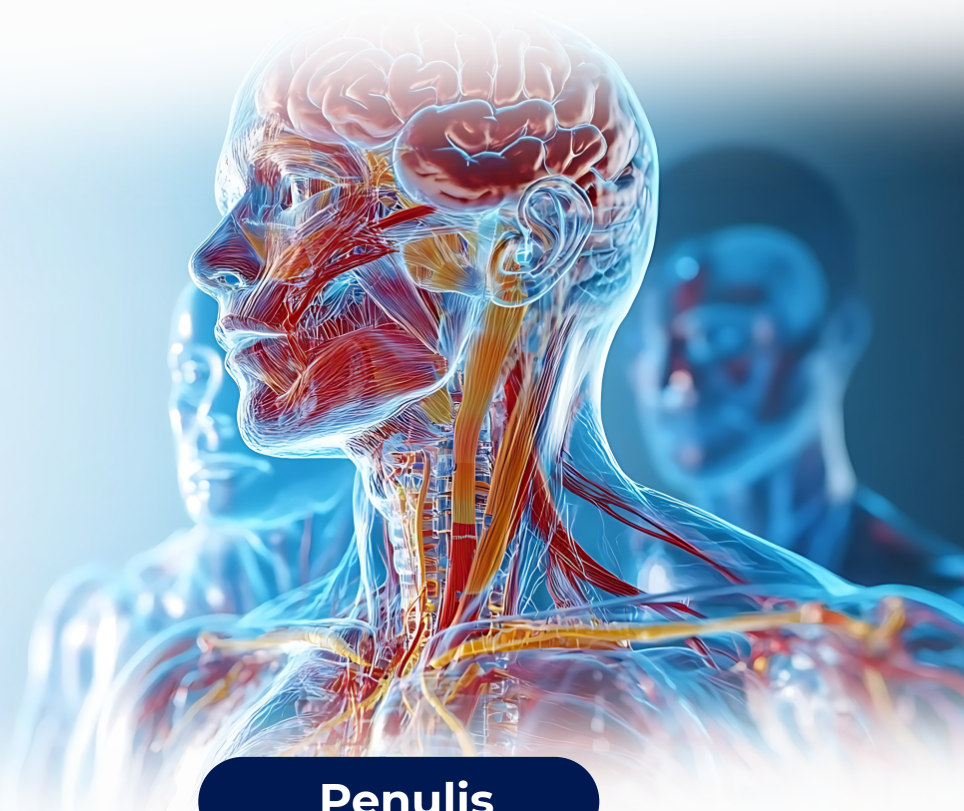


ANATOMI DAN FISIOLOGI MANUSIA:

DASAR-DASAR UNTUK PEMAHAMAN SISTEM TUBUH



Penulis

Febriniwati Rifdi
A. Fitriani Suryadi
Eva Nurul Malahayati
Gusti Revilla
Sahriana

ANATOMI DAN FISILOGI MANUSIA: DASAR-DASAR UNTUK PEMAHAMAN SISTEM TUBUH

Febriniwati Rifdi

A. Fitriani Suryadi

Eva Nurul Malahayati

Gusti Revilla

Sahriana



GETPRESS INDONESIA

**ANATOMI DAN FISILOGI MANUSIA:
DASAR-DASAR UNTUK PEMAHAMAN SISTEM TUBUH**

Penulis :

Febriniwati Rifdi
A. Fitriani Suryadi
Eva Nurul Malahayati
Gusti Revilla
Sahriana

ISBN : 978-634-255-231-5

Editor : Mila Sari, M. Si.

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

PENERBIT : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Desember 2025

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

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga buku berjudul *Anatomi dan Fisiologi Manusia: Dasar-Dasar untuk Pemahaman Sistem Tubuh* ini dapat diselesaikan. Buku ini hadir sebagai landasan untuk memahami struktur tubuh bagaimana fungsi. Isi buku ini mencakup pembahasan pendahuluan ke anatomi dan fisiologi manusia, sistem rangka dan otot, sistem kardiovaskular dan respirasi: transportasi dan pertukaran gas, sistem pencernaan dan eksresi: proses nutrisi dan pengeluaran zat sisa, dan sistem saraf dan endokrin; pengendalian dan regulasi tubuh. Akhir kata, semoga buku ini dapat menjadi referensi dan dapat memberikan manfaat serta inspirasi bagi semua pembaca.

