin tambahan. Hal ini disebabkan adanya rangsangan dari kelenjar penis, baik selama perkawinan alamiah maupun inseminasi buatan. Ejakulasi dapat juga dihasilkan oleh memijat secara manual kelenjar kelamin tambahan sepanjang rektum atau dengan menggunakan ejakulator elektrik.

## C. Oogenesis dan Folikulogenesis

### 1. Oogenesis

Terdapat keragaman proses oogenesis pada berbagai spesies, tetapi pada prinsipnya mengikuti tahap-tahapan berikut.

- Kolonisasi calon gonad oleh sel-sel benih primordial yang berasal dari ekstra gonad pada mamalia.

- Pembelahan secara mitosis dari oogonium yang menghasilkan populasi oogonium dalam jumlah besar dan sebagian mengalami peningkatan ukuran berkembang menjadi oosit primer (selnya diploid) dan memulai pembelahan meiosis pertama.
- Pembelahan meiosis pertama berhenti pada saat oosit pada stadi prophase meiotik selama beberapa minggu sampai beberapa tahun bervariasi menurut spesies. Pada proses pembelahan meiosis pertama ini, pembagian sitoplasmanya tidak sama, sehingga menghasilkan satu sel besar yaitu oosit sekunder yang mengandung kuning telur dan hampir semua sitoplasma, serta satu sel yang kecil yaitu badan kutub pertama yang hanya terdiri atas satu nukleus.
- Pembelahan meiosis kedua, oosit sekunder membelah secara tidak sama untuk menghasilkan sebuah oosit yang besar yang pada hakikatnya mengandung semua kuning telur dan sitoplasma, serta sebuah badan kutub kedua, kedua sel ini mempunyai jumlah kromosom haploid. Pada waktu bersamaan badan kutub pertama dapat membelah diri menjadi dua badan kutub. Oosit mengalami perubahan lebih lanjut sehingga menjadi ovum yang masak tetapi tidak mengalami pembelahan sel.

Pada mamalia, oosit terbentuk lebih awal pada masa periode perkembangan fetus. Setiap oosit dikelilingi oleh beberapa sel, semuanya membentuk satu folikel primordial. Folikel-folikel primordial ini terletak dalam korteks ovarium dan bergerak ke daerah pinggir ovarium selama masa pertumbuhannya. Pertumbuhan folikel umumnya hanya terjadi pada betina yang sudah dewasa kelamin. Pada beberapa folikel terjadi penggandaan sel-sel folikel yang akan membentuk granulosa. Sel-sel folikel lainnya yaitu sel teka internal dan eksternal yang dipisahkan dari sel granulosa oleh membran basal. Suatu rongga, antrum, terbentuk ketika sel-sel granulosa mulai mensekresikan cairan folikel ke tengah-tengah folikel. Ketika folikel bertumbuh, akan menuju

ke daerah permukaan ovarium bila sudah mencapai stade folikel de Graaf folikel (preovulasi) yang siap berovulasi.

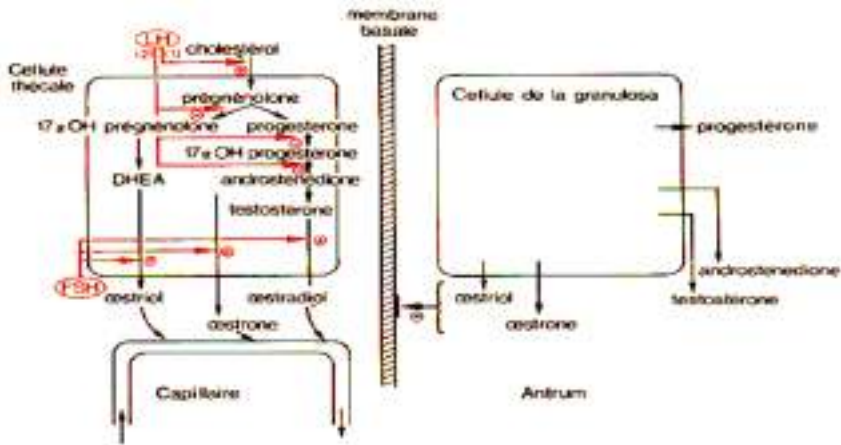
## **2. Pertumbuhan Folikel dan Sintesis Steroid Ovarium**

Kecepatan pertumbuhan folikel tidak konstan, sebagai contoh suatu folikel primordial berkembang menjadi folikel dalam waktu 14 hari pada wanita. Pertumbuhan folikel pada kenyataannya memerlukan waktu beberapa siklus untuk menjadi sempurna dan folikel yang meninggalkan cadangan folikel primordial timbul sampai dia ovulasi atau berdegenerasi yang disebut folikel atresi.

Masuknya beberapa folikel kedalam masa pertumbuhan, secara periodik, kelihatanya suatu fenomena yang diatur secara lokal pada tingkat ovarium (karena hipofisektomi tidak menghambat fenomena tersebut). Sebaliknya setelah pembentukan antrum, pertumbuhan folikel sangat bergantung pada pengaruh hormon gonadotropin, yaitu FSH dan LH. FSH merangsang proliferasi sel-sel granulosa dan pembentukan antrum, peranan FSH akan lebih besar bila sebelumnya folikel mendapat perlakuan estradiol. LH tidak merangsang proliferasi atau pertumbuhan folikel, tetapi berpengaruh terhadap diferensiasi sel-sel teka internal yang mempunyai kemampuan untuk steroidogenesis.

Sintesis steroid oleh sel-sel folikel dimulai ketika antrum terbentuk, konsentrasi steroid adalah 100–1000 kali lebih tinggi pada antrum dibanding dalam darah vena ovarium untuk kasus hormon estrogen ( $17\beta$  estradiol dan estron pada betina) dibandingkan dengan androgen (testosteron dan androstenedion pada betina) atau progesteron. Keadaan ini disebabkan oleh kuatnya polaritas fungsional sel-sel folikel yang mensekresikan ke antrum. Tidak adanya aliran darah pada bagian antrum tersebut membuat tingginya retensi progesteron yang tidak terdapat dalam plasma, sebaliknya disintesis dalam jumlah cukup banyak seperti estradiol pada awal pertumbuhan folikel. Hormon steroid

dihasilkan oleh sel-sel teka internal (estrogen dan androgen), di mana dapat dialiri oleh kapiler-kapiler dan terdapat dalam sirkulasi umum. Gambar 11.3 merupakan intisari kapasitas steroidogenesis folikel sedang tumbuh.



Gambar 11.3 Produksi steroid oleh sel-sel teka internal dan sel-sel granulosa satu folikel sedang tumbuh ; Sumber: Rieutort M (1986)

### 3. Terjadinya Kembali Meiosis

Meiosis aktif kembali segera setelah oosit terpisah dari sel-sel granulosa. Istirahat oosit ini disebabkan oleh adanya faktor penghambat pematangan oosit (*oocyte maturation inhibitor*) yang transit oleh sel-sel kumulus oophorus sebelum mencapai gamet, melalui sitoplasma masuk ke berbagai sel. Tingginya konsentrasi gondotropin menjelang ovulasi (terutama LH) melepaskan oosit dari pengaruh inhibitor tersebut, melalui mekanisme yang belum jelas.

### 4. Ovulasi

Peningkatan yang cepat dari level gonadotropin dalam darah, pada akhir fase folikel menimbulkan hal berikut.

- ▷ Kekakuan membran folikel (hasil kerja hormon terutama FSH).
- ▷ Pemisahan sel-sel kumulus oophorus yang berhubungan dengan oosit di sel granulosa (pengaruh langsung dari tingginya FSH dan LH).
- ▷ Akhir dari pematangan oosit (dikeluarkannya badan kutub kedua).
- ▷ Pecahnya dinding folikel (kontraksi ovarium).

Berbagai kejadian terjadi dalam belasan jam setelah awal peningkatan gonadotropin pada kelinci, sedangkan pada sapi ovulasi terjadi setelah 30 jam dari awal estrus. Pengeluaran final isi dari folikel, di mana pembungkusnya yang mengarah ke eksterior ovarium mengalami peregangan, terjadi setelah kontraksi otot ovarium. Ovum dibebaskan yang menyebabkan *corona radiata* bersama sel-sel granulosa tetap mengelilingi membran pelusida.

### **5. Korpus Luteum**

Setelah ovulasi, sel-sel granulosa dan teka internal folikel yang pecah membentuk kelenjar endokrin sementara yang disebut korpus luteum. Vaskularisasi darah dan limfatik calon korpus luteum terjadi sesaat sebelum ovulasi, ketika lapisan yang mengelilingi sel-sel granulosa menghilang. Setelah ovulasi, sel-sel granulosa berubah menjadi sel-sel luteal (penggandaan seluler, hipertropi, dan poliploidi) menyekresikan progesteron dan bersamaan dengan ini sel-sel teka internal berproliferasi dan mendominasi tempat yang ditinggalkan oleh folikel yang pecah.

Transformasi sel-sel granulosa menjadi sel-sel luteal sangat bergantung pada tingginya kadar LH yang ada ketika terjadi ovulasi. Kejadian ini hanya mungkin bila level FSH yang cukup dapat mencapai sel-sel granulosa selama fase folikuler. Sekresi progesteron, khususnya oleh korpus luteum, memerlukan rangsangan pada sel-sel luteal oleh LH dan prolaktin. Salah satu dari kedua hormon hipofisa ini dapat memenuhi untuk memelihara sekresi progesteron. Estradiol 17  $\beta$  dan

prostaglandin (PG) E1 dan E2 dapat berpartisipasi pada berbagai tingkatan, menjaga sekresi progesteron.

Pemecahan korpus luteum (luteolisis) bila tidak ada fertilisasi, bergantung pada berbagai faktor yang melibatkan uterus, peranan luteolitik dari PG F2 $\hat{A}$  disekresikan oleh endometrium, dan ovarium itu sendiri (sintesis estrogen dan PG F2 $\hat{A}$  pada spesies tertentu).

## **D. Siklus Reproduksi Ternak Betina pada Mamalia**

Pada sejumlah mamalia, proses reproduksi terjadi selama satu periode terbatas dalam setahun, seperti pada sebagian besar kelompok hewan menyusui. Pada primata dan mamalia tertentu yang didomestikasi, proses reproduksi tidak mengikuti atau sedikit ritme musiman. Estrus adalah keadaan fisiologis hewan betina yang siap menerima perkawinan dengan jantan. Siklus estrus (berahi) terbagi menjadi dua fase, yaitu fase luteal dan fase folikel. Fase luteal dicirikan oleh aktifnya korpus luteum mensekresikan progesteron, level progesteron tinggi, sedangkan LH dan FSH rendah.

Fase folikel diawali pada saat korpus luteum lisis, kadar progesteron menurun, pertumbuhan folikel mulai aktif, dan menyekresikan secara bertahap estrogen sesuai dengan perkembangan populasi folikel, peningkatan estrogen akan menimbulkan terjadinya tingkah laku berahi dan meningkatkan pulsiliti LH dan kadar FSH sampai terjadi ovulasi.

Secara klasik, periode estrus dibagi menjadi empat fase: estrus, metestrus, diestrus, dan proestrus. Selama fase-fase tersebut, terdapat perbedaan morfofungsional pada tingkat organ reproduksi betina. Berdasarkan spesies, hewan betina dapat memperlihatkan satu kali atau beberapa kali estrus per tahun selama dewasa kelamin. Pada kelinci dan beberapa mamalia lainnya (kucing, chameau) memperlihatkan kondisi

yang khusus dengan estrus permanen selama periode panjang. Pada kelinci betina dewasa, meskipun penerimaan seksual dapat berfluktuasi, ovarium secara permanen mengandung folikel yang matang dan ovulasi dilakukan melalui rangsangan mekanik vagina menyertai kopulasi (betina dengan ovulasi refleks).

Siklus menstruasi pada primata memerlukan pengaturan neurohormonal seperti mamalia lainnya, tetapi berbeda dengan siklus lain yaitu adanya menstruasi, regresi, dan nekrosa bagian permukaan atas endometrium uterus yang disertai dengan kehilangan darah banyak atau sedikit bergantung pada spesiesnya dan merupakan akhir dari siklus.

### **1. Kontrol Siklus Estrus**

Siklus estrus dikontrol sekaligus oleh sistem saraf pusat dan ovarium. Sistem saraf pusat merupakan sumber rikmik dari sekresi hipotalamus dan hipofisa tetapi ovarium berperan dalam kontrol balik terhadap berfungsinya hipofisa melalui hormon-hormon yang disekresikannya.

Hasil penelitian yang dilakukan pada hewan *Macacus rhesus* menunjukkan adanya kontrol siklus berahi melalui sistem poros (*axe*) hipotalamus-hipofisa dan ovarium. Sekresi basal hormon gonadotropin FSH dan LH adalah pulsatiliti, dengan level puncak (*pic*) dihasilkan setiap jam pada betina monyet rhesus. Ritme ini dinamakan *circhoral*. Sekresi FSH dan LH ini akan merangsang pertumbuhan dan pematangan folikel, di mana folikel diameter besar dengan antrum akan banyak mensekresikan estrogen.

Sekresi ritme dari gonadotropin bergantung pada hormon hipotalamus, FSH/LH-RH atau GnRH (Bab sistem endokrin) melalui sistem portal hipofisa. Neuron-neuron yang mengandung GnRH terletak

di daerah mediobasal hipotalamus. Hormon-hormon yang disekresikan oleh ovarium mempunyai kontrol umpan balik (*feed-back mechanism*) terhadap sekresi gonadotropin. Pada konsentrasi tertentu, estrogen dan progesteron mempunyai kontrol balik negatif (*negative feedback*) terhadap sekresi FSH dan LH. Progesteron sendiri tidak menghambat sekresi gonadotropin, tetapi memperkuat kerja estrogen.

Permulaan konsentrasi puncak dari gonadotropin untuk menimbulkan ovulasi (level tertinggi gonadotropin) disebabkan adanya kontrol balik positif dari estrogen. Hal ini terjadi bila konsentrasi estradiol dalam darah melewati 200 pg ml<sup>-1</sup> selama dua hari. Sejumlah kecil progesteron yang dibebaskan selama peningkatan konsentrasi gonadotropin yang memulai ovulasi diperlukan untuk timbulnya konsentrasi puncak untuk ovulasi yang sempurna pada wanita.

## **2. Proses Pembuahan dan Aspek Fisiologi Perkembangan Embrio** ***Pembuahan***

Proses pembuahan (fertilisasi) adalah bergabungnya sel gamet jantan dengan sel gamet betina. Pembuahan eksterna terjadi di luar tubuh hewan dan pembuahan internal terjadi di dalam tubuh hewan betina. Pada umumnya, bergabungnya sel spermatozoa dengan satu ovum dari spesies yang sama (bukan dari ovum hewan betina spesies lain) berdasarkan pada mekanisme pengenalan tingkat tinggi. Matriks ekstraselular yang mengelilingi ovum (zona pelusida) hanya dapat ditembus oleh spermatozoa dari spesies yang sama.

Pada waktu ovulasi, ovum dilepaskan dari permukaan ovarium, kemudian masuk ke infundibulum yaitu bagian akhir dari tuba falopi. Tempat fertilisasi adalah bagian pertemuan ampulla dan istmus (Ampulla-isthmus junction). Ovum masih dapat bertahan hidup selama 12–24 jam sesudah ovulasi. Spermatozoa masuk ke dalam saluran reproduksi betina pada waktu terjadi koitus (perkawinan). Selama dalam saluran

reproduksi betina, spermatozoa mengalami proses kapasitasasi (pematangan untuk kemampuan membuahi).

Pada mamalia, kapasitasasi spermatozoa berkaitan dengan sekresi saluran alat kelamin betina melalui perendaman estrogenik. Kapasitasasi memodifikasi komposisi lemak membran plasma spermatozoa, menghilangkan protein-protein yang diterima dari permukaan alat kelamin jantan dan membebaskan enzim-enzim yang disimpan dalam akrosom. Modifikasi ini penting dalam hubungannya dengan kepala spermatozoa, yaitu kandungan glikoprotein dalam zona pelusida, di mana reaksi akrosomik dapat melepaskan enzim hidrolase terkandung dalam akrosom. Enzim-enzim ini mencerna sebagian zona pellusida sehingga kepala spermatozoa dapat menembus zona tersebut dan berfusi dengan membran sel telur.

Setelah semen dideposisikan dalam vagina, enzim proteolitik mengubah lendir cairan plasma menjadi cairan yang lebih encer, agar spermatozoa menjadi sangat motil. Fruktosa merupakan sumber energi, zat basa mencegah matinya spermatozoa karena asam yang lazimnya terdapat dalam vagina dan asam lemak tertentu (prostaglandin) menyebabkan kontraksi otot polos dalam dinding uterus dan tuba falopi.

Spermatozoa bergerak sepanjang saluran reproduksi betina pada umumnya disebabkan kontraksi dinding uterus dan gerakan silia dari spermatozoa di dalam saluran tersebut. Transpor spermatozoa ke ampula (tuba falopi bagian atas) cepat sekali sekitar 15 menit pada sapi perah.

Setelah penggabungan spermatozoa dengan ovum, inti spermatozoa dengan cepat masuk ke dalam sitoplasma ovum dan menjadi pronukleus jantan yang bergerak menuju ke pronukelus betina. Kedua pronukelus tersebut bersatu untuk membentuk nukleus zigot atau masing-masing menyumbangkan kromosomnya menjadi

zigot diploid. Hanya satu spermatozoa yang membuahi satu ovum karena begitu kedua membran bersinggungan terjadi reaksi kortikal dari ovum. Reaksi ini merupakan reaksi kompleks yang melibatkan depolarisasi membran, gerakan-gerakan ion  $\text{Ca}^{2+}$  mengikuti satu eksositose besar-besaran granula-granula kortiko yang teletak tepat di bawah membran plasma gamet betina.