Padang, Oktober 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR GAMBAR.....	v
DAFTAR TABEL	vi
BAB 1 PENDAHULUAN KE ANATOMI DAN FISILOGI MANUSIA.....	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Anatomi dan Fisiologi.....	3
1.2.1 Definisi Anatomi dan Fisiologi	3
1.2.2 Terminologi Anatomi	5
1.2.3 Istilah Anatomi.....	9
1.2.4 Homeostasis dalam Fisiologi	11
1.2 Sejarah Perkembangan Anatomi Fisiologi.....	12
1.3 Tingkatan Organisasi Kehidupan Dari Sel ke Tubuh: Dasar Anatomi dan Fisiologi.....	14
1.4 Peran Sistem Organ dalam Menjaga Kehidupan	18
1.5 Hubungan Struktur dan Fungsi.....	23
1.6 Sistem Tubuh dalam Perspektif Anatomi dan Fisiologi	23
DAFTAR PUSTAKA	25
BAB 2 SISTEM RANGKA DAN OTOT.....	27
2.1 Kerangka.....	27
2.1.1 Fungsi dan Kegunaan Sistem Rangka.....	29
2.1.2 Struktur Tulang dan Macam-Macam Tulang.....	33
2.1.4 Rangka Anggota Gerak (Apendikuler)	37
2.2 Sistem Otot Manusia	40
2.2.1 Struktur Anatomi Otot.....	42
2.2.2 Cara Kerja Otot.....	43
DAFTAR PUSTAKA	46
BAB 3 SISTEM KARDIOVASKULAR DAN RESPIRASI: TRANSPORTASI DAN PERTUKARAN GAS.....	47
3.1 Pendahuluan	47
3.2 Sistem Kardiovaskuler	48
3.2.1 Struktur dan Fungsi	49
3.2.2 Mekanisme Transportasi.....	78

3.2.3 Regulasi Kardiovaskular	79
3.3 Sistem Respirasi	82
3.3.1 Struktur dan Fungsi	84
3.3.2 Mekanisme Pernapasan	94
3.3.3 Regulasi Respirasi	99
3.4 Transportasi Gas	105
3.4.1 Oksigen (O ₂)	105
3.4.2 Karbon Dioksida (CO ₂)	108
3.5 Pertukaran Gas	111
3.5.1 Pertukaran di Paru (Respirasi Eksternal)	111
3.5.2 Pertukaran di Jaringan (Respirasi Internal)	115
3.6 Keterkaitan Sistem Kardiovaskular dan Respirasi	120
3.7 Gangguan dan Penyakit Terkait	125
DAFTAR PUSTAKA	140
BAB 4 SISTEM PENCERNAAN DAN EKSRESI: PROSES	
NUTRISI DAN PENGELUARAN ZAT SISA	141
4.1 Pendahuluan	141
4.2 Bagian-Bagian Saluran dan Kelenjar Pencernaan	143
4.2.1 Mulut (Oris)	143
4.2.2 Faring (Pharynx)	146
4.2.3 Esofagus	147
4.2.4 Lambung (Ventriculus/Gaster)	147
4.2.5 Usus Halus (Intestinum Tenue)	149
4.2.6 Usus Besar atau Kolon (Intestinum Crassum)	151
4.2.7 Rektum dan Canalis Anal (Anus)	152
4.2.8 Kelenjar Ludah (Glandula Salivatorius)	153
4.2.9 Hepar (Hati)	153
4.2.10 Fesika Felea (Kantong Empedu)	155
4.2.11 Pankreas	155
4.3 Sistem Eksresi (Sistem Urinarius)	156
4.3.1 Ginjal	156
4.3.2 Ureter	158
4.3.3 Vesika Urinaria (Kantong Kemih)	159
4.3.5 Uretra	161
4.4 Proses Nutrisi	161
4.4.1 Ingesti	162
4.4.2 Deglutasi	163

4.4.3 Digesti.....	164
4.4.4 Absorpsi.....	164
4.4.5 Defekasi	165
4.5 Pengeluaran Zat Sisa.....	166
4.5.1 Pembentukan Urin oleh Ginjal	167
4.5.2 Mekanisme Miksi	169
DAFTAR PUSTAKA	171
BAB 5 SISTEM SARAF DAN ENDOKRIN: PENGENDALIAN	
DAN REGULASI TUBUH.....	172
5.1 Pendahuluan	172
5.2 Struktur dan Fungsi Sistem Saraf.....	173
5.3 Struktur dan Fungsi Sistem Endokrin	179
5.4 Integrasi Sistem Saraf dan Endokrin.....	192
5.5 Penerapan Klinis dan Teknologi	193
DAFTAR PUSTAKA	195
BIODATA PENULIS	197