### **3. Pengaturan Hormonal terhadap Kebuntingan pada Mamalia**

Perubahan histologis dan fungsional yang memengaruhi uterus selama siklus kedua harus dianggap sebagai suatu persiapan peletakan telur dan konsekuensinya sekresi hormon yang membuat kondisi tersebut merupakan suatu bentuk kontrol kebuntingan. Pada spesies tertentu, korpus luteum dipelihara sepanjang periode kebuntingan dan merupakan sumber estrogen dan progesteron utama, sedangkan pada spesies lainnya peranan korpus leuteum diganti oleh plasenta. Pada awal kebuntingan, luteolisis korpus luteum tidak terjadi karena satu gonadotropin (CG: Chorionik Gonadotropin) dihasilkan pada awal perkembangan embrio. Hormon ini mempunyai aktivitas biologis seperti LH, diproduksi oleh sel-sel tropoblastik pada minggu pertama setelah implantasi blastosis. Pada wanita, hormon ini dinamakan hCG (*human Chorionic Gonadotropin*) yang dapat dipakai uji imunologis awal kebuntingan.

Selama pertumbuhan plasenta produksi hormon steroid meningkat, sebaliknya konsentrasi hCG menurun. Hormon steroid dibutuhkan untuk pertumbuhan uterus dan perkembangan kelenjar mammae. Estrogen merangsang pertumbuhan masa perototan uterus dan progesteron menghambat kontraksi serabut-serabut otot licin uterus yang hanya ada kontraksi cepat dan tak beraturan yang ringan selama kebuntingan. Estrogen dan progesteron merang-sang pembentukan unsur-unsur baru kelenjar dalam kelenjar mammae, tetapi menghambat kerja prolaktin terhadap produksi susu.

Peranan plasenta selain memberi makan embrio dan menghasilkan hormon estrogen dan progesteron, juga memproduksi beberapa molekul yang mempunyai aktivitas biologis sebanding dengan hormon hipofisa.

- Somatomammotropin chorionik mempunyai kerja *trophique* (sama dengan hormon somatotropin) dan laktogenik (seperti prolaktin). Hormon ini sangat banyak dalam darah induk, tetapi tidak mencapai fetus.
- Kortikotropin plasenta
- Hormon *thyreotrope*

Sintesis hormon steroid merupakan kerja sama antara plasenta dan fetus; kedua pabrik ini mempunyai enzim-enzim tambahan yang dapat mensintesis estriol dan produksi estrogen yang paling banyak selama kebuntingan.

#### **4. Kelahiran**

Faktor-faktor yang menyebabkan kelahiran belum jelas benar, tetapi hormon yang dihasilkan oleh ovarium dan kelenjar pituitari dan mungkin oleh kelenjar adrenal fetus memegang peranan. Hormon yang dihasilkan oleh pituitari, ovarium dan plasenta telah menyiapkan tubuh induk untuk kelahiran. Kelenjar mammae telah membesar dan siap menghasilkan susu, otot uterus telah bertambah, serta ligamen pelvis dan pubis telah meregang sehingga saluran pelvis dapat sedikit membesar.

Proses kelahiran dapat dibagi menjadi tiga tahap. Selama tahap pertama, kontraksi uterus secara bertahap menekan amnion dan kantung allantois beserta isinya menuju serviks yang menyebabkan dilatasi. Tahap ini berlangsung 2–12 jam pada sapi dan domba, 1–4 jam pada kuda dan 2–12 jam pada babi.

Tahap kedua adalah pengeluaran fetus. Lewatnya sebagian fetus melalui serviks ke dalam vagina dengan pecahnya amnion dan cairan amnion keluar, memulainya kontraksi otot-otot abdominal. Kelanjutan dari kontraksi uterus dan otot abdominal menekan fetus ke luar. Tahap ketiga dari kelahiran adalah pengeluaran plasenta, yang secara normal segera mengikuti fetus keluar.

Pada kelahiran ternak diawali dengan peningkatan drastis dalam sekresi kortisol dari korteks adrena fetus. Ini merupakan gambaran suatu peningkatan kepekaan sel-sel kortiko terhadap ACTH dari kelenjar hipofisa fetus. Cortisol fetus bekerja pada plasenta untuk meningkatkan konversi progesteron menjadi estrogen. Hal ini menghasilkan besarnya nisbah estrogen terhadap progesteron pada darah induk. Rangkaian kejadian endokrin ini merupakan langkah awal dimulainya kelahiran. Penurunan progesteron dan peningkatan dalam produksi estrogen meningkatkan kepekaan miometrium terhadap oksitosin dari kelenjar hipofisa posterior.

## **RINGKASAN**

1. Reproduksi adalah pembentukan individu baru dari individu yang telah ada dan merupakan ciri khas dari semua organisme hidup. Proses reproduksi melibatkan sistem endokrin dan sistem saraf untuk mengatur kerja hormon dalam produksi sel-sel benih jantan dan betina serta menciptakan kondisi fisiologis yang memenuhi kebutuhan proses reproduksi seperti perkawinan, kebuntingan, dan kelahiran.
2. Spermatogenesis adalah proses pembentukan sel spermatozoa dari sel benih jantan (spermatogonium). Pada proses ini, jumlah kromosom berkurang menjadi separuhnya dalam dua pembelahan meiosis. Pembelahan ini menghasilkan 4 spermatid dari satu spermatogonium dan tiap spermatid kemudian diubah menjadi spermatozoa.

3. Kontrol hormonal dalam spermatogenesis melibatkan dua hormon, yaitu FSH dan LH. FSH berfungsi untuk merangsang proses spermatogenesis pada tubuli seminiferi dan LH berperan dalam menstimulasi sel-sel Leydig memproduksi testosteron. Sel Sertoli menghasilkan inhibin yang berperan mengatur sekresi FSH oleh hipofisis. Sel-sel spermatozoa mengalami pematangan di epididimis dan mendapat kapabilitas pada waktu melewati saluran reproduksi betina.
4. Oogenesis merupakan proses pembentukan oosit dalam ovarium yang prinsipnya hampir sama dengan spermatogenesis. Pada oogenesis sitoplasma dibagi tidak sama antara kelompok sel anak, sehingga satu sel yaitu oosit mendapat semua kuning telur, sedangkan yang satunya tidak mendapat/sedikit sitoplasma dan menjadi badan kutub. Folikulogenesis adalah proses pertumbuhan folikel, mulai dari folikel primordial sampai dengan folikel de Graaf (Preovulasi).
5. FSH merangsang proliferasi sel-sel granulosa dan pembentukan antrum dan efeksin bersama estradiol. LH berpengaruh terhadap diferensiasi sel-sel teka internal yang mempunyai kemampuan untuk steroidogenesis. Ovulasi terjadi karena adanya peningkatan level FSH dan LH maksimum dalam darah, sehingga folikel preovulasi pecah dan ovum yang matang dikeluarkan dari ovarium. Setelah ovulasi, sel-sel granulosa dan teka internal yang pecah membentuk korpus luteum yang mensekresikan hormon progesteron.
6. Siklus berahi adalah interval berahi ke satu dengan berahi berikutnya, yang terdiri dari dua fase, yaitu fase luteal dan fase folikel. Siklus berahi merupakan hasil kerja poros hipotalamus-hipofisis-ovarium. Hormon hipotalamus memengaruhi sekresi hormon gonadotropin yang disekresikan oleh hipofisis. Hormon gonadotropin (FSH dan LH) merangsang pertumbuhan dan pematangan folikel, dimana folikel

yang tumbuh besar akan menghasilkan hormon steroid. Hormon steroid yang disekresikan ovarium mempunyai kontrol umpan balik terhadap hipotalamus dan hipofisa. Peningkatan estrogen menghasilkan pulsiliti LH dan terjadinya gejala berahi serta pada level estrogen maksimum terjadi kontrol umpan balik positif dan menyebabkan ovulasi.

7. Fertilisasi menyangkut semua kejadian dari penetrasi akrosom spermatozoa pada membran telur sampai ke penyatuan kromosom sperma dan telur di dalam satu nukleus sehingga kembali menjadi diploid.
8. Setelah terjadi implantasi embrio, pemeliharaan kebuntingan dijaga oleh adanya hormon progesteron dan chorionik gonadotropin) yang cukup pada awal kebuntingan. Pada akhir kebuntingan, hormon-hormon lain ikut membantu perkembangan fetus dan pembentukan kelenjar mammae.
9. Proses kelahiran merupakan proses yang kompleks yang melibatkan berbagai kelenjar (hipofisa, ovarium, dan afrenal) yang menyekresikan hormonnya untuk membantu mengeluarkan fetus.

Latihan berikut ini sengaja disusun untuk memantapkan Anda terhadap materi yang baru dibicarakan. Kerjakanlah latihan berikut dengan sungguh-sungguh!

1. Jelaskan perbedaan reproduksi seksual dan aseksual!
2. Jelaskan peranan hormon steroid dalam menunjang aktivitas reproduksi!
3. Jelaskan perbedaan dan persamaan antara proses spermatogenesis dan oogenesis!
4. Apa yang dimaksud dengan steroidogenesis? Jelaskan!
5. Jelaskan mekanisme terjadinya ovulasi!
6. Jelaskan kontrol hormonal dalam mengatur siklus reproduksi betina pada mamalia!

7. Mengapa ternak yang bunting tidak memperlihatkan gejala-gejala berahi?
8. Apa yang dimaksud dengan kontrol umpan balik negatif dan kontrol umpan balik positif dalam mengatur siklus reproduksi ternak?
9. Mengapa pada proses fertilisasi satu ovum hanya dibuahi oleh satu spermatozoa? Jelaskan!
10. Jelaskan proses terjadinya kelahiran pada ternak!



# BAB XII

## FISIOLOGI PERTUMBUHAN

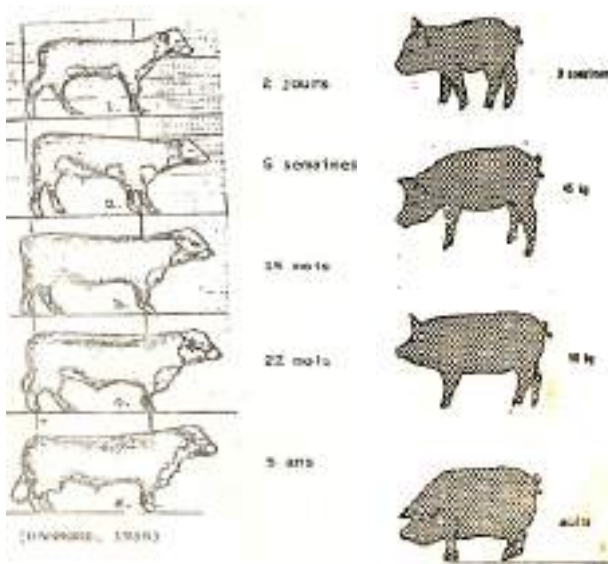
Produktivitas ternak melibatkan berbagai proses fisiologis dalam tubuh ternak dan secara kuantitatif penampilan seekor ternak sangat ditentukan oleh kecepatan pertumbuhan tubuh secara total untuk berproduksi dan secara kualitatif penampilan seekor ternak dipengaruhi tingkat pertumbuhan relatif dari berbagai bagian tubuh. Sebagai contoh untuk ternak sapi potong, produksi daging sangat ditentukan oleh besarnya berat tubuh yang bisa diperoleh dalam waktu singkat. Kualitas karkas dari ternak sapi potong tersebut ditentukan oleh proporsi berbagai bagian tubuh misalnya sistem perototan di daerah panggul dan paha dan proporsi jaringan-jaringan utama tubuh, misalnya daging, tulang dan lemak.

Bab ini akan membicarakan konsep dasar pertumbuhan, perubahan bentuk dan ukuran disebabkan oleh pertumbuhan, pertumbuhan seluruh tubuh, pola dan deskripsi pertumbuhan, pertumbuhan relative, serta fak-tor-faktor yang memengaruhi pertumbuhan.

### A. Konsep Dasar Pertumbuhan

Istilah pertumbuhan dapat diterapkan pada sebuah sel, sebuah organ, sebuah jaringan, seekor individu ternak, atau satu populasi ternak. Definisi sederhana adalah suatu perubahan dalam bentuk/ukuran yang dapat diukur dalam arti panjang, volume, atau massa. Pertumbuhan menurut Hammond (1953) adalah peningkatan dalam bobot badan sampai ukuran dewasa, sedangkan menurut Von Bertalanfy (1960) pertumbuhan merupakan hasil suatu perbedaan positif antara anabolisme dan katabolisme.

Pertumbuhan seekor ternak mencakup pertumbuhan dari komponen tubuh. Komponen-komponen seekor ternak tumbuh pada tingkat berbeda, perubahan dalam ukuran menghasilkan perbedaan dalam diferensiasi sel. Ternak akan mengalami perubahan bentuk secara proporsional, mulai dari lahir sampai ukuran dewasa (Gambar 12.1).



Gambar 12.1 Perubahan-perubahan ukuran dan bentuk selama pertumbuhan pada ternak sapi dan babi

Terdapat tiga gambaran utama pertumbuhan. *Pertama*, terdapat proses dasar pertumbuhan satu sel, dalam hal ini termasuk hiperplasia (penggandaan sel), hipertropi (pembesaran sel), dan pertumbuhan materi nonprotoplasmik (peletakan lemak, glikogen, plasma darah, tulang rawan).

Sel-sel tumbuh pada mulanya dengan hiperplasia, kemudian diikuti dengan hipertropi sampai mencapai ukuran karakteristik untuk organ-organ tertentu. *Kedua*, terdapat diferensiasi sel-sel induk dan embrio menjadi ektoderm, mesoderm dan endoderm dan selanjutnya

berdiferensiasi (tidak bolak-balik/*nonreversible*) menjadi sel-sel spesial, sebagai contoh, saraf dan sel epidermal (ektoderm), otot dan sel, jaringan ikat (mesoderm), sel-sel pada alat-alat pencernaan dan sel kelenjar sekresinya (endoderm). *Ketiga*, terdapat kontrol pertumbuhan dan diferensiasi sel yang melibatkan banyak proses, baik pada penghentian sementara maupun penghentian permanen dari proses pertumbuhan yang dilakukan pada waktu yang tepat.

## **B. Perubahan dalam Bentuk dan Ukuran Sel-sel, Organ, dan Jaringan**

Bila suatu perubahan dalam ukuran sel tidak disertai dengan perubahan bentuk, terdapat hubungan sederhana yang terjadi antara dimensi linear, luas permukaan dan volume: (i) perubahan luas sebagai kuadrat dimensi linear dan (ii) perubahan volume sebagai kubik dimensi linear.

Jika sel berbentuk bulat meningkat dalam diameter sebanyak 10%, luas permukaan meningkat sebanyak 21%, tetapi volume (massa jika kepadatan konstan) meningkat 33%. Tingkat metabolisme sel berhubungan erat dengan bentuknya selama pertukaran zat-zat makanan dan limbah metabolisme.

Sel-sel dengan tingkat metabolisme lebih tinggi adalah lebih kecil ukurannya dari pada sel yang mempunyai tingkat metabolisme rendah. Jadi sel-sel muda mempunyai metabolisme lebih aktif dari pada sel-sel tua dan sel-sel ini lebih kecil dari pada sel-sel dewasa. Sel-sel dewasa dari ginjal, hati, dan lemak cokelat adalah lebih kecil dibandingkan dengan sel-sel jantung dan sel lemak putih.

Sel-sel akan bertumbuh sampai mencapai suatu ukuran khusus dari setiap organ atau jaringan pada tubuh. Ukuran yang dicapai tampaknya dikendalikan oleh perbandingan protein terhadap asam deoksiribosa

(ADN) atau perbandingan sitoplasma terhadap inti sel. Diduga jumlah ADN konstan dalam setiap inti sel diploid, misalnya ginjal manusia mempunyai perbandingan protein : ADN = 50 : 1, pada jantung mendekati 190 : 1 dan otot licin sekitar 400 : 1, ini menunjukkan bahwa sel-sel otot licin lebih besar daripada sel jantung maupun sel ginjal.

Jumlah sel (N) suatu jaringan adalah proporsional terhadap kuantitas ADN yang dirumuskan sebagai berikut:

$$N = k (\text{ADN})$$

dan ketika jumlah ADN meningkat, berarti jumlah sel-sel telah meningkat secara paralel (hiperplasi).

Jika kita menimbang suatu contoh (misal satu organ) pada interval waktu yang tetap selama pertumbuhan, berat suatu organ (P) sama dengan berat satu sel (p) dikalikan dengan jumlah sel (N).

$$P = N \times p \text{ atau } P = k (\text{ADN}) \times p$$

dalam bentuk logaritma:

$$\text{Log } P = \text{Log } K + \text{Log } (\text{ADN}) + \text{Log } p$$

Derivat terhadap waktu:

$$\frac{dp}{Pdt} = \frac{d(\text{ADN})}{(\text{AND}) dt} + \frac{dp}{Pdt}$$

Ini berarti bahwa pada setiap interval waktu tingkat peningkatan berat segar organ ( $dP/P$ ) sama dengan tingkat peningkatan dalam ADN yang meningkatkan tingkat peningkatan ukuran sel (hiperthropi).

## 2. Otot

Otot kerangka adalah yang terbesar dari jaringan daging tubuh yang diperkirakan jumlahnya berkisar 30% dari total bobot badan. Otot merupakan multiinti, mempunyai perbandingan protein : ADN terbesar dari pada jantung dan ginjal. Perbandingan ini bervariasi menurut

species (Tabel 12.1). Bersamaan dengan peningkatan dalam ukuran sel adalah penurunan air ekstra seluler yang terjadi terutama selama periode fetus dan awal kehidupan post natal (Tabel 12.2).

Tabel 12.1 Jumlah protein (mg) berhubungan dengan setiap mg ADN dalam otot kerangka

Spesies	Baru Lahir	dewasa
Tikus	15	400
Babi	33	380
Manusia	175	300

### 3. Tulang Kerangka

Berlawanan dengan jaringan tubuh lainnya, tulang tumbuh dengan peletakan sel lapis per lapis. Jika tulang meningkat dalam ukuran proporsional dengan tubuh tanpa mengubah bentuk, kerenggangan tulang (tergantung kepada daerah sayatan melintang) akan meningkat secara kuadrat sementara massa secara kubik yang menghasilkan satu kerangka yang terlalu lemah untuk menopang ternak. Jadi perbandingan berat tulang terhadap bobot badan adalah lebih tinggi pada ternak besar dibanding pada ternak yang lebih kecil.