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Posisi Anatomi Standar	7
Gambar 1. 2 Bidang Anatomi Tampilan Depan.....	7
Gambar 1. 3 Bidang Anatomi Tampilan Anterolateral.....	8
Gambar 1. 4 Arah Anatomi	9
Gambar 1. 5 Sistem Organ Pada Manusia Berinteraksi Dalam Memelihara Homeostasis.....	22
Gambar 2. 1 Pembentukan Tulang.....	32
Gambar 2. 2 Struktur Tulang Pipih.....	35
Gambar 2. 3 Tulang Tidak Beraturan	36
Gambar 2. 4 Tulang Sesamoid	37
Gambar 2. 5 Tiga Jenis Otot Meliputi Otot Rangka, Otot Polos dan Otot Jantung.....	42
Gambar 3. 1 Potongan Melintang Jantung Manusia	51
Gambar 3. 2 Otot Lurik di Jantung Manusia	56
Gambar 3. 3 Lapisan Dinding Pembuluh Arteri.....	62
Gambar 3. 4 Sistem Peredaran Sistemik dan Pulmonal	78
Gambar 3. 5 Organ-organ Respirasi	83
Gambar 3. 6 Anatomi Faring.....	87
Gambar 3. 7 Anatomi Penghasil Suara	90
Gambar 3. 8 Diafragma Berkontraksi dan Berelaksasi.....	94
Gambar 3. 9 Struktur Hemoglobin	106
Gambar 3. 10 Diagram Penampang Pembuluh Darah Arteri yang Normal dan Mengalami Aterosklerosis.....	128
Gambar 3. 11 Paru-paru Penderita Asma	131
Gambar 3. 12 Paru-paru yang Ditumbuhi Tumor.....	136
Gambar 5. 1 Neuron	176
Gambar 5. 2 Hipotalamus.....	182
Gambar 5. 3 Kelenjar Hipofisis	183
Gambar 5. 4 Kelenjar Adrenal	186
Gambar 5. 5 Pankreas.....	187

DAFTAR TABEL

Tabel 5. 1 Perbandingan Struktur dan Fungsi Sistem Saraf	175
Tabel 5. 2. Tabel Sel Pendukung Neuroglia	178
Tabel 5. 3 Kelenjar Hormon dan Fungsinya	180
Tabel 5. 4 Hormon Kelenjar Hipofisis dan Fungsi Utamanya	184
Tabel 5. 5 Hormon Kelenjar Paratiroid dan Fungsinya	185
Tabel 5. 6 Hormon Kelenjar Adrenal dan Fungsinya.....	186
Tabel 5. 7 Hormon Pankreas dan Fungsinya	187
Tabel 5. 8 Tabel Hormon Gonad dan Fungsinya.....	189
Tabel 5. 9 Hormon Kelenjar Pineal dan Fungsinya	190
Tabel 5. 10 Hormon Kelenjar Timus dan Fungsinya	191

BAB 1

PENDAHULUAN KE ANATOMI DAN FISILOGI MANUSIA

1.1 Pendahuluan

Anatomi dan fisiologi adalah dua istilah dan bidang studi paling dasar dalam ilmu kehidupan. Anatomi mengacu pada struktur internal dan eksternal tubuh dan hubungan fisiknya, sedangkan fisiologi mengacu pada studi tentang fungsi struktur tersebut. Anatomi dan fisiologi merupakan dua cabang ilmu dasar yang sangat penting dalam memahami tubuh manusia serta fungsinya secara menyeluruh (Sherwood, 2016).

Kedua disiplin ilmu ini tidak dapat dipisahkan, sebab pemahaman tentang struktur tubuh akan memberikan landasan untuk memahami bagaimana fungsi tersebut dijalankan (Marieb & Hoehn, 2019). Sebagai contoh, struktur alveolus dalam paru-paru yang sangat tipis memiliki keterkaitan langsung dengan fungsi pertukaran gas, sehingga pemahaman anatomi alveolus membantu menjelaskan proses fisiologis respirasi (Widmaier *et al.*, 2014). Dalam bidang kesehatan, khususnya kebidanan, pemahaman mendalam mengenai anatomi dan fisiologi menjadi dasar dalam melakukan pemeriksaan, diagnosis, serta penatalaksanaan berbagai kondisi ibu dan anak (Cunningham *et al.*, 2018).

Tingkat organisasi kehidupan manusia juga menjadi bagian penting dalam kajian anatomi dan fisiologi (Sherwood, 2016). Tubuh manusia disusun mulai dari tingkat molekul, sel, jaringan, organ, sistem organ, hingga organisme secara utuh (Marieb & Hoehn, 2019). Pada setiap tingkat organisasi tersebut terdapat hubungan hierarkis yang saling mendukung, sehingga gangguan pada satu tingkat dapat mempengaruhi keseluruhan sistem (Hall, 2021). Konsep homeostasis merupakan salah satu prinsip fisiologi yang menekankan kestabilan lingkungan internal tubuh meskipun terjadi perubahan di lingkungan eksternal (Tortora & Derrickson, 2017). Homeostasis dijaga melalui mekanisme regulasi, terutama mekanisme umpan balik negatif, yang mengatur suhu tubuh, kadar glukosa, hingga tekanan darah (Guyton & Hall, 2016). Pemahaman konsep ini menjadi landasan dalam menjelaskan berbagai fenomena klinis yang ditemui dalam praktik kesehatan (Fox, 2018).