Tabel 12.2 Pengaruh pertumbuhan terhadap komposisi dan otot kerangka pada babi (g/kg otot)

	FETUS		POSTNATAL		
	46 hari	90 hari	lahir	3 minggu	Dewasa
Massa Sel	d242	473	538	651	739
Total Air	916	873	823	778	735
Ekstraseluler	716	453	347	264	174
Intraseluler	200	420	476	514	551

Pada ternak yang sedang tumbuh, terdapat perubahan dalam bentuk kerangka yang berhubungan dengan fungsinya, misalnya kaki depan umumnya berkembang lebih awal dari pada kaki belakang dan kepala menjadi proporsional lebih kecil relatif terhadap kerangka.

Hewan yang tidak mampu berjalan pada waktu lahir (mencit, tikus, anjing, dan marmot) mempunyai kaki relatif pendek terhadap tubuh dengan kalsifikasi tulang yang kurang, sedangkan hewan yang mampu berjalan pada waktu lahir dan mengikuti induknya (sapi dan domba) mempunyai kaki lebih panjang dan kalsifikasi tulang lebih tinggi.

#### **4. Jaringan lemak**

Jaringan lemak merupakan bagian dari jaringan ikat tubuh dan jumlahnya sangat bervariasi bergantung pada tahap dan tingkat pertumbuhan dari ternak, jaringan lemak berakumulasi pada tempat-tempat khusus (sebagai contoh: di bawah kulit, di antara otot, dekat ginjal, alat pencernaan, antara serabut otot dan rongga pelvis), distribusinya bervariasi antara spesies.

Terdapat sangat sedikit jaringan lemak pada semua mamalia selama awal 1/2 umur kebuntingan, pada banyak spesies (kucing, mencit, tikus, anjing, dan babi), jaringan lemak tetap sangat kurang selama kebuntingan sehingga pada waktu lahir total lipid hanya berkisar 1–2% dari bobot badan.

Spesies lain (domba dan sapi) mulai menyimpan lemak dalam bentuk adiposit dalam jumlah kecil yang menghasilkan kandungan lemak pada waktu lahir antara 2 dan 4%. Marmot mempunyai kandungan lemak yang tinggi pada waktu lahir (10%). Meskipun demikian, spesies yang lahir tanpa kandungan lemak, akan meletakkan lemak sangat cepat segera setelah mulai makan dan tumbuh setelah lahir. Sebagai contoh, lemak tubuh meningkat dari 1 sampai 10% pada tikus selama dua minggu pertama setelah lahir dan peningkatan yang sama terjadi pada babi selama tiga minggu pertama setelah lahir.

Jumlah lemak tubuh diakumulasikan oleh ternak dewasa bervariasi antara spesies. Pada babi dan domba yang sedang tumbuh, lemak tubuh

dapat mencapai 40–50% dari bobot badan pada umur 2 tahun, sementara pada sapi, tingkat lemak cenderung lebih rendah 30–35%.

Terdapat dua jenis jaringan lemak yang berbeda baik secara morfologi maupun metabolisme, tetapi mereka berasal dari prekursor yang sama. Lemak putih adalah lemak utama dan berfungsi sebagai cadangan energi jangka lama. Lemak cokelat terjadi pada hewan baru lahir dan mungkin juga ada pada hewan dewasa.

## C. Pertumbuhan Seluruh Tubuh

### 1. Pertumbuhan prenatal

Pertumbuhan mulai dengan fertilisasi sel telur, ukuran dari sel telur bervariasi bergantung pada spesies, misalnya pada anjing, kuda, domba, dan kambing diameter telur mencapai 140  $\mu$ , tetapi tidak bergantung pada tingkat pertumbuhan dan ukuran ternak pada waktu lahir dan dewasa.

Tabel 12.3 Lamanya bunting, bobot lahir, dan rata-rata tingkat pertumbuhan selama periode kebuntingan pada berbagai spesies

Spesies	Lama Bunting (hari)	Bobot Lahir (g)	Tk Pertumbuhan (g/h)
Mencit	21	2	0,09
Tikus	21	5	0,24
Manusia	280	3500	12,50
Babi	114	1500	13,10
Sapi	280	35.000	125,00
Gajah	600	114.000	190,00
Ikan Paus	330	3.000.000	9.000

Babi mempunyai bobot 1/2 dari berat manusia pada waktu lahir meskipun tumbuh pada tingkat yang sama dengan manusia selama

periode kebuntingan. Anak sapi mempunyai lama bunting yang sama dengan manusia, tetapi berat pada waktu lahir 10 kali besar dari manusia. Ikan paus menghabiskan setengah dari waktu dalam uterus yang dialami oleh gajah, tetapi tumbuh 50 kali lebih cepat (Tabel 12.3).

Alasan utama untuk perbedaan spesies dalam tingkat pertumbuhan disebabkan oleh tingkat awal pembelahan sel dan suplai total darah ke uterus. Pada umumnya diduga bahwa penyediaan zat-zat makanan selalu cukup selama awal atau 2/3 periode kebuntingan. Pada tahap perkembangan awal sampai tahap 8 sel, blastosit tetap memelihara beratnya, sedangkan pembelahan sel-sel menjadi berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa pertumbuhan dibatasi lingkungan maternal. Namun demikian pertumbuhan dalam uterus umumnya dibatasi selama akhir 2/3 kebuntingan bila fetus bertambah beratnya dengan cepat. Sebagai contoh, fetus domba merino tumbuh sebesar 0,5 gr/hari selama 50 hari pertama kebuntingan dan 160 kali lebih cepat (82 gr/hari) selama 50 hari akhir kebuntingan sebelum lahir

## **2. Pertumbuhan *Postnatal***

Pertumbuhan selama periode menyusui bergantung pada kuantitas dan kualitas susu yang disediakan induk. Terdapat perbedaan besar antara spesies baik dalam jumlah total energi yang disuplai oleh susu dan dalam komposisinya (Tabel 12.4)

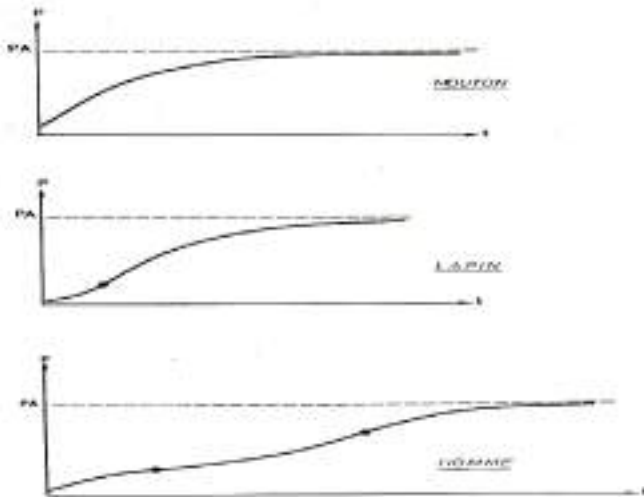
Keragaman dalam kuantitas dan kualitas susu menimbulkan perbedaan tingkat pertumbuhan spesies selama periode menyusui. Tingkat pertumbuhan mutlak umumnya lebih besar selama periode menyusui dibanding selama kebuntingan. Pemberian makanan yang cukup setelah disapih menyebabkan tingkat pertumbuhan yang lebih tinggi pada periode setelah disapih daripada periode menyusui.

Tabel 12.4 Komposisi zat-zat nutrisi pada air susu (g/per kg) dan tingkat pertumbuhan (g/ekor/hari) selama kebuntingan dan setelah lahir pada berbagai spesies hewan

Spesies	Protein (g)	Lemak (g)	Karbohidrat (g)	Energi (g)	PBB prenatal	PBB postnatal
Tikus	20	20	30	5,6	0,24	1,70
Babi	60	90	50	5,4	13,1	295
Manusia	10	40	70	2,9	12,5	25
Sapi	30	40	50	2,9	125	580
Ikan Paus	120	400	10	17,8	9000	86000

PBB: pertambahan bobot badan(g/ekor/hari)

Pada periode setelah disapih, pengaruh susu dan induk telah tidak ada dan individu ternak dapat mengekspresikan kemampuan tumbuhnya sesuai lingkungan hidupnya. Beberapa faktor yang memengaruhi pertumbuhan setelah disapih adalah level dan kualitas pakan, jenis kelamin, genetik, umur dan berat disapih, serta faktor lingkungan.



Gambar 12.2 Kurva pertumbuhan pada A. domba, B. delinci, dan C. manusia

Pertumbuhan *postnatal*, termasuk bobot lahir dan bobot badan akhir mengikuti perubahan berat berdasarkan waktu menurut persamaan.

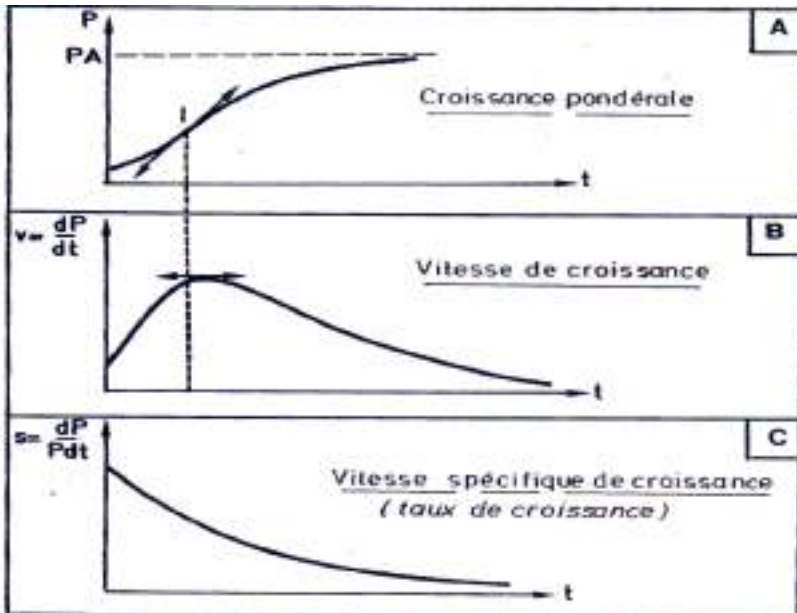
$$P = f(t)$$

sedangkan kecepatan pertumbuhan dapat dihitung dari persamaan:

$$P = V = \frac{dp}{dt} \quad \text{atau} \quad v = \frac{P2 - P1}{T2 - T1}$$

di mana :

- P2: Berat akhir                      P1: Berat awal
- T2: Akhir pengamatan            T1: Awal pengamatan



Gambar 12.3 Kurva pertumbuhan mutlak, kecepatan pertumbuhan (pertambahan bobot badan harian) (gr/ekor/hari) dan laju pertumbuhan spesifik

Kecepatan pertumbuhan seekor ternak dipengaruhi oleh umur, bangsa, dan lingkungan ternak waktu dipelihara. Sebagai contoh hasil penelitian Sonjaya (1996) yang meneliti pertumbuhan sapi Bali sapihan berasal dari daerah yang berbeda dan dipelihara pada kondisi percobaan yang sama. Dengan memerlihatkan adanya interaksi antara umur dengan daerah asal terhadap penambahan bobot badan harian, sapi yang berasal dari daerah dataran sedang dan lokasi pesawahan (Maros) lebih tinggi dibandingkan dengan sapi yang berasal dari daerah pantai (Barru) dan pegunungan (Bone) (Tabel 12.5).

Tabel 12.5 Rataan bobot badan (kg) sapi Bali jantan yang dipelihara intensif selama 6 bulan

Daerah	Periode Penimbangan (umur:bulan)					
	I(13)	II (14)	III (15)	IV (16)	V (17)	VI (18)
Barru	113.43a (9.41)	120.29ab (7.13)	133.43a (11.36)	143.43a (11.30)	164.29a (10.46)	187.66a (12.27)
Bone	111.86a (10.37)	118.14a (10.57)	136.43ab (15.32)	151.00ab (13.95)	167.71ab (15.64)	194.29ab (15.04)
Maros	110.71a (10.69)	128.43b (9.26)	144.43c (9.64)	161.57c (8.06)	176.14c (8.82)	201.71c (11.41)
Rataan	112.00 (9.72)	121.62 (9.31)	138.10 (12.63)	153.67 (12.25)	169.38 (12.96)	194.62 (13.97)

Keterangan:

- Angka dalam kurung menunjukkan standar deviasi angka diatasnya
- Hurup yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan nyata ( $P < 0,05$ )

Kecepatan pertumbuhan mutlak sangat cepat, mulai dari proses pembuahan sampai pubertas, kemudian menurun perlahan sampai menjadi nol bila bobot dewasa telah dicapai. Untuk hewan yang cukup

panjang umurnya, tingkat pertumbuhan akan menjadi negatif karena bobot badan akan menurun sebelum mati. Pada umumnya, tingkat pertumbuhan ternak maksimum (saat pubertas) dicapai bila bobot badan ternak sudah mencapai 1/3 dari bobot dewasa.

Peubah lain dari tingkat pertumbuhan adalah kecepatan pertumbuhan spesifik (tingkat pertumbuhan relatif), di mana rumusnya adalah:

$$s = \frac{dp}{dt} \times \frac{l}{p} = \frac{v}{p} \quad \text{atau} \quad s = \frac{P_2 - P_1}{P_1 (T_2 - T_1)}$$

Dengan rumus tersebut, pertumbuhan menjadi rendah setelah proses pematangan bila zygote sedang aktif membelah dan mencapai maksimum pada saat embrio 8 sampai 16 sel. Setelah itu, menurun sepanjang periode kebuntingan dan kehidupan *postnatal*.

Kurva pertumbuhan dapat pula dideskripsikan secara matematik dengan beberapa persamaan numerik:

a. Penyesuaian pada Data Seri Polinomial

$$P = P_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_nt^n$$

b. Model Brody (1945)

- pertumbuhan cepat:  $P = P_0 e^{-kt}$
- pertumbuhan lambat:  $P = A (1 - Ce^{-kt})$

c. Persamaan logistik

$$P = \frac{A}{1 + be^{-kt}}$$

d. Persamaan Compertz

$$P = A e^{-be^{-kt}}$$

e. Persamaan L. Von Bertalanfy

$$P = A (1 - Cekt)a$$

### **1.2 Komponen Tubuh**

Pengukuran dan evaluasi perubahan dalam senyawa tubuh lebih kompleks dibandingkan dengan mengukur bobot badan.

a. Teknik Pematangan

Ternak dapat dipotong pada awal dan akhir suatu periode percobaan atau pada beberapa tingkat bobot badan dan/atau umur selama perlakuan. Komponen-komponen tubuh (lemak, tulang daging, kulit, organ-organ lainnya) dapat dipisahkan melalui pematangan bagian-bagian tersebut atau dapat juga dilakukan dengan mengambil sampel contoh dari bagian tubuh, digiling dan dianalisis secara kimia (zat lemak, nitrogen, air, dan abunya). Prosedur untuk melakukan diseksi dan mendefinisikan komponen-komponen jaringan yang sangat bervariasi dan membutuhkan spesifikasi.

Faktor pembatas dari teknik pengukuran dan evaluasi pertumbuhan melalui teknik pematangan memiliki biaya mahal dan sukar untuk mendapatkan populasi yang seragam genetiknya, kecuali untuk hewan percobaan atau unggas.

b. Ternak Hidup

Akhir-akhir ini para peneliti lebih banyak menaruh perhatian pada pengukuran langsung ternak hidup dengan dasar bahwa pengukuran langsung akan lebih baik dalam menggambarkan pertumbuhan melalui pengukuran yang berkesinambungan pada ternak yang sama sepanjang hidupnya.

Cara yang paling sederhana adalah pengukuran linear eksternal (tinggi, panjang), tetapi cara ini hanya menunjukkan perubahan ukuran kerangka atau ukuran bentuk. Pengukuran linear internal dapat

dilakukan dengan cara mekanik atau ultrasonik (misalnya untuk pengukuran kulit, kedalaman lemak dibawa kulit). Faktor pembatas cara ini adalah adanya usaha untuk menginterpretasikan secara volumetrik yang dapat menimbulkan kesalahan.

Pertumbuhan sel dan jaringan juga dipelajari pada ternak hidup dari contoh sampel yang didapatkan dengan cara biopsi. Pengukuran jumlah ADN dan protein suatu jaringan atau sel dan perkiraan perubahan perbandingan protein : ADN merupakan informasi berharga untuk mengetahui apakah sel-sel sedang tumbuh atau tidak.

### 1.3 Pertumbuhan Compensatoris (*Compensatory Growth*)

Di lapangan sering ditemukan bahwa ternak sapi yang dipelihara di padang rumput (Ranch) pada musim kemarau, tingkat pertumbuhan nol bisa menjadi negatif, begitu rumput tumbuh subur pada musim hujan, terjadi peningkatan bobot badan yang sangat tinggi. Fenomena ini disebut pertumbuhan kompensatoris. Ternak memperlihatkan suatu kemampuan luar biasa untuk memulihkan kembali pertumbuhan setelah periode kekurangan makanan. Pertumbuhan kompensatoris telah banyak diobservasi pada banyak spesies, termasuk domba, sapi, babi, tikus, marmot, dan manusia.

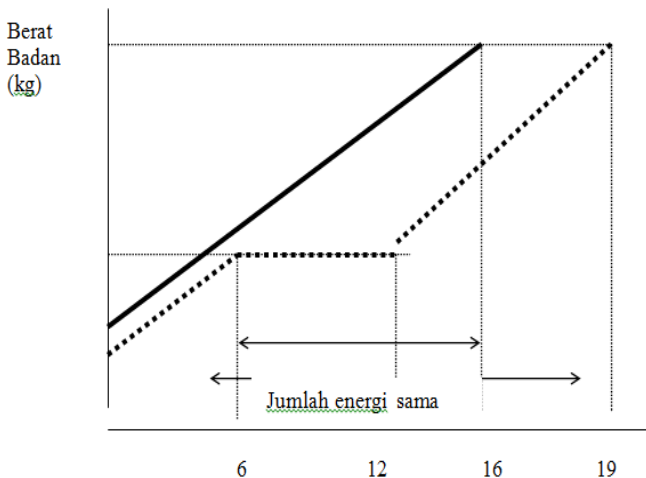
Kompensatoris kadang-kadang sempurna (Gambar 12.4), di mana ternak dapat mengejar ketinggalan pertumbuhannya secara baik. Meskipun demikian, pemulihan kembali pertumbuhan sering tidak sempurna. Cekaman nutrisi pada kehidupan lebih awal dan panjangnya periode kekurangan zat makanan akan mengurangi terjadinya pertumbuhan kompensatoris. Jika tikus kekurangan gizi dari umur 9 sampai 12 minggu kehidupan *postnatal* dan pertumbuhan kompensatoris yang mengikutinya akan sempurna. Jika kekurangan gizi terjadi antara umur 3 sampai 12 minggu, akan terjadi pertumbuhan kompensatoris tidak sempurna, sebaliknya jika malnutrisi antara lahir

sampai umur disapih 3 minggu, tikus tidak akan memperlihatkan tanda-tanda pertumbuhan kompensatoris dan akan tetap menjadi kerdil (McCance 1976).

Aplikasi dari fenomena pertumbuhan kompensatoris adalah memanipulasi laju pertumbuhan pada waktu terjadi krisis pakan atau harga pakan melambung. Pada saat pakan harganya sedang tinggi, sehingga pemberian pakan hanya diberikan untuk memenuhi kebutuhan hidup pokok saja, sebaliknya pada waktu harga pakan turun, peternak dapat memacu pertumbuhan ternak dengan memanfaatkan fenomena pertumbuhan kompensatoris.

#### 1.4 Pertumbuhan Relatif Komponen-komponen Tubuh

Bila seekor ternak tumbuh dan meningkat bobot badannya, proporsi dari komponen-komponen tubuh satu sama lain akan berubah. Hal ini berarti setiap peningkatan bobot badan mengandung proporsi lemak, otot, dan tulang yang berbeda.



Gambar 12.4 Kurva pertumbuhan ternak yang normal (1) dan pertumbuhan ternak yang mendapat perlakuan manipulasi pakan untuk mendapatkan pertumbuhan kompensatoris

Gambar 12.4 merupakan contoh hubungan untuk berbagai jaringan dan organ anak domba, ketika berat karkas berkembang antara 4 kg dan 10 kg. Lebih jauh lagi, Tabel 6 dan 7 memperlihatkan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap koefisien pertumbuhan alometrik, misalnya pengaruh genetik (bangsa ternak), jenis jaringan, kualitas dan kuantitas pakan yang diberikan.

Hubungan antara pertumbuhan suatu organisme dengan bagian-bagian tubuhnya disebut "Hubungan Alometrik", dikembangkan oleh Huxley JS 1932, yang mendeskripsikan pertumbuhan relatif suatu organ lebih tinggi dibandingkan dengan bobot tubuh keseluruhan. Hubungan ini dinyatakan dengan rumus berikut:

$$y = a x^b \text{ atau } \log y = \log a + b \log x$$

di mana y adalah berat suatu jaringan atau organ, x adalah berat seekor ternak, b adalah koefisien pertumbuhan dari suatu organ atau jaringan, dan a adalah konstanta.

Tabel 12.6 Koefisien pertumbuhan alometrik (b) dan % tulang, jaringan otot, dan lemak dari karkas dingin pada kerbau dan sapi

Berat karkas dingin	Genotip		Tulang	Otot	Lemak	Rasio tulang	Otot:	N	Seks	GiziPakan
109*	Kerbau sungai	b	0,70	0,96	2,36	2,99		30	JTN	Tinggi
		%	22,0	65,8	12					
	Sapi Frisien	b	0,73	0,97	2,11	2,64		30	JTN	Tinggi
		%	24,4	64,3	10,9					
150**	Kerbau Rawa	b	0,75	1,04	0,79	3,65		12	JTN	Rendah
		%	18,6	67,8	4,8					
		b	0,69	0,96	1,81	3,66		13	BTN	Rendah
		%	18	65,9	9,0					
182***	Kerbau Rawa	b	0,67	0,88	2,65	3,74		12	JTN	Tinggi
		%	16,7	62,5	20,6					
	Sapi Frisien	b	0,77	0,92	2,19	3,95		11	JTN	Tinggi
		%	16,55	65,2	18,3					

Ket: BTN: betina; JTN: jantan

Sumber: Romita *et al.* (1978); \*\* Natasasmita A (1978); \*\*\*Moran dan Wood (1986)

Persamaan alometrik telah banyak digunakan secara luas dan banyak berguna untuk menggambarkan diferensiasi pertumbuhan. Bila persamaannya  $b < 1$  artinya pertumbuhan relatif suatu organ atau jaringan lebih rendah dari pertumbuhan keseluruhan. Sebagai contoh, otak mempunyai penurunan proporsional terhadap bobot badan pada waktu ternak bertumbuh dan meningkat ukurannya (ini disebut alometrik minor). Sebaliknya bila  $b > 1$ , artinya peningkatan proporsional pada bobot komponen lebih besar daripada untuk bobot badan tubuh (keadaan ini disebut allometrik major). Bila  $b = 1$ , artinya perubahan proporsional pada komponen tubuh dan bobot badan adalah sama (disebut isometri).

Meskipun persamaan alometrik banyak manfaatnya pada berbagai situasi tetapi tidak mempunyai dasar biologis, persamaan tersebut tidak dapat digunakan pada berbagai situasi. Banyak organ tubuh tidak berhubungan secara alometrik terhadap bobot badan. Sebagai contoh, hubungan alometrik berat otak dengan berat badan di bawah perkiraan pada bobot badan rendah dan di atas perkiraan pada bobot badan tinggi. Organ dengan variasi besar dalam ukuran dan bobot badan bergantung pada kondisi nutrisi dan fisiologis. Persamaan alometrik hanya menerangkan sejumlah kecil varians dan mempunyai nilai perkiraan yang rendah untuk bobot organ. Meskipun demikian, jika digunakan secara hati-hati, persamaan alometrik banyak manfaatnya.

Tabel 12.7 Berat komponen non karkas (kg), koefisien pertumbuhan alometrik, dan persentase karkas pada ternak ruminansia besar di Indonesia yang diberi pakan konsentrasi tinggi (C) atau hijauan tinggi (R) (N: 11–13 jantan per spesies per ransum)

	Ransum	Kerbau	Onggole	Grati	b
Internal offal					
Paru-paru	C	2,57a	1,99b	2,77a	0,36
	R	2,29b	2,19b	2,52a	0,59
Hati	C	1,70a	1,22b	1,64a	0,67
	R	1,65a	1,16c	1,35b	0,77
Limfa	C	1,05a	0,82a	0,92a	0,64
	R	1,19a	0,81a	0,86b	0,84
Ginjal	C	0,82b	0,73b	1,03a	0,23
	R	0,66a	0,57a	0,67a	0,58
Alat pencernaan	C	16,67a	15,23ab	14,13b	0,10
	R	18,31a	14,37b	15,04b	0,64
Eksternal offal					
Kepala	C	18,04a	15,18b	17,87a	0,62
	R	18,75a	17,66b	18,81a	0,77
Kaki	C	8,78a	5,88c	7,25b	0,56
	R	8,22a	6,76b	7,75a	0,59
Paha	C	37,17a	23,07b	22,12b	0,94
	R	34,04a	27,08b	22,78a	1,01
ekor	C	0,90b	1,03a	1,11a	0,51
	R	0,83b	1,28a	1,22a	0,58
Berat karkas dingin	C	163,8b	183a	183,5a	1,06
	R	164,7b	186a	186,2a	1,02
% karkas	C	51,7b	58,0a	57,9a	-
	R	52,0a	58,7a	58,8a	-

Sumber: Moran dan Wood (1985)

### 1.5 Faktor-faktor yang Memengaruhi Pertumbuhan

Secara garis besar terdapat dua faktor yang memengaruhi pertumbuhan, yaitu faktor internal dan faktor eksternal.

a. Faktor Internal

Dari faktor internal dapat dibagi lagi menjadi faktor yang berasal dari sistem saraf, sistem endokrin, dan faktor genetik.

*Sistem saraf*

Peranan sistem saraf dalam pertumbuhan sangat kompleks dan sukar dideteksi secara tepat perannya. Meskipun demikian, telah dibuktikan bahwa pada sistem saraf disekresikan berbagai neurohormon dan mediator kimia yang berpengaruh terhadap fungsi endokrin pertumbuhan.

Sebagian besar hubungan sistem saraf dengan proses pertumbuhan dilakukan melalui "kompleks hipotalamus-hipofisa". Sebagai contoh, pada hipotalamus merupakan tempat berbagai sistem saraf dan pusat-pusat pengaturan, termasuk pusat pengaturan lapar dan kenyang. Pusat pengaturan lapar (bagian medial dan kenyang bagian lateral) mengatur jumlah zat-zat makanan yang masuk dan hal ini berpengaruh langsung terhadap pertumbuhan maupun penggemukan. Berbagai rangsangan maupun penghambat nafsu makan dioperasikan melalui sistem saraf.

*Sistem endokrin*

Sistem endokrin mempunyai peranan penting dalam proses pertumbuhan, melalui kerja hormon yang disekresikan oleh beberapa kelenjar. Aktivitas hormon dalam memengaruhi sel atau jaringan untuk tumbuh cukup kompleks dan sebagian mekanismenya belum banyak diketahui. Gambar 12.5 memperlihatkan hubungan berbagai kelenjar dan hormon yang disekresikannya dalam memengaruhi proses pertumbuhan.

*Kelenjar Timus*

Kelenjar ini memainkan peranan tertentu dalam pertumbuhan karena ablasi kelenjar timus pada ternak muda menyebabkan kerdil.

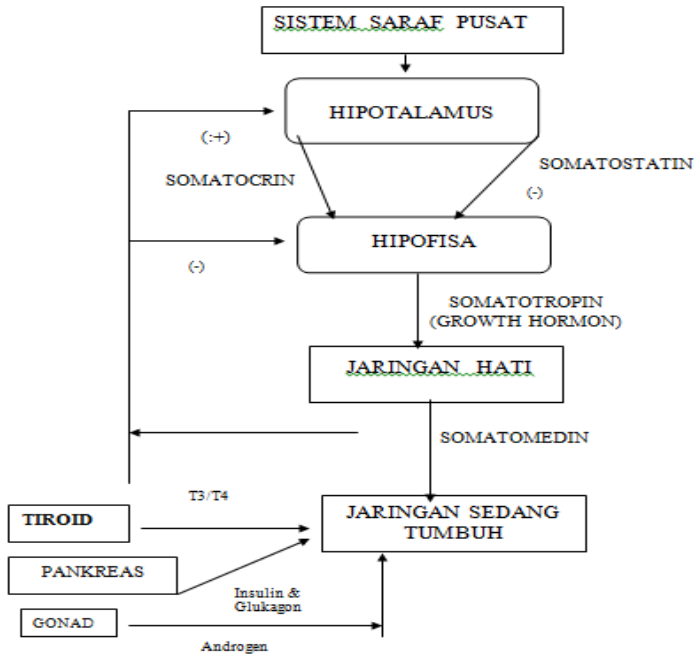
Meskipun demikian, aktivitas ini hanya bersifat sementara karena sesudah periode cukup panjang kurva pertumbuhan ternak yang dioperasi akan kembali seperti pada kontrol. Telah dibuktikan bahwa setelah lahir kelenjar timus tumbuh terus sampai periode tertentu, tetapi setelah mencapai pertumbuhan maksimum, timus berdegenerasi secara perlahan-lahan sampai punah pada ternak dewasa (Benevent 1980).

### *Kelenjar adrenal*

Kelenjar adrenal mempunyai dua bagian dengan fungsi endokrin yang berbeda. **Pertama**, bagian medula yang cukup gelap dan mensekresikan hormon epinefrin (adrenalin) dan norepinefrin. **Kedua**, bagian korteks yang pucat mensekresikan hormon: (1) glukokortikoid yang memudahkan perubahan protein menjadi karbohidrat, (2) mineralkortikoid yang mengatur metabolisme air dan elektrolit (natrium dan kalium), dan (3) androgen yang mempunyai aktivitas hormon kelamin jantan.

Hormon-hormon glukokortikoid (kortisol, kortison, dan kortikosteron) mempunyai pengaruh berbeda-beda dalam mengatur pertumbuhan. Hormon tersebut mempunyai aktivitas lipolitik, memperlancar mobilisasi lemak atau memperlambat transformasi karbohidrat menjadi lemak dengan memperlancar penyimpanan glikogen dalam hati.

Kelebihan glukokortikoid umumnya berhubungan dengan keterlambatan pertumbuhan yang disebabkan adanya pengaruh proteolitik terhadap otot dan mempunyai aktivitas terhadap pertumbuhan tulang panjang. Adrenalin merupakan salah satu hormon pendorong terjadinya mobilisasi lemak dan menyebabkan oksidasi asam lemak dipercepat di hati.



Gambar 12.5 Skema kontrol endokrin dan hormon-hormon yang terlibat selama pertumbuhan

### *Hormon Kelamin*

Terdiri atas steroid-steroid, baik yang berasal dari testis (androgen) maupun dari ovarium (estrogen atau progesteron).

Androgen (misalnya testosteron) mempunyai dua fungsi yang berbeda terhadap pertumbuhan. Hormon ini mempunyai aktivitas menghambat terhadap ukuran. Kerangka dengan mempercepat osifikasi tulang rawan untuk bertumbuh (jantan yang dikubiri mempunyai kerangka tubuh yang lebih besar dibandingkan dengan pejantan dan mempunyai kepala yang relatif panjang). Di lain pihak, androgen mempermudah anabolisme pada tingkat otot yang menyebabkan ketebalan diameter perototan.

Oestrogen (estron dan estradiol) nampaknya tidak mempunyai aktivitas yang jelas terhadap pertumbuhan. Kastrasi pada ternak betina (ovariektomi) tidak memengaruhi pertumbuhan, baik perkembangan perototan maupun peletakan lemak. Sebaliknya, pemberian dalam waktu lama estrogen pada betina normal menghambat pertumbuhan dengan mempercepat osifikasi tulang rawan berkonjugasi.

Penggunaan derivat hormon kelamin dalam meningkatkan produksi ternak potong telah banyak dilakukan. Sebagai contoh penggunaan Trienik methyltestosteron untuk penggemukkan sapi-sapi afkiran dapat meningkatkan tingkat pertumbuhan sebanyak 30 sampai dengan 60% dibandingkan dengan kontrol. Demikian juga penggunaan Diethylstilboestrol (DES) untuk mempercepat atau meningkatkan pertumbuhan ternak-ternak muda yang telah lama dilakukan pada anak sapi, domba, dan ayam.

### *Kelenjar Pankreas*

Pada mamalia merupakan kelenjar campuran. Kelenjar eksokrin yang mensekresikan cairan pankreas dan kelenjar endokrin yang terdiri dari agregat sel-sel pulau langerhans mensekresikan hormon insulin dan glukagon.

Insulin adalah suatu hormon anabolisme, di mana peranan utamanya memperlancar pembentukan dan menyediakan bahan-bahan penting untuk pertumbuhan. Pada metabolisme karbohidrat, insulin mempunyai fungsi utama untuk menurunkan kadar gula dalam darah (*glycemia*) dan meningkatkan penggunaan glukosa oleh sel-sel serta mempermudah transformasi glukosa dalam bentuk glikogen di hati atau dalam bentuk lemak atau protein (memperlancar proses lipogenesis dan proteinogenesis). Glukagon berfungsi dalam meningkatkan kadar glukosa dalam darah dengan merangsang proses pemecahan glikogen menjadi glukosa (glikogenolisis) di hati.

### *Kelenjar Tiroid*

Sejumlah vertebrata tidak dapat mencapai ukuran dewasa normal, apabila ada gangguan sekresi kelenjar tiroid. Pada manusia kekurangan hormon tiroksin menyebabkan menderita penyakit gondok (*myxoedema*), dilanjutkan bila lebih parah menjadi kerdil dan idiot. Hal yang sama terjadi pada ternak muda, pengambilan kelenjar tiroid menyebabkan pertumbuhan terhambat atau sama sekali berhenti tumbuh dan akhirnya menjadi oedema. Pengaruh utama dari hormon kelenjar tiroid adalah meningkatkan metabolisme basal.

### *Kelenjar hipofisa*

Hormon Somatotropin (STH atau *Growth Hormone/GH*) adalah hormon disekresikan oleh kelenjar hipofisa anterior dan mempunyai aktivitas langsung terhadap pertumbuhan. Hormon pertumbuhan memengaruhi laju sejumlah proses metabolisme yang mengakibatkan peningkatan sintesis protein sel, mobilisasi lipid dari jaringan, peningkatan kadar lipid dalam darah, peningkatan endapan glikogen dalam hati, dan peningkatan kadar glukosa dalam darah. Pengaruh hormone pertumbuhan terhadap berbagai proses metabolisme melalui berbagai cara, baik meningkatkan kemampuan hormon lain (misalnya; hormon insulin dan tiroksin) maupun melalui penghubung sebagai mediator hormon (contoh somatomedin) atau secara langsung.

### *Genotipe*

Terdapat perbedaan dalam bangsa-bangsa ternak dalam tingkat pertumbuhan dan komposisi tubuh. Hal ini diduga bahwa perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan pada ukuran tubuh saat umur dewasa.

Bangsa ternak besar akan lahir lebih berat, lebih cepat pada berbagai umur, dan pada banyak kasus akan lebih berat pada dewasa kelamin dibandingkan dengan bangsa ternak kecil. Diduga bahwa kedua bangsa mempunyai komposisi tubuh sama pada saat dewasa. Jadi,

perbandingan pada bobot badan sama, ternak dari bangsa yang lebih besar lebih berotot (banyak tulang dan otot, kurang lemak) dibandingkan dengan bangsa ternak kecil karena bangsa ternak besar secara fisiologis lebih muda.

## B. Faktor Eksternal

### *Nutrisi*

Konsumsi makanan merupakan faktor penting dalam menunjang pertumbuhan, baik jenis ransum maupun komposisi zat-zat penyusun ransum tersebut. Makanan dapat berpengaruh nyata terhadap pertumbuhan dan komposisi tubuh bila ternak dibanding pada umur sama. Bila perbandingan dilakukan pada bobot badan sama (berat karkas) perbedaannya sering kurang nyata. Telah disepakati oleh beberapa peneliti bahwa dalam bangsa dan jenis kelamin sama, pengaruh utama nutrisi terhadap komposisi tubuh adalah pada lemak tubuh, jaringan bebas lemak tetap pada perbandingan relatif konstan.

Peranan nutrisi dalam memengaruhi pertumbuhan didasarkan atas tiga hal.

**Pertama, ada atau tidaknya unsur esensial makanan.** Secara kualitatif vitamin, berbagai unsur mineral dan asam amino esensial sangat penting untuk pertumbuhan. Kekurangan salah satu unsur dari zat-zat makanan dapat berpengaruh nyata menghambat pertumbuhan.

**Kedua, komposisi ransum atau keseimbangan antara zat-zat makanan.** Komposisi ransum berhubungan dengan mencari keseimbangan yang terbaik antara berbagai zat-zat makanan untuk mencapai tujuan tertentu dari pertumbuhan. Sebagai contoh, hasil penelitian yang dilakukan oleh Beranger (1967). Dua kelompok sapi jantan bangsa sapi Saler diberikan perlakuan makanan dua jenis ransum isoenergi yang menjamin kecepatan pertumbuhan sama, tetapi komposisi berbeda.

- Ransum A: terdiri 80% biji-bijian dan 20% hijauan.
- Ransum B: terdiri atas 80% hijauan padat dan 20% biji-bijian.

Karkas yang didapatkan selama periode yang sama menghasilkan bobot karkas yang tidak berbeda. Namun demikian, ransum A menghasilkan daging yang terlalu banyak lemak (16–17% lemak), sedangkan ransum B memperlihatkan hasil penggemukkan yang diinginkan (<13% lemak).

**Ketiga, level energi ransum.** Tingkat nutrisi atau energi merupakan aspek kuantitatif dan merupakan salah satu teknik utama yang dapat digunakan dalam praktik untuk mempercepat dan memperlambat kecepatan pertumbuhan.

#### C. Faktor Tata Laksana

Tatalaksana yang baik pada umumnya menghasilkan pertumbuhan ternak yang baik. Pemberian obat cacing (antihelminetik) dan vaksinasi secara teratur juga akan mencegah faktor-faktor yang merugikan terhadap pertumbuhan.

#### D. Faktor Lainnya

Berbagai faktor lainnya seperti faktor iklim (udara, temperatur lingkungan, hujan), dan penyakit juga berpengaruh terhadap pertumbuhan baik langsung maupun tidak langsung.

## RINGKASAN

1. Pertumbuhan adalah perkembangan dari perubahan massa, bentuk, struktur, dan komposisi suatu organisme di bawah kontrol metabolisme. Pertumbuhan mencakup proses hipertropi, yaitu pembesaran sel dan hiperplasia yaitu penggandaan sel.
2. Perubahan sel, organ, dan jaringan yang sedang tumbuh dapat dilihat pada perbandingan protein : ADN. Terdapat peningkatan rasio protein : ADN sejalan dengan pertumbuhan dari ternak muda

menjadi dewasa.

3. Pertumbuhan prenatal dimulai dari fertilisasi sampai melahirkan, di mana pertumbuhan embrio dan fetus sampai anak lahir. Pertumbuhan janin dalam kandungan sangat bergantung pada kemampuan uterus maternal. Pertumbuhan *postnatal* selama periode menyusui sangat bergantung pada kuantitas dan kualitas susu yang disuplai dari induknya.
4. Pertumbuhan dapat dideskripsikan dengan kurva pertumbuhan yang menggambarkan peningkatan bobot badan, tingkat pertumbuhan, dan tingkat pertumbuhan relatif. Pertumbuhan relatif bagian-bagian tubuh dapat dinyatakan dengan persamaan alometrik:  $y = axb$ .
5. Pertumbuhan kompensatoris merupakan pertumbuhan yang cepat setelah berhenti sementara karena kurangan makanan, sehingga pada waktu makanan tersedia dia akan mengejar dan memulihkan pertumbuhan ke arah normal.
6. Faktor-faktor yang memengaruhi pertumbuhan adalah faktor internal (sistem saraf, sistem endokrin, dan faktor genetik) dan faktor eksternal (nutrisi dan tata laksana). Di antara faktor internal yang paling berkaitan langsung adalah sistem endokrin, di mana hormon-hormon secara langsung memengaruhi proses bertumbuh melalui pengaturan dalam berbagai proses metabolisme.

Latihan berikut ini sengaja disusun untuk memantapkan Anda terhadap materi yang baru dibicarakan. Kerjakanlah latihan berikut dengan sungguh-sungguh!

1. Apa yang dimaksud dengan pertumbuhan?
2. Apa hubungannya proses pertumbuhan dengan pertumbuhan sel, jaringan, dan organ?
3. Apa perbedaannya pertumbuhan dengan penggemukan? Jelaskan!

4. Jelaskan perbedaan antara pertumbuhan prenatal dengan *postnatal*
5. Seorang petani memelihara anak sapi sebanyak 4 ekor sapihan yang bobot badan awalnya masing-masing 70, 85, 90, dan 94 kg. Setelah 6 bulan dipelihara bobot badannya bertambah masing-masing menjadi 124, 130, 145, dan 155 kg. Hitung tingkat pertumbuhan relatif dan kecepatan rata-rata pertumbuhan dari keempat ekor sapi tersebut.
5. Bagaimana cara mengukur proses pertumbuhan pada ternak?
6. Suatu organ yang beratnya 100 gr dan seekor anak domba beratnya 10 kg. Keduanya mempunyai tingkat pertumbuhan yang sama yaitu 1% per hari. Berapa kecepatan pertumbuhan dari organ dan tubuh anak domba tersebut per hari? Berapa koefisien alometriknya?
7. Apa yang dimaksud dengan pertumbuhan kompensatoris? Jelaskan!
8. Jelaskan mekanisme kontrol endokrin dalam mengatur proses pertumbuhan!



# BAB XIII

## THERMOFISIOLOGI

### A. Pendahuluan

Thermofisiologi merupakan istilah yang menjelaskan berbagai aspek perubahan energi dalam tubuh. Seekor hewan dalam melangsungkan hidupnya untuk memproduksi energi hasil metabolisme zat-zat makanan dalam tubuh dan digunakan untuk keperluan hidup pokok, produksi, dan pertumbuhan. Perubahan energi dalam tubuh merupakan hasil perbedaan antara pertambahan energi/produksi energi dengan kehilangan energi/pemakaian energi dan besarnya perubahan ini dipengaruhi oleh; aktivitas hewan, ukuran tubuh, temperatur internal tubuh, karakteristik fisik dan lingkungan.

Temperatur lingkungan membatasi penyebaran kehidupan organisme/hewan dan merupakan hal yang sangat penting dalam menentukan aktivitas organisme/hewan. Kisaran temperatur pada permukaan bumi adalah lebih besar dibandingkan dengan kisaran temperatur di dalam perairan. Sebagai contoh, kisaran temperatur udara berkisar dari  $-70^{\circ}\text{C}$  pada daerah kutub sampai  $+85^{\circ}\text{C}$  pada gurun pasir yang panas, sedangkan temperatur air berkisar antara  $-1,82^{\circ}\text{C}$  di laut kutub utara dan selatan dibandingkan dengan  $+30^{\circ}\text{C}$  pada permukaan air daerah tropis. Pada umumnya aktivitas hidup hewan terjadi pada kisaran temperatur  $-0^{\circ}\text{C}$  sampai  $40^{\circ}\text{C}$ , kebanyakan hewan hidup dalam kisaran yang lebih sempit lagi. Beberapa hewan dapat menjadi dorman (tidur) dan hidup baik dalam keadaan tidak aktif di bawah  $0^{\circ}\text{C}$  atau di atas  $40^{\circ}\text{C}$ . Sebagian lagi hewan dapat hidup dalam keadaan membeku dan sebagian lagi dapat hidup pada sumber air panas dengan suhu  $+70^{\circ}\text{C}$ . Kehidupan bakteri telah dilaporkan dari laut

dalam pada suhu +250°C di bawah tekanan tetapi pertumbuhan berhenti di atas 150°C.

Terdapat keragaman dan fluktuasi temperatur di habitat tempat hewan hidup menyebabkan adanya perbedaan proses fisiologis (metabolisme energi dan sistem endokrin) antara hewan untuk mengantisipasi perubahan-perubahan temperaur lingkungan dan perbedaan dalam pengelompok hewan berdasarkan thermofisiologis.

## B. Pengertian-pengertian

Istilah-istilah yang dikenal sebelum perkembangan ilmu fisiologi adalah kelompok hewan bergolongan darah dingin dan kelompok bergolongan darah panas. Istilah ini sudah lama ditinggalkan karena terlalu subjektif dan tidak didasarkan pada pembuktian ilmiah.

Klasifikasi lain berdasarkan perubahan temperatur tubuh individu hewan, jika hewan tersebut ditempatkan pada temperatur lingkungan yang berbeda dengan temperatur tubuhnya. Kelompok pertama disebut golongan hewan **homeotherme**, yaitu hewan yang temperatur tubuhnya relatif konstan pada berbagai variasi temperatur lingkungan, sedangkan golongan kedua adalah hewan **poikilotherme**, yaitu hewan yang temperatur tubuhnya dipengaruhi oleh lingkungan. Kedua definisi ini sekarang sudah kurang digunakan karena kedua istilah ini tidak menjelaskan mekanisme pertukaran energi kalori. Temperatur tubuh suatu hewan adalah hasil resultant dari penambahan dan pertukaran panas. Para pakar fisiologi sekarang lebih suka membedakan kelompok hewan dengan istilah **ekstoterm** dan **endoterm**.

Sebagian besar ternak memperlihatkan metabolisme sedikit aktif (hewan-hewan **bradymetabole** yang menghasilkan sedikit energi kalori) dan suatu konduksi panas tinggi (isolasinya jelek terhadap pengaruh lingkungannya) sehingga temperatur tubuhnya bergantung sepenuhnya

kepada panas yang berasal dari lingkungannya. Kelompok ternak ini disebut **ekstoterm**. Sebagian besar spesies hewan akuatik termasuk kategori ini.

Pada kelompok spesies lainnya (hewan **tachymetabole**), produksi panas oleh metabolisme (terutama oksidasi) adalah tinggi dan isolasi panas cukup untuk temperatur tubuh individu bergantung kepada produksi panas yang dihasilkan tubuhnya sendiri. Kelompok hewan ini disebut **endoterm**. Burung dan mamalia sebagian besar memelihara panas untuk mempertahankan temperatur tubuh, termasuk endoterm. Bila endoterm tidak permanen, hewan kelompok ini disebut **heteroterm**. Beberapa hewan ekstoterm seperti reptil dan serangga yang sedang berjemur, suhu tubuhnya meningkat oleh panas eksternal dan sebagian lagi seperti ikan yang sedang berenang dan serangga terbang menggunakan produksi panas internal.

## C. Temperatur dan Proses Fisiologis

Temperatur merupakan salah satu ukuran dari agitasi molekul yang mengontrol tingkat reaksi molekuler dan salah satu faktor yang membatasi pelepasan energi serta pertumbuhan organisme.

### 1. Kecepatan Reaksi dan Q<sub>10</sub>

Kecepatan reaksi kimia dalam tubuh dipengaruhi oleh temperature. Bila temperatur dari suatu sistem kimia meningkat, kecepatan reaksi akan meningkat juga. Untuk membandingkan pengaruh temperatur terhadap berbagai sistem, suatu koefisien termik telah didefinisikan dan disebut "Q<sub>10</sub>". Q<sub>10</sub> adalah suatu faktor di mana kecepatan reaksi ditingkatkan ketika temperatur naik 10°C .

$$Q_{10} = \frac{V_2}{V_1}$$

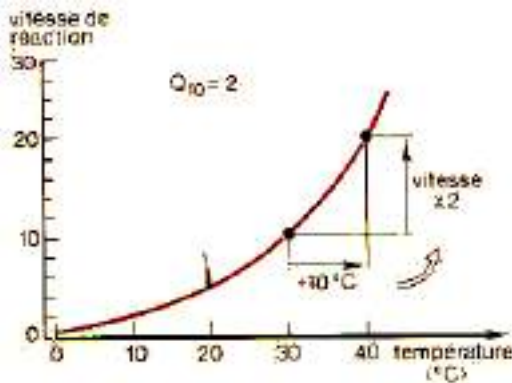
$V_2$  = kecepatan reaksi pada temperatur  $t_2 = (t_1+10)$  oC.

$V_1$  = kecepatan reaksi pada temperatur  $t_1$ ·C.

Dari rumus diatas maka diperoleh:

$$V_2 = V_1 Q_{10} \frac{(T_2 - T_1)}{10}$$

Sebagian besar reaksi metabolisme mempunyai nilai  $Q_{10}$  yang berkisar antara 2–3. Koefisien ini bervariasi dengan temperatur, tetapi pada nilai-nilai temperatur saat reaksi biologis terjadi, variasinya sangat rendah.  $Q_{10}$  dari beberapa reaksi biologis tidak konstan melebihi kisaran temperatur normal dan  $Q_{10}$  lebih besar pada kisaran temperatur rendah dibandingkan dengan kisaran tinggi. Oleh karena itu, kisaran untuk  $Q_{10}$  yang dihitung harus spesifik. Sifat-sifat fisik suatu larutan kurang dipengaruhi oleh perubahan suhu dibandingkan dengan reaksi yang dikatalisir.



Gambar 13.1 Hubungan antara kecepatan reaksi dan temperatur pada reaksi-reaksi biologis yang mempunyai nilai  $Q_{10} = 2$  ; Sumber: Rieutort M (1986)

Reaksi eksponensial (Gambar 13.1) berasal dari perlunya termoregulasi dari sejumlah hewan, ketergantungan yang tinggi dari

metabolisme terhadap temperatur eksternal didapatkan dari ternak dalam situasi di mana kebutuhan zat-zat makanan sangat meningkat. Sebaliknya, perlambatan metabolisme dapat menyebabkan kecepatan reaksi dan tidak lagi bergantung pada temperatur, misalnya pada kondisi daerah dingin.

Peningkatan kritis suatu energi dari aktivitas suatu reaksi dinyatakan oleh konstanta Arrhenius  $\mu$  atau  $E_a$

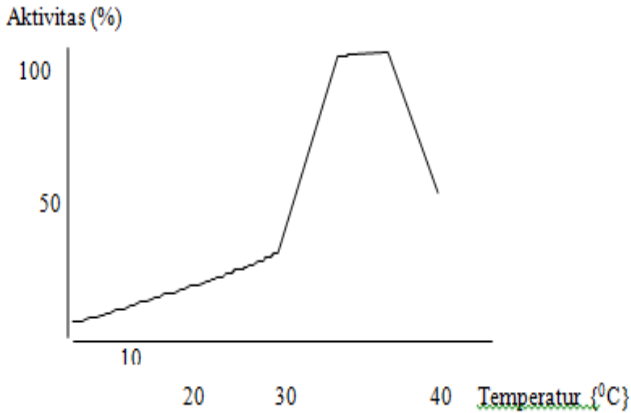
$$\mu = RT \ln \frac{V_2}{V_1} (T_2 - T_1)$$

di mana  $V_2$  dan  $V_1$  adalah kecepatan konstan (proporsional terhadap kecepatan yang diukur) pada temperatur absolut  $T_1$  dan  $T_2$  dan  $R$  adalah konstanta gas universal (1,98 cal/mol).

Jika logaritma sebuah kecepatan diplotkan terhadap temperatur absolut, umumnya proses biologis memberikan sebuah garis lurus dengan tingkat kemiringan adalah  $-\mu/2,3RR$  atau  $-\mu/4,6$  m. Hubungan ini membawa kesimpulan bahwa jumlah molekul yang melebihi energi kritis akan *double* untuk peningkatan temperatur  $10^\circ\text{C}$  meskipun ada perubahan kinetik yang kurang.

## 2. Pengaruh Temperatur terhadap Aktivitas Enzimatik

Kecepatan suatu organisme mengkonsumsi energi kimia bervariasi berdasarkan temperaturnya. Berbagai reaksi metabolis akibatnya dipengaruhi oleh temperatur di mana reaksi itu berjalan. Temperatur optimal dari fungsi suatu enzim berinteraksi dengan efektivitas yang lebih besar dengan substrat pada satu konsentrasi fisiologis (Gambar 13.2). Sifat-sifat kinetik dari enzim peka terhadap temperatur, kerapuhan ikatan yang lemah (ikatan hidrogen, interaksi *hydrophobe*, kekuatan Van der Waals) yang menstabilisasikan struktur tridimensionalnya.



Gambar 13.2 Aktivitas enzim berdasarkan temperatur terlihat bahwa pada temperatur 37–40 mencapai aktivitas yang maksimum

Pengaruh-pengaruh variasi temperatur juga peka terhadap berbagai kemungkinan penyesuaian aktivitas enzimatik (interkonversi antara bentuk aktif dan tidak aktif, interaksi alosterik, variasi kecepatan sintesis)

Intensitas penggunaan energi oleh suatu organisme tidak hanya bergantung pada temperatur internal, tetapi juga kesiediaan substrat dan ketika penyediaan pakan menjadi tidak cukup, salah satu kemungkinan adaptasi adalah penurunan temperatur tubuh yang membatasi aktivitas enzimatik dan penggunaan substrat.

### 3. Termogenesis dan Termolisis

Keseluruhan proses-proses yang membuat hewan mendapatkan energi panas terbentuk disebut termogenesis. Pada hewan endoterm, termogenesis bersifat kimiawi (metabolisme). Termolisis adalah pengelompokan proses-proses pengurangan panas dari dalam tubuh (misalnya konduksi, konveksi, radiasi, dan evaporasi). Hewan-hewan yang memperlihatkan suatu termoregulasi baik (seperti unggas dan mamalia) mempunyai mekanisme yang dapat menyesuaikan termogenesis dan termolisis pada kondisi suatu lingkungan.

#### **4. Pertukaran Panas antara Organisme dan Lingkungannya**

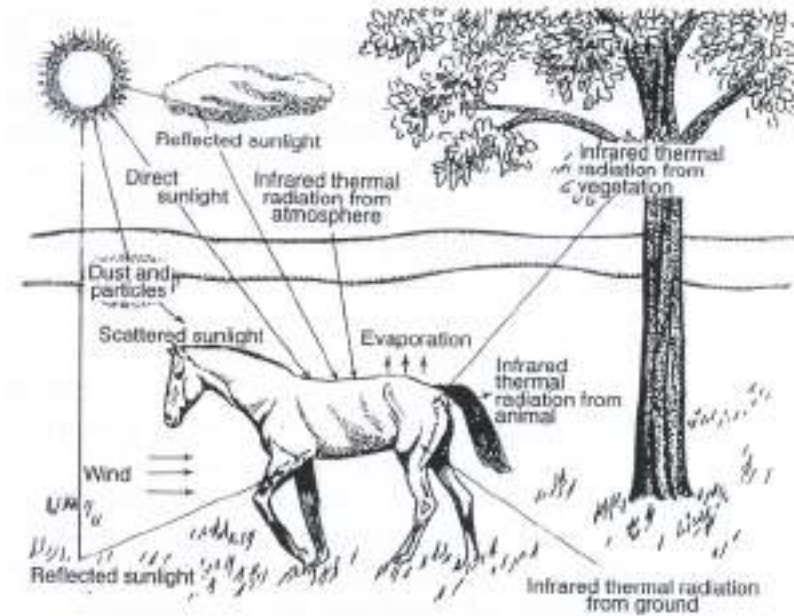
Seperti sifat-sifat fisik lainnya, panas berpindah berdasarkan perbedaan konsentrasi daerah, berpindah dari daerah panas ke daerah dingin. Beberapa cara perpindahan panas dapat terjadi antara dua objek yang berbeda temperaturnya (Gambar 13.3).

Perpindahan panas dapat berlangsung secara radiasi, konveksi, konduksi (ketiga proses disebut perpindahan panas *sensible*/non-evaporasi) dan evaporasi (perpindahan panas *insensible*). Pengaliran panas dari permukaan tubuh ke lingkungan sekitarnya dapat berlangsung dengan cara: (1) konduksi panas melewati rambut/bulu penutup dan lapisan tipis yang melubungi tubuh (*boundary layer*), (2) konveksi panas melewati "*boundary layer*" terjadi karena adanya pergerakan udara atau angin, dan (3) radiasi panas dari ujung-ujung rambut/bulu melewati *boundary layer* dan 4 evaporasi air.

#### **5. Radiasi**

Radiasi merupakan perpindahan panas dari satu benda yang suhunya tinggi ke benda lain yang suhunya lebih rendah, tanpa kedua benda tersebut bersentuhan. Pertukaran energi kalori oleh radiasi dilakukan melalui emisi atau penerimaan radiasi elektromagnetik yang panjang gelombangnya berkisar antara 0,35  $\mu\text{m}$  (ultraviolet) dan 10  $\mu\text{m}$  (infra merah), termasuk gelombang panjang yang dapat dilihat (0,4–0,75  $\mu\text{m}$ ). Tubuh memancarkan radiasi panas dengan panjang gelombang antara 5–20 mm, sehingga pada kisaran spektrum tersebut permukaan tubuh merupakan suatu "pemancar panas" (radiator), sekaligus penyerap panas (absorber) yang baik. Jumlah energi yang dipertukarkan melalui radiasi dari satu tubuh ke tubuh lainnya merupakan fungsi yang kompleks dari sifat-sifat fisik dua objek. Luas permukaan yang ditukar dan perbedaan temperatur antara kedua objek akan memengaruhi besar kecilnya proses radiasi. Tubuh hewan meradiasikan panas ke benda-benda di sekitarnya yang memiliki suhu lebih rendah, sebaliknya

dapat menerima panas dari benda yang lebih tinggi suhunya. Dalam proses termofisiologi, pertukaran energi melalui radiasi merupakan variasi besaran yang relatif sedang.



Gambar 13.3 Skema pertukaran energi antara hewan endoterm (burung) atau organisme ekoterm (telur) dan lingkungannya; Sumber: Reece (2004)

## 6. Konduksi dan Konveksi

Pada jarak yang pendek, panas dapat bertukar melalui konduksi:

- antara dua objek yang temperaturnya berbeda dengan syarat kontak fisik terjadi; dan
- antara daerah panas dan daerah dingin pada objek yang sama.

Konduksi terjadi melalui pertukaran sederhana panas dari satu molekul ke molekul lainnya. Sifat-sifat fisik lingkungan (di konduktivitas

termik), perbedaan temperatur dan jarak konduksi menentukan pentingnya bentuk perpindahan energi. Pertukaran termik juga lebih cepat dalam air daripada dalam udara (20 kali), selanjutnya semakin besar kepadatan molekul semakin peka mendapatkan energi termik melalui konduksi dibandingkan dengan molekul yang kurang padat.

Bila terdapat aliran udara atau air sekitar objek yang pertukaran panasnya melalui konduksi dan dilanjutkan adanya perbedaan kepadatan aliran ini memperlihatkan fungsi dari temperaturnya (udara panas atau air panas kurang padat dari udara atau air dingin) atau selanjutnya mengikuti turbulensi (angin, ombak/arus air, perpindahan objek). Hal ini akan menyebabkan adanya pertukaran panas lain yang disebut dengan pertukaran melalui **konveksi**, yaitu mempercepat proses pertukaran panas di sekeliling objek (Gambar 13.3). Kita akan mendinginkan lebih cepat dalam aliran udara yang bergerak daripada udara tenang pada temperatur sama).

Jadi, konveksi merupakan perpindahan panas melalui pengaliran molekul-molekul udara atau cairan bergerak dari benda yang memiliki suhu tinggi ke benda yang bersuhu lebih rendah. Sementara konduksi merupakan perpindahan panas yang berlangsung antara benda-benda karena adanya kontak satu sama lain, tidak bergantung apakah benda tersebut padat, cairan, ataupun gas.

## **7. Evaporasi**

Pertukaran panas antara dua tubuh dapat juga terjadi dengan adanya perubahan kondisi air. Lewatnya air dari bentuk cairan menjadi bentuk uap memerlukan suatu tambahan energy. Pada waktu air meninggalkan tubuh suatu organisme yang temperaturnya 35°C, dalam bentuk gas (uap air dikeluarkan ketika ekspirasi atau melalui keringat) organisme tersebut akan kehilangan energi sebesar 2430 kJ/ liter.

Energi panas yang dihasilkan dan energi panas yang dipakai dalam tubuh akan selalu konstan dan ada dalam keseimbangan yang dinamis. Keseimbangan dapat digambarkan dengan persamaan berikut:

$$HT - W = \pm HC \pm HR + HE \pm WS$$

di mana:

HT = Produksi panas metabolisme

W = Energi panas untuk kerja eksternal

HC = Pertukaran panas melalui konduksi dan konveksi

HR = Pertukaran panas melalui radiasi

HE = Kehilangan panas melalui evaporasi

WS = Panas yang disimpan dalam tubuh

### **8. Konduktan Termik**

Sulit menentukan pada ternak nilai berbagai parameter yang memperhitungkan pertukaran panas yang berhubungan dengan konduksi, radiasi, atau konveksi. Pada semua kasus, perbedaan temperatur antara organisme dan lingkungannya merupakan salah satu parameter yang dapat diukur dan suatu persamaan sederhana yang dapat menggambarkan pertukaran kalori sebagai berikut:

$$\text{Panas bersih yang ditukar} = C (T1 - T2).$$

di mana: T1 = Temperatur objek yang lebih panas

T2 = Temperatur objek yang lebih dingin

C = Konduktan termik

Konduktan termik adalah suatu nilai yang mengombinasikan karakteristik fisik ternak dan lingkungannya. Konduktan termik menunjukkan kemudahan perpindahan panas pada suatu benda. Sebagai contoh, koefisien konduktivitas termik lempeng perak: 0,97 cal/detik/cm/°C, karet: 0004, air: 0014, udara: 0,000057, bulu hewan: 0,000091, dan jaringan tubuh: 0,0011. Semakin tinggi konduktan

termik, ternak semakin menukar panasnya (bertambah atau kehilangan) dengan lingkungannya dan sebaliknya. Modifikasi konduktan termik kulit (vasomotris, ereksi bulu kulit) adalah salah satu mekanisme penyesuaian di mana termoregulator dapat menyesuaikan dengan cepat.

Untuk menghitung laju perpindahan panas dengan cara konduksi (q) dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$Q = kA \times ((T_2 - T_1)/L)$$

di mana:

K = Koefisien konduktan termik, A = luas area perpindahan panas, T<sub>2</sub> dan T<sub>1</sub> = suhu pada dua titik yang berjarak L

### **9. Termoregulasi pada Hewan Endoterm**

Seperti yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya, pada dasarnya hewan menurut istilah thermofisiologi dapat digolongkan ke dalam dua golongan besar, yaitu hewan ekoterm dan endoterm. Meskipun pada umumnya hewan yang didomestikasikan atau ditenakkan pada umumnya hewan endoterm, tetapi sebagai bahan pelajaran perlu juga mengetahui sifat-sifat hewan ekoterm dan bagaimana proses termoregulasinya. Untuk itu sebelum membahas karakteristik dan proses termoregulasi pada hewan endoterm akan dibicarakan terlebih dahulu hal-hal yang berhubungan pada hewan ekoterm.

Terdapat dua cara yang umum, di mana panas hewan endoterm dan ekoterm dikontrol yaitu pengaturan secara tingkah laku dan sirkulasi metabolis. Banyak hewan mengatur tingkah lakunya dengan memilih temperatur yang nyaman. Pengaturan tingkah laku pada suhu *ciliata*, berbagai invertebrate, dan ikan terdiri atas koordinasi berkesinambungan sensor, lokomotor, dan aksi-aksi terpadu. Kontrol metabolis baik pada endoterm maupun ekoterm mungkin dilakukan

oleh reseptor dan integrator (neural dan hormonal) sebagai kontrol tingkah laku atau kontrol pada berbagai tingkat seluler. Sistem efektor metabolis memodulasi produksi panas dan mengontrol kehilangan panas oleh sirkulasi, insulasi, dan evaporasi.

### 10. Pengaturan Panas (Termoregulasi) pada Hewan Ekstoterm

Pada ekstoterm, temperatur tubuh ditentukan oleh karakteristik fisik lingkungan. Jadi tingkah lakunya adalah salah satu faktor utama untuk memelihara temperatur tubuh secara tetap.

#### 10.1 Tingkah Laku dan Temperatur yang Disukai

Di laboratorium berbagai hewan eksoterm yang menerima berbagai perlakuan temperatur lingkungannya, temperatur tubuhnya hanya mengikuti secara pasif dan akibat metabolisme energi kurang intensif. Hewan yang sama, ketika ditempatkan dalam lingkungan yang diinginkan akan memilih tempat hidupnya pada daerah di mana temperaturnya menjamin pemeliharaan temperatur tubuh dan pertumbuhannya secara optimal. Beberapa contoh hewan ekstoterm yang mempunyai temperatur disukai dipresentasikan pada Tabel 13.1.

Tabel 13.1 Beberapa temperatur disukai hewan ekstoterm yang hidup di air atau di darat

H e w a n	Temperatur Disukai
Ikan salmon	22 °C
Ikan saumon	18 °C
Crapaud Bufo Boreas	27 °C
Alligator (buaya)	32-35 °C
Iguana	38 °C
Lezard Anolis sp	30- 33 °C
Larva lalat rumah	30- 37 °C

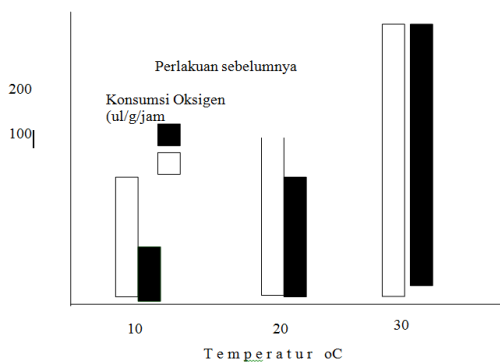
Sumber: Hainsworth (1981)

## 10.2 Fenomena Adaptasi

Sejumlah ekoterm yang kurang bergerak atau hanya lewat pada lingkungan di mana temperatur tidak memperlihatkan variasi lokal yang berarti (contohnya pada lingkungan akuatik), hanya satu kemungkinan untuk beradaptasi adalah modifikasi intensitas metabolisme ketika temperatur lingkungan berubah (menurun atau meningkat).

Berbagai contoh adaptasi fisiologis pada berbagai temperatur yang disukai selama periode lama telah lama dikenal pada hewan ekoterm. Sebagai contoh pada katak leopard (*Rana pipiens*) yang mempunyai metabolisme sangat berbeda pada temperatur tertentu berdasarkan dia tinggal sebelumnya pada 25°C atau 5°C (Gambar 13.4). Mekanisme yang terjadi pada fenomena adaptasi kurang diketahui tetapi orang menganggap adanya modifikasi sifat-sifat enzim.

- Variasi konsentrasi.
- Konfigurasi sebagian yang dimodifikasi merupakan hasil perubahan pH yang berhubungan dengan temperatur.
- Sintesis isozim: enzim dimodifikasi mengikuti aktivitas gen berbeda.



Gambar 13.4 Konsumsi oksigen pada katak di berbagai suhu yang sebelumnya hidup pada habitat dengan suhu 5°C dan 25°C

### 10.3 Kontrol Pemilihan Temperatur Optimum

Regulasi temperatur pada daerah hipotalamus memengaruhi tingkah laku ekoterm nontermokonfomer (artinya tidak beradaptasi pada sembarang temperatur eksternal). Untuk mengetahui pusat pengaturan termik kita harus mencari lokalisasi susunan saraf pusat yang berhubungan dengan perintah motris (pergerakan), integrasi parameter termik lingkungan. Pada berbagai reptil, temperatur hipotalamus anterior yang menentukan tingkah laku termoregulator (perpindahan menuju daerah yang lebih panas/lebih dingin). Hal ini dapat diperlihatkan oleh berbagai penelitian tentang pemanasan kembali dan pendinginan hipotalamus yang dilokalisasi.

## 11. Endoterm dan Termoregulasi

Pada hewan ini, intensitas metabolisme oksidatif sangat aktif dan sangat berpengaruh terhadap penambahan panas (termogenesis kimia).

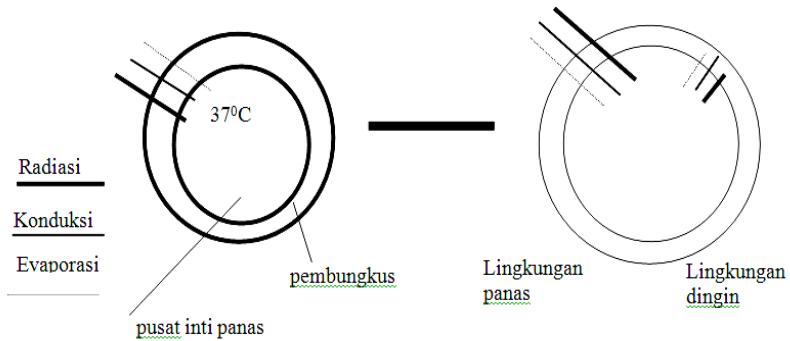
### 11.1 Karakteristik Umum Hewan Endoterm

#### A. Pusat Inti Panas dan Pembungkus

Temperatur tubuh endoterm tidak homogen. Jaringan yang menghasilkan panas (pada vertebrata superior: jantung, otak, hati, cadangan lemak, otot kerangka yang sedang aktif) adalah lebih panas dan mengandung organ yang disebut *Pusat Inti*. Bagian pusat inti ini terisolir dari panas lingkungannya oleh suatu pembungkus yang dibentuk oleh suatu membran atau jaringan di bawah kulit (Gambar 13.5).

Pusat-pusat inti panas dalam tubuh akan mengecil pada waktu temperatur lingkungan dingin, sebaliknya akan membesar pada waktu temperatur panas. Kita akan menemukan panas hilang (*volant thermique*) yang diwakili oleh sejumlah panas yang tersedia pada suatu saat dalam suatu organisme endoterm relatif rendah dibandingkan

dengan pertukaran harian dengan eksterior jika kita menilainya dengan kecepatan pendinginan yang diamati pada *post mortem* sesudah metabolisme berhenti.



Gambar 13.5 Skema keragaman ketebalan pembungkus yang melindungi permukaan kulit (pembungkus/tegumen) pada hewan endoterm

b. Nilai Rata-rata Temperatur Tubuh

Temperatur tubuh yang terdapat di berbagai hewan endoterm tanpa modifikasi temperatur lingkungan eksterior dipresentasikan pada Tabel 13.2. Temperatur tersebut adalah nilai rata-rata, tetapi variasi antara hewan tersebut dapat terjadi. Temperatur tubuh mamalia nonhibernan bervariasi dengan bioritmik, kondisi nutrisi, aktivitas otot, siklus seksual.

Tabel 13.2 Temperatur internal beberapa hewan endoterm

Hewan	Temperatur (oC)
Torak kupu-kupu yang sedang terbang	38 - 43
Ikan Tuna (otot)	18 - 23
Ular Python mengerami telurnya	19 - 34
Burung	39 - 42
Mamalia tanpa placenta	34 - 36
Mamalia dengan placenta	36 - 39
Domba gunung	37,9-39,8
Kambing	37 - 40

Sumber: FR Hainsworth (1981)

### 11.2 Temperatur Eksterior Sesuai dengan Termoregulasi

Penggunaan energi dalam pengaturan panas berbeda menurut spesies, tetapi proses-proses termoregulator hampir sama pada semua hewan endoterm. Gambar 13.6 memperlihatkan kurva karakteristik penggunaan energi yang berkaitan dengan termoregulasi suatu hewan endoterm pada berbagai temperatur lingkungan eksterior. Ketika temperatur lingkungan di bawah temperatur kritis inferior, termogenesis meningkat untuk mengganti peningkatan termolisis.

$$\text{Termogenesis} = \text{Termolisis} = C (T_1 - T_2) + E_{H_2O} \text{ (metabolisme)}$$

di mana:

C = konduktans termiks

T1 = temperatur tubuh

T2 = temperatur lingkungan

E<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = panas hilang karena evaporasi air

Hal yang sama ketika temperatur kritis superior dilewati, organisme berjuang melawan *hyperthermi* dengan mengeluarkan energi (evaporisasi air sebagai contoh). Sudut kemiringan ( $\alpha$ ) kurva menggambarkan peningkatan termogenesis dengan penurunan temperatur serendah mungkin (sudut  $\alpha$  lebih sempit) di mana ternak mempunyai isolasi termik yang baik.

### 11.3 Respons Termoregulator terhadap Lingkungan Dingin

Pada lingkungan dingin, masalah yang dihadapi endoterm mengenai pembatasan kehilangan energi karena panas berasal dari pusat inti dan cenderung bergerak ke lingkungan (radiasi, konduksi, konveksi, dan evaporasi). Persamaan sederhana yang menggambarkan keseimbangan termik makhluk hidup dapat menganalisis faktor-faktor adaptasi endoterm terhadap berbagai variasi temperatur lingkungan:

Bila organisme sedang istirahat, termolisis dapat menurun dengan mengurangi serendah mungkin setiap nilai C, ( $T_1-T_2$ ), atau  $E_{H_2O}$ . Bila pembatasan kehilangan panas adalah maksimal, hewan menyesuaikan metabolismenya pada tingkat lebih tinggi dan sedikit menghasilkan panas.

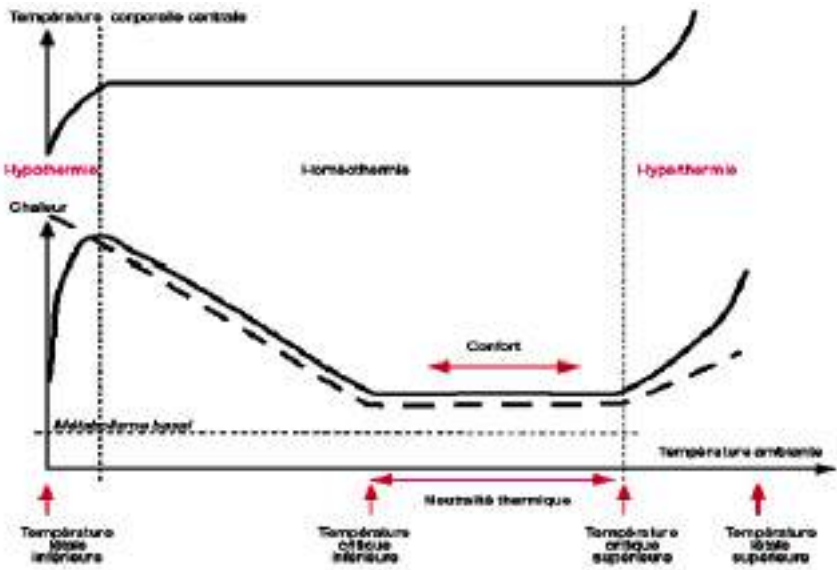
Beberapa cara hewan endoterm dalam mengantisipasi pengaruh cekaman dingin antara lain sebagai berikut.

- *Pengurangan Gradien Termik ( $T_1-T_2$ )*

Dua cara untuk menurunkan perbedaan panas antara hewan dan lingkungannya.

1. Mengurangi temperatur tubuh ( $T_1$ ) bila temperatur eksterior ( $T_2$ ) turun, hewan masuk hibernasi. Adaptasi ini sering diamati bila ketersediaan makanan yang berenergi tidak cukup menjamin termogenesis.

2. Meningkatkan temperatur lingkungan melalui modifikasi lingkungan misalnya mencari temperatur lingkungan yang lebih panas (T2).



Gambar 13.6 Karakteristik penggunaan energi yang berkaitan dengan thermoregulasi hewan endoterm pada berbagai temperatur lingkungan

- *Penurunan Konduktan Termik (C)*

Konduktan termik menurun jika isolasi meningkat, hal ini ditempuh dengan dua cara.

1. Respons sementara: dilakukan oleh aktivasi sistem saraf simpatik, misalnya beberapa hal berikut.

- \* Ereksi bulu yang dapat mempersempit volume udara pada permukaan kulit dan memperlambat pertukaran panas oleh konduksi dan konveksi.

- \* Vasokonstriksi peripherik, pembungkus sel tubuh kurang dialiri darah dan mengeluarkan sedikit panas ke lingkungan.
- \* Respons tingkah laku: pengurangan permukaan tubuh (hewan mengkerut), pengelompokan individu-individu (misalnya burung pinguin).
- \* Adaptasi permanen seperti permukaan kulit berbulu lebat, bulu-bulu pada burung bertambah lebat, jaringan lemak di bawah kulit menumpuk (misal mamalia laut, pinguin), pembatasan pengeluaran panas melalui adanya aliran darah bolak-balik.

- *Penurunan Panas Melalui Evaporasi*

Hewan darat kehilangan sejumlah air pada waktu ekspirasi, terutama hewan-hewan yang tidak mempunyai kemudahan anatomi untuk mendinginkan udara (semakin banyak udara diekspirasi pada temperatur tinggi, semakin kaya akan uap air). Lubang hidung sangat berkembang dan merupakan salah satu pendinginan udara yang efektif akibat penurunan kandungan uap air pada berbagai mamalia dan unggas.

- *Peningkatan Termogenesis*

Ketika dalam keadaan dingin, hewan endoterm berusaha melakukan peningkatan metabolisme energinya melalui berbagai mekanisme.

1. Peningkatan produksi panas segera didapatkan oleh gerakan spontan, kemudian melalui *aksi gemetar* (kontraksi mendadak otot permukaan dengan sedikit gerakan mekanik, tetapi dapat melepaskan panas yang cukup banyak).
2. Intervensi lebih lambat dari termoregulator tanpa aksi gemetar yang melibatkan oksidasi lemak oleh otot-otot, terutama cadangan jaringan lemak.

Noradrenalin yang dilepaskan oleh ujung saraf simpatik, ketika dalam keadaan dingin terlibat dalam rangsangan termogenesis tanpa menggigil, terutama melalui pengaruh terhadap  $\beta$  reseptor. Beberapa hormon seperti hormon tiroid yang merangsang metabolisme pada semua jaringan juga mempunyai penurunan dalam adaptasi terhadap dingin. Hormon tiroid sangat perlu untuk respons jaringan terhadap rangsangan tipe  $\beta$  reseptor oleh catecholamin. Setelah beradaptasi, konsumsi makan hewan keadaan dingin meningkat.

#### 11. 4 Respons Termoregulator terhadap Lingkungan Panas

Bila hewan endoterm ditempatkan pada lingkungan panas termogenesis menurun secara maksimum (istirahat, penurunan nafsu makan), sebaliknya termolisis meningkat. Untuk mengatasi cekaman panas, hewan endoterm akan melakukan aktivitas berikut.

##### a. Mencari Lingkungan yang Lebih Dingin (Respons Tingkah Laku)

- \* Eksposisi selebar mungkin permukaan kulit
- \* Vasodilatasi kulit
- \* Mengurangi konsumsi makan
- \* Mengurangi aktivitas tiroid
- \* Menurunkan produksi panas
- \* Mengurangi ketebalan pelindung
- \* Evaporasi air melalui keringat, bernapas

Untuk mengetahui kemampuan termoregulasi untuk ternak pada daerah panas dapat diukur koefisien daya tahan panas melalui metode Iberian Heat Tolerance Test (Rhoud 1940 yang dikutip oleh McDowell *et al.* 1972).

- \* Untuk sapi dan Kerbau

$$DTP = 100 - 10 (TR - 101.0^{\circ}F)$$

DTP : Daya tahan panas (koefisien)

- 100 : Angka efisiensi sempurna pada 101.0°F  
TR : Temperatur tubuh rata-rata dari pengukuran jam 10 dan jam 15.00  
101.0°F : temperatur tubuh normal (= 37°C)  
10 : konstanta deviasi perubahan T rektal; dari T rektal normal menjadi rektal pada saat tes dilakukan

\* Untuk Kambing dan Domba

- DTP = 100 - 10 (Tf - TA)  
Tf = temperatur akhir  
TA = temperatur awal

1 Penelitian perbandingan DTP sapi betina dewasa antara sapi Bali dengan hasil persilangannya dengan *Bos taurus* telah dilakukan oleh Yusran *et al.* (1991). Temperatur udara pada saat sapi di bawah naungan adalah  $25 \pm 1,41^\circ\text{C}$  dan kelembapan udara  $73,33 \pm 3,07\%$ , sedangkan selama dijemur masing-masing adalah  $38,3 \pm 0,29^\circ\text{C}$  dan  $53,33 \pm 0,01\%$ . Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien daya tahan panas antara sapi Bali dan sapi persilangan (*Bos taurus* x Bali) tidak berbeda nyata ( $55,49 \pm 8,4$  vs  $54,65 \pm 20,74$ ).

#### 11.5 Adaptasi Lain Temoregulator

1. Demam disebabkan oleh suatu *substans pyretogen endogen*. Zat ini adalah *lympokin interleukine* yang disekresikan oleh leukosit setelah fagositosis mikroorganisme patogen mengikuti reaksi *hypersensitive* atau kelanjutan dari berbagai penyebab penyakit lain. Demam adalah peningkatan temperatur yang dikontrol dan besaran perubahan nilainya beberapa derajat di atas suhu tubuh normal.
2. Kerja otot, kerja otot intensif meningkatkan temperatur internal tubuh dengan cepat pada hewan yang tidak dapat menghilangkan kelebihan panas (seekor harimau leopard berhenti berlari bila temperatur tubuh mencapai  $40,5^\circ\text{C}$ ).

Pada beberapa spesies, otak merupakan tempat perlindungan dari peningkatan temperatur yang tinggi melalui adanya sistem peredaran darah lawan arus (bolak-balik). Darah vena yang berasal dari daerah hidung mempunyai temperatur lebih rendah beberapa derajat dari darah arteri dan menyebabkan pendinginan darah yang tiba oleh karotid internal (misalnya reptil).

## **D. Termoreseptor dan Pusat-pusat Integrasi**

### **1. Termoreseptor Kulit (*Periphery*)**

Eksteroreseptor-eksteroreseptor spesial untuk penerimaan rangsangan berbagai temperatur tersebar pada permukaan tubuh organisme. Reseptor ini mempunyai kepekaan terhadap panas dan dingin. Penyebaran sangat bervariasi bergantung pada spesies atau bagian organnya. Sebagian menjawab rangsangan dengan meningkatkan temperatur permukaan tubuh dan sebagian lainnya menurunkan temperatur permukaan tubuh.

#### **1.1 Pusat Termoreseptor**

Frekuensi muatan dari sejumlah neuron hipotalamus dipengaruhi oleh berbagai variasi temperatur yang diinduksi secara lokal. Neuron-neuron tersebut merupakan intero reseptor yang peka terhadap panas. Termoreseptor lainnya ditemukan dalam sumsum tulang torak atau tulang belakang dan penelitian lain mengungkapkan hal sama dalam rongga perut.

#### **1.2 Integrasi Termoregulator**

Sumsum tulang dapat memperlihatkan suatu tingkat integrasi tertentu, tetapi hipotalamus merupakan struktur utama dalam respons termoregulator. Sejumlah neuron hipotalamus memodifikasi frekuensi muatannya ketika variasi temperatur kulit dirangsang. Suatu sistem yang merupakan satu antisipasi dari respons-respons termoregulator sebelum perubahan seluruh temperatur pusat

Perusakan secara lokal hipotalamus anterior (bagian preoptik) mengganggu secara tetap pengaturan panas. Pemanasan kembali bagian hipotalamus yang sama menyebabkan reaksi termolisis (vasodilatasi kulit, salivasi, keringatan) pada temperatur kamar apa pun (meskipun pada temperatur dingin). Sebaliknya, pendinginan kembali menyebabkan suatu respons menuju ke peningkatan temperatur (vasokonstriksi, termogenesis dengan atau tanpa gemetar), meskipun dalam temperatur kamar yang panas. Pada waktu respons termoregulator terjadi, neuron-neuron hipotalamus mempunyai suatu aktivitas melalui cara gerakan tubuh seperti kejang otot, gemetar), dan saraf-saraf simpatik menginervasi medula-ginjal (sekresi catecholamine), cadangan lemak (termogenesis tanpa gemetar) atau pembuluh-pembuluh darah kulit (vasokonstriksi atau vasodilatasi).

## **RINGKASAN**

1. Pengertian taksonomi hewan menurut thermofisiologi didasarkan pada produksi energi hasil metabolisme dan isolasi pelindung tubuh terhadap lingkungannya. Hewan ekoterm adalah hewan yang menghasilkan sedikit energi kalori dan isolasi termik rendah, sedangkan hewan endoterm adalah hewan yang menghasilkan banyak panas hasil oksidasi metabolisme dan isolasi termiknya sangat baik.
2. Proses-proses fisiologis dalam tubuh hewan sangat dipengaruhi oleh temperatur tubuh dan lingkungan. Kecepatan reaksi kimia dalam tubuh akan meningkat secara ekponensial dengan bertambah naiknya temperatur. Kenaikkan temperatur juga berpengaruh terhadap aktivitas enzim yang terlibat pada berbagai reaksi metabolisme dalam tubuh.
3. Proses fisiologis dalam tubuh yang menghasilkan energi panas disebut termogenesis, sedangkan proses-proses yang dapat menghilangkan panas disebut termolisis.

4. Proses termoregulasi pada hewan endoterm melibatkan berbagai reseptor, terutama reseptor pada permukaan kulit, sumsum tulang belakang, dan hipotalamus. Reseptor pada permukaan kulit merupakan sensor yang mengantisipasi semua rangsangan dari lingkungan, kemudian informasi dari reseptor ini diproses di hipotalamus dan sebagai umpan balik dijawab dengan berbagai perintah yang mengoordinasikan neuron-neuron spesifik untuk memengaruhi berbagai target organ.
5. Pertukaran panas antara organisme dengan lingkungannya dapat melalui berbagai cara, antara lain radiasi, konduksi dan konveksi, serta evaporasi. Dengan adanya pertukaran panas, hewan berada dalam keseimbangan yang dinamis dalam penggunaan energi, baik energi untuk keperluan hidup pokok, produksi, dan energi yang dibuang untuk proses adaptasi.
6. Konduktan termik merupakan suatu besaran yang mengombinasikan karakteristik fisik hewan dengan lingkungan. Hewan yang mempunyai konduktan termik yang tinggi berarti mempunyai kemampuan tinggi dalam proses pertukaran panas dengan lingkungannya dan mempunyai isolasi tubuh yang kurang baik.
7. Meskipun temperatur tubuh hewan eksoterm ditentukan oleh temperatur lingkungan, tetapi beberapa spesies hewan ini mempunyai tingkah laku untuk tinggal pada temperatur yang disukai. Mekanisme adaptasi fisiologis hidup pada berbagai temperatur belum banyak diketahui, tetapi diduga ada kaitanya dengan aktivitas enzim. Kontinuitas pemeliharaan temperatur internal tubuh ditentukan oleh faktor tingkah laku.
8. Hewan endoterm mempunyai karakteristik dalam pengaturan panas tubuhnya dalam mengantisipasi perubahan temperatur lingkungan habitatnya. Pada jaringan hewan endoterm terdapat

pusat-pusat inti panas yang memproduksi panas internal tubuh dan pelindung yang melindungi pusat inti panas. Struktur demikian memungkinkan endoterm dapat mempertahankan dan memelihara suhu tubuhnya secara konstan.

9. Jika hewan endoterm ditempatkan pada zone homeothermie yang temperatur lingkungannya di bawah temperatur kritis inferior, proses termogenesis meningkat untuk mengimbangi peningkatan termolisis. Sebaliknya, bila temperatur kritis superior dilewati, hewan akan berusaha melawan hipertermik dengan mengeluarkan kelebihan energi.
10. Pada lingkungan dingin, hewan endoterm akan mencegah kehilangan energi dengan jalan menurunkan gradien termik, konduktan termik, dan kehilangan panas melalui evaporasi, serta meningkatkan proses termogenesis. Sebaliknya pada lingkungan panas, hewan endoterm akan menurunkan termogenesis dan meningkatkan termolisis. Respons hewan endoterm dalam mengantisipasi variasi temperatur pada lingkungan baru yaitu dengan aklimatisasi dan akhirnya beradaptasi.
11. Pada proses adaptasi, hewan endoterm akan mengalami perubahan temperatur tubuhnya (peningkatan temperatur) yang diekspresikan dalam bentuk demam atau kejang-kejang otot.

Latihan berikut ini sengaja disusun untuk memantapkan Anda terhadap materi yang baru dibicarakan. Kerjakanlah latihan berikut dengan sungguh-sungguh!

1. Mengapa penggolongan hewan endoterm dan ekoterm lebih baik dibandingkan dengan penggolongan hewan homeoterm dan poikiloterm?
2. Sebutkan masing-masing 5 contoh hewan endoterm dan hewan eksoterm!

3. Apa kegunaan praktis kita mengetahui kecepatan reaksi metabolisme dalam tubuh hewan dan nilai Q<sub>10</sub>?
4. Apa perbedaan pertukaran panas melalui konduksi dan konveksi?
5. Jelaskan proses pertukaran panas apakah yang terjadi bila seekor domba merino yang sedang merumput di padang penggembalaan!
6. Apa peranan proses evaporasi dalam pertukaran panas antara organisme dan lingkungannya?
7. Apa yang dimaksud dengan hewan ekoterm nonkonformer?
8. Apa ciri-ciri hewan endoterm?
9. Untuk mengatasi kekurangan susu sapi di Indonesia, pemerintah telah mengimpor sejumlah sapi perah dari Amerika yang berasal dari daerah beriklim subtropis. Jelaskan proses fisiologis apa yang terjadi pada tubuh sapi perah tersebut dalam mempertahankan hidup didaerah tropis! Tingkah laku apa yang mungkin terjadi pada sapi tersebut?
10. Hasil pengukuran temperatur tubuh pada dua bangsa sapi: sapi Onggole dan sapi persilangan Brahman x Charolais memperlihatkan bahwa rata-rata temperatur tubuh sapi Onggole 38,3°C dan sapi persilangan Brahman Cross 39,5°C. Menurut Anda, sapi mana yang lebih tahan panas?
11. Tindakan apa yang diperlukan untuk memelihara rusa asal daerah tropis yang dipelihara di kebun binatang di daerah subtropis?
12. Bila seekor ternak mengalami kepanasan di padang rumput akan mencari pohon pelindung untuk berteduh. Jelaskan bagaimana peranan termoreseptor dalam menghasilkan tingkah laku mencari perlindungan dari panas!
13. Apa akibatnya kalau seekor ternak yang dihyfophysektomi menerima cekaman panas?

# BAB XIV

## FISIOLOGI LAKTASI

Pertumbuhan kelenjar mammae dan laktasi mewakili fase yang penting dari siklus reproduksi mamalia. Susu memenuhi zat-zat nutrisi yang mutlak diperlukan dan mudah dicerna bagi anak hewan selama periode kritis setelah lahir. Pertumbuhan dan fungsi kelenjar mammae dikontrol oleh hormon yang sama dengan hormon yang mengontrol pertumbuhan dan fungsi uterus.

Pertumbuhan ekstensif kelenjar mammae biasanya tidak terjadi pada awal dan sebagian besar dilengkapi pada akhir dua per tiga kebuntingan. Setelah awal laktasi pada kelahiran, produksi susu meningkat dalam periode relatif singkat, kemudian secara bertahap menurun dan sistem lobuloalveolar mengalami involusi. Kejadian ini diulangi pada siklus berikutnya dari fertilisasi dan kebuntingan.

Hal ini telah dibuktikan bahwa hormon ovarium sangat bertanggung jawab terhadap pertumbuhan kelenjar mammae, estrogen merangsang pertumbuhan saluran kelenjar mammae, dan progesteron merangsang pertumbuhan alveolar. Namun demikian, perusakan kelenjar hipofisa mengurangi pengaruh hormon ovarium terhadap perkembangan kelenjar mammae. Hormon hipofisa sangat penting untuk pertumbuhan kelenjar mammae adalah prolaktin, tetapi kerja prolaktin ditingkatkan oleh hormon pertumbuhan, tiroksin, dan kortisol.

### A. Inisiasi Laktasi

Injeksi hormon prolaktin kepada seekor ternak yang mempunyai kelenjar mammae yang berkembang akan menyebabkan sekresi air

susu. Keseimbangan estrogen dan progesteron yang dipelihara plasenta selama kebuntingan menghambat pelepasan prolaktin. Setelah melahirkan, hambatan oleh hormon plasenta tidak ada dan prolaktin dapat memulai sekresi air susu. Retensi plasenta setelah melahirkan penyebab hambatan terhadap keluarnya air susu pada sapi perah. Penyusuan oleh anak dapat merangsang sekresi prolaktin dari kelenjar hipofisa.

Susu dibentuk dalam sel-sel epitel alveol kelenjar mammae. Bila penuh dengan susu, setiap alveolus diameternya adalah 0,2 mm. Alveol dikelompokkan bersama menjadi struktur yang disebut lobulus, dikelilingi oleh jaringan ikat. Setiap lobulus mempunyai volume 1 mm<sup>3</sup>. Lobulus-lobulus bergabung membentuk unit lebih besar disebut lobes yang juga dikelilingi oleh jaringan ikat.

Alveol mengeluarkan susu ke dalam saluran kecil. Saluran-saluran ini bergabung bersama dan membentuk saluran lebih besar yang biasanya terbuka kedalam suatu rongga (cisterne) di atas puting. Pembukaan dalam puting dikenal sebagai saluran sempit (*streak canal*). Pada sapi, struktur primer yang bertanggung jawab.

## **B. Endokrinologi Kebuntingan dan Laktasi**

Prolaktin merupakan hormon utama yang bertanggung jawab terhadap pertumbuhan kelenjar mammae dan induksi sekresi susu. Hormon glukokortikoid menginduksi pada keadaan transisi perubahan fase pertumbuhan menjadi fase sekresi. Tingkat progesteron tinggi pada saat kebuntingan mempunyai dampak negatif menghambat perubahan fase mamogenesis menjadi laktogenesis.

Tingkat hormonal dalam plasma pada waktu kebuntingan dan laktasi mengonfirmasikan hasil-hasil penelitian bahwa terdapat sedikit peningkatan level estrogen yang mendahului peningkatan cepat level prolaktin pada akhir fase kebuntingan, kemudian suatu peningkatan

mendadak sekresi hormon tersebut pada waktu kelahiran segera setelah hilangnya progesteron dalam darah dan sementara kortikosteroid fetal dan maternal dalam keadaan level tertinggi.

Hambatan sekresi prolaktin oleh progesteron ada hubungannya dengan fungsi progesteron terhadap peningkatan reseptor biosintesis ARN *mesenger* dalam sel epitel kelenjar mammae. Pada saat bunting, level progesteron sangat tinggi karena plasenta mendekresikan progesteron dalam jumlah yang banyak. Pada saat itu, hipofisa tidak dapat menyekresikan prolaktin dan pada tingkat kelenjar mammae, progesteron menghambat penggandaan reseptor prolaktin dan menghambat sintesis protein. Hambatan progesteron bekerja pada dua tingkat, yaitu pada tingkat hipofisa dan tingkat kelenjar mammae. Pada waktu lahir, progesteron menghilang bersama plasenta, dua hambatan terbuka, sekresi hipofisa (prolaktin), dan sintesis protein (air susu) dalam kelenjar mammae sangat intensif. (Gambar 14.1)

Plasenta ruminansia menyekresikan progesteron, estrogen, dan hormon polipeptida yang memainkan peranan penting dalam pertumbuhan fetus, kebuntingan, dan laktasi yang akan datang. Pada domba, hormon polipeptida telah diisolasi, dimurnikan dan disebut oPL (*ovin placenta lactogen*). Hormon ini disekresikan oleh sel-sel besar binukleus dari vilositas kotiledo fetus. Penghambatan secara percobaan dari sekresi prolaktin selama setengah dari umur kebuntingan, tidak dapat mencegah suatu mamogenesis normal karena adanya hormon laktogen plasenta.

Molekul hormon oPL adalah "bicephale" karena mempunyai aktivitas seperti hormon pertumbuhan. Hormon ini meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan tulang pada tikus hipofisektomi. Pada domba, telah terbukti terdapat korelasi positif antara pertumbuhan fetus dan konsentrasi plasmatik oPL. Hasil ini menerangkan bahwa

mengapa pertumbuhan fetus normal pada domba hipofisektomi. oPL disekresikan plasenta pada konsentrasi 200 kali lebih tinggi dibandingkan dengan hormon pertumbuhan yang disekresikan hipofisa (dengan aktivitas dan metabolisme ekuivalen). Evolusi dalam plasma hormon tersebut dapat diketahui dengan satu metode sederhana dan cepat pada kebuntingan 110 hari dengan ketepatan 99% dan suatu uji kembar menghasilkan ketepatan 90%. Studi biosintesis dan sekresi oPL memperjelas mekanisme pengaturan spesifik plasenta di mana akan melibatkan prolaktin dan zat dopaminergik.

### **C. Kondisi An-estrus (Tidak Berahi) pada Masa Laktasi**

Pada sebagian besar mamalia, suatu periode kurang lebih panjang masa istirahat seksual tanpa ovulasi setelah melahirkan. Jika ternak diperah, kembalinya siklus reproduksi terjadi setelah dilakukan penyapihan atau masa periode kering (berhenti pemerahan). Jika ternak menyusui, berahi tidak diperpanjang. Berdasarkan frekuensi menyusui, sebanding frekuensi pemerahan, peranan langsung prolaktin (yang disekresikan setiap rangsangan terhadap kelenjar mammae) pada lintasan hipotalamus-hipofisa dan ovarium dapat dirumuskan.

Rendahnya prolaktin yang didapatkan dari induksi oleh obat 2-Bromo ergocryptin selama periode perlakuan cukup lama pascamelahirkan. Menghasilkan suatu peningkatan frekuensi level FSH dan aktivitas ovarium (folikulogenesis) meningkat dibandingkan dengan ternak kontrol yang menyusui. Namun demikian, prolaktin tidak memodifikasi respons gonadatropin terhadap GnRH. Namun kontrol umpan balik positif oleh estrogen terhadap peningkatan level gonadatropin sangat menurun pada ternak menyusui atau hiperprolaktinemi buatan. Jadi, suatu modifikasi mengubah kepekaan lintasan hipotalamus dan hipofisa terhadap estrogen yang berasal dari anovulasi selama keadaan hiperprolaktinemi (Gambar 14.1).

# DAFTAR PUSTAKA

- Albert B, Bray D, Lewis J, Raff M, Robert K, Watson JD. 1986. *Biologie Moleculaire de La Cellule*. Traduction de l'Americain relaise et dirigee par M. Minkowski. Paris: Flamarion Medicine Sciences.
- Assenmacher I, Farner DS. 1978. Environmental endocrinology. *Proceed. Inter. Symp. Montpellier France*. 11–15 july 1977. New-York: Springer-Verlag.
- Benyamin, Ginting N. 1978. Gambaran darah sapi Frisian Holland di Bogor dan Pontianak. *Penyakit Hewan*. 16: 224–227.
- Benevent M. 1981. *Quelques aspects de la Croissance Chez Les Animaux Superieurs D'Elevage*. Ecole National Superieur Agronomiques . Montpellier.
- Bligh J, Cloudsley\_Thompson JL, MacDonald AG. 1976. Enviromental Physiology of Animals. *Blackwell Scientific Publications*. England: Osney Mead. Oxford.
- Bloom, Fawcet A. 1975. *Texbook of Histologi*. 10 Ed. USA: Philadelphia. W.B. Sunder.
- Burggren WW, Fritsche R. 1995. Cardiovascular measurement in animals in the milligram body mass range. *Brazil.J.Med Biol.Res*. 28:1291–1305.
- Copper JR, Bloom FE, Roch RH. 1996. *The Biochemical Basis of Neuropharmacology Tth*. (Ed). New York: Oxford University Press.
- Cronje PB, Boomker EA, Henning PH, Schultheiss W, Van der Walt JG. 2000. *RUMINANT PHYSIOLOGY: Digestion, Metabolism, Growth and Reprodusction*. CABI Publishing.
- Dauzier L. 1984. *Digestion et Utilisation des Aliments: Metabolismes Energitiques et Azote*. Montpellier: Ecole National Superieur Agronomique.

- Dworkin BR. 1993. *Learning and Physiological Regulation*. Chicago: University Chicago Press.
- Frandsen. 1993. *Anatomi dan Fisiologi Ternak*. Gajah Mada University Press.
- Garland Jr T, Carter PA. 1994 . Evolutionary physiology. *Annu. Rev. Physiol.* 56:579–521.
- Ginting N. 1986. Gambaran darah ruminansia di Pulau Jawa. *Penyakit Hewan.* 19:30–37.
- Grignon C, Davidian JC. 1985. *Metabolisme des Gucides at des Lipides*. Montpellier: Ecole National Superieur Agronomique.
- Guyton AC. 1991. *Textbook of Medical Physiology*. Eight h Edition. USA: W.B. Saunders Company. Philadelphia.
- , Hall JE. 2000. *Textbook of Medical Physiology*. USA: W.B. Saunders Company. Philadelphia.
- Hafez ESE, Hafez B. 2000. *Reproduction in Farm Animals*. 7th ed. USA: Lippincot William & Wilkins. Baltimore.
- Heisler N. 1995. Mechanisms of systemic regulation of respiration and circulation. *Adv.Comp. Environt. Physiol.* Vol 21.
- Hille B. 1992. *Ionic Channels of Exitable Membranes*. 2nd ed. Sunderland, Mass: Sinauer.
- Iskandar T. 1986. Gambaran darah sapi peranakan ongole yang dipotong di Rumah Potong Hewan Kotamadya Bogor. *Penyakit Hewan.* 18:82–85.
- Isnaeni W. 2006. *Fisiologi Hewan*. Yogyakarta: Kanisius.
- Jatman S. 1993. Gambaran darah sapi Bali di Karantina Wilayah V Ujung Pandang yang akan ditransportasi dari Sulawesi Selatan. *Buletin Ilmu Peternakan dan Perikanan.* 5: 45–51.
- Kandel ER, Schwartz JH, Jessel TM. 1991. *Principles of Neural Science*.

- 3rd ed. New York: Elsevier.
- Koolhaasa JM, Korteb SM, De Boera SF, Van Der Vegta BJ, Van Reenenb CG, Hopsterb H, De Jonga b IC, Ruisb MAW, Blokhuisb HJ. 1999. Coping styles in animals: current status in behavior and stress-physiology. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. 23 (1999) 925–935.
- Lucy MC, Pate JL, Smith MF, Spencer TE. 2010. *Reproduction in Domestic Ruminants VII*. Nottingham: Nottingham University Press.
- Maltepe E, Bakardjiev AI, Fisher SJ. 2010. The Placenta: transcriptional, epigenetic, and physiological integration during development. *Journal of Clinical Investigation*. Apr 2010; 120, 4;1016–1025.
- Mehta A, Hoffbrand V. 2005. *At Glance Hematologi*. Edisi Kedua. Surabaya: Erlangga Medical Series.
- Musawir A, Adriani L, Hermawan E, Kamil KA. 2010. *Fisiologi Ternak: Fenomena dan Nomena Dasar dari fungsi serta Interaksi Organ pada hewan*. Bandung: Widya Padjadjaran.
- Philips JG. 1975. *Environmental Physiology*. England: Blackwell Scientific Publications. Osney Mead. Oxford.
- Prosser CL. 1991. *Environmental and Metabolic Animal Physiology. Comparativ Animal Physiology*. Fourth Edition. New York: Wiley Liss, Inc.
- Randall D, Burgreen W, French K. 2000. *Eckert Animal Physiology. Mechanisma and Adaftation*. Fourth Editions. New York: W.H. Freeman and Company.
- Reece WO. 2004. *Dukes Physiology of Domestic Animals*. Twelfth Edition. Ithaca: Comstock Publishing Associates. Cornell University Press.
- Rieutort M. 1982a *Physiologie Animale, 1 Les Cellules, dan l Organisme*. Paris: Masson.

- Rieutort M. 1982b. *Physiologie Animale, 2 Les Grandes Fonctions*. Paris: Masson.
- Rose BD. 2001. *Clinical Physiology of Acid Base and Electrolytes Disorders*. 5th ed. New York: McGraw-Hill.
- Schalm OW, Jain NC, Careoll EJ. 1975. *Veterinary Haematology*. 3rd Ed. Philadelphia: Lea and Febiger.
- Sonjaya H, Amril MA, Abustam MSE. 1995. Growth and body size during growing period in Bali cattle young bull of South Sulawesi under intensive feeding and management. *Buletin Ilmu Peternakan dan Perikanan*. 8: 1–14.
- Statistix II. 1985. *An Interactive Statistical Analysis Program for Microcomputer*. NH Analytical Software. Roseville MN 55113.
- Swenson MJ. 1984. *Dukes Physiology of Domestic Animals*. 10th ed. Ithaca: Cornell University Press.
- Thahar A, Moran JB. 1978. Pengamatan Perbandingan Hematologi dari Lima Jenis Ternak Potong (Sapi dan Kerbau) Indonesia. Prosiding Seminar Ruminansia. Kerja Sama Ditjenak dengan IPB. Bogor.
- Thibault C, Levasseur MC. 1979. La Fonction Ovarienne Chez Les Mammiferes. Masson.
- Unwin N. 1995. Acetylcholine receptor channel image in the open state. *Nature*. 373:37–43.
- Vander AJ, Sherman JH, Luciano DB. 1998. *Human Physiology: The Mechanisms of Body Function*. 7th ed. Boston: WCB. McGraw-Hill.
- Verma PS, Agarwal VK, Tyagi BS. 1996. *Animal Physiology and Ecology*. New Delhi: S. Chand & Company Ltd. Ram Nagar.
- Wahyuni S, Matram B. 1983. Observasi pada hematologi sapi Bali. Prosiding Pertemuan Ilmiah Ruminansia Besar. Cisarua. 6–9 Desember 1982. 177–18.

- Wikelski M, Steven JC. 2006. Conservation physiology. *TRENDS in Ecology and Evolution*. 21(2): 38–46.
- Wilmer P, Stone G, Johnston I. 2005. *Environmental Physiology of Animals*. Second Edition. England: Blackwell Scientific Publications. Osney Mead, Oxford.
- Wulangi KS. 1990. *Prinsip-prinsip Fisiologi Hewan*. Jakarta: Proyek Pembinaan Tenaga Kependidikan Pendidikan Tinggi.
- Yousep MK. 1985. *Stress Physiology in Livestock*. Vol 1. Basic Principles. USA: CRC Press Inc. Florida.
- Zeman RJ, Ludeman R, Easton TG, JD. 1988. Slow to fast alteration in skeletal muscle fibers caused by clenbuterol a  $\beta$ 2-receptor agonist. *American Journal of Physiology*. 254: E726–E732.