Pentingnya Anatomi dan Fisiologi dalam Ilmu Kesehatan karena Pemahaman tentang anatomi dan fisiologi manusia merupakan fondasi utama dalam pendidikan kesehatan karena tanpa pengetahuan tersebut tenaga kesehatan tidak dapat memahami kondisi tubuh pasien secara menyeluruh (Marieb & Hoehn, 2019). Anatomi memberikan informasi mengenai struktur organ dan sistem tubuh, sedangkan fisiologi menjelaskan mekanisme kerja organ tersebut dalam menjaga keseimbangan hidup (Sherwood, 2016). Hubungan anatomi dan fisiologi bersifat komplementer, karena struktur organ sangat mempengaruhi fungsi yang dijalankan (Tortora & Derrickson, 2017). Dengan memahami keterkaitan keduanya, mahasiswa kesehatan dapat menjelaskan fenomena klinis dari perspektif struktur dan fungsi tubuh (Fox, 2018).

Sebagai contoh, bentuk alveolus paru yang tipis dan luas memungkinkan terjadinya difusi oksigen dan karbondioksida secara efisien (Widmaier *et al.*, 2016). Dengan kata lain, setiap fungsi tubuh selalu memiliki dasar struktural yang dapat dijelaskan melalui anatomi (Marieb & Hoehn, 2019). Dengan demikian, pengantar anatomi dan fisiologi manusia bukan sekadar pembahasan teoretis, tetapi juga menjadi pintu masuk untuk memahami ilmu kesehatan secara komprehensif (Saladin, 2020). Pengetahuan ini menjadi bekal utama dalam praktik profesi kesehatan, sehingga mahasiswa di bidang kebidanan, keperawatan, maupun kedokteran perlu mempelajarinya secara mendalam sejak awal pendidikan (Hall & Guyton, 2021).

Pemahaman anatomi dan fisiologi menjadi dasar semua ilmu kedokteran dan kesehatan (Fox, 2018). Tanpa pemahaman tentang struktur dan fungsi tubuh, tenaga kesehatan tidak dapat menegakkan diagnosis maupun memberikan intervensi yang tepat (Tortora & Derrickson, 2017).

1.2 Anatomi dan Fisiologi

1.2.1 Definisi Anatomi dan Fisiologi

➤ Definisi Anatomi

Anatomi secara etimologis berasal dari bahasa Yunani "ana" yang berarti "atas" dan "tome" yang berarti "memotong", sehingga anatomi didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari struktur tubuh dengan cara menguraikan bagian-bagiannya (Martini *et al.*, 2017).

Anatomi mempelajari susunan tubuh dari tingkat makroskopis hingga mikroskopis, sedangkan fisiologi menekankan pada mekanisme kerja yang memungkinkan tubuh berfungsi dengan baik (Hall & Guyton, 2021). Anatomi berfokus pada struktur tubuh, baik yang dapat dilihat secara makroskopis maupun mikroskopis (Marieb & Hoehn, 2019). Ilmu anatomi menyediakan landasan visual tentang bagaimana organ tersusun, saling berhubungan, dan membentuk sistem tubuh yang kompleks (Widmaier *et al.*, 2020). Ilmu anatomi tidak berdiri sendiri, melainkan berhubungan erat dengan fisiologi yang mempelajari fungsi tubuh (Silverthorn, 2019). Keterpaduan kedua ilmu ini menjadikan pemahaman anatomi sangat penting untuk menjelaskan dasar-dasar kesehatan, mulai dari proses diagnostik, perencanaan tindakan terapi, hingga pengembangan ilmu biomedis yang lebih lanjut (Widmaier *et al.*, 2020).

➤ Definisi Fisiologi

Fisiologi berasal dari kata "physis" yang berarti "alam" dan "logos" yang berarti "ilmu", sehingga fisiologi didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari fungsi dari berbagai struktur tubuh yang telah dijelaskan oleh anatomi (Tortora & Derrickson, 2017).

Sebagaimana Anatomi yang berfokus pada struktur tubuh, baik yang dapat dilihat secara makroskopis maupun mikroskopis, fisiologi menelaah fungsi dari setiap bagian tubuh tersebut

(Marieb & Hoehn, 2019). Sementara itu, fisiologi manusia berkembang sebagai ilmu yang menjelaskan mekanisme kerja organ dan sistem tubuh dalam mempertahankan homeostasis (Widmaier *et al.*, 2016).

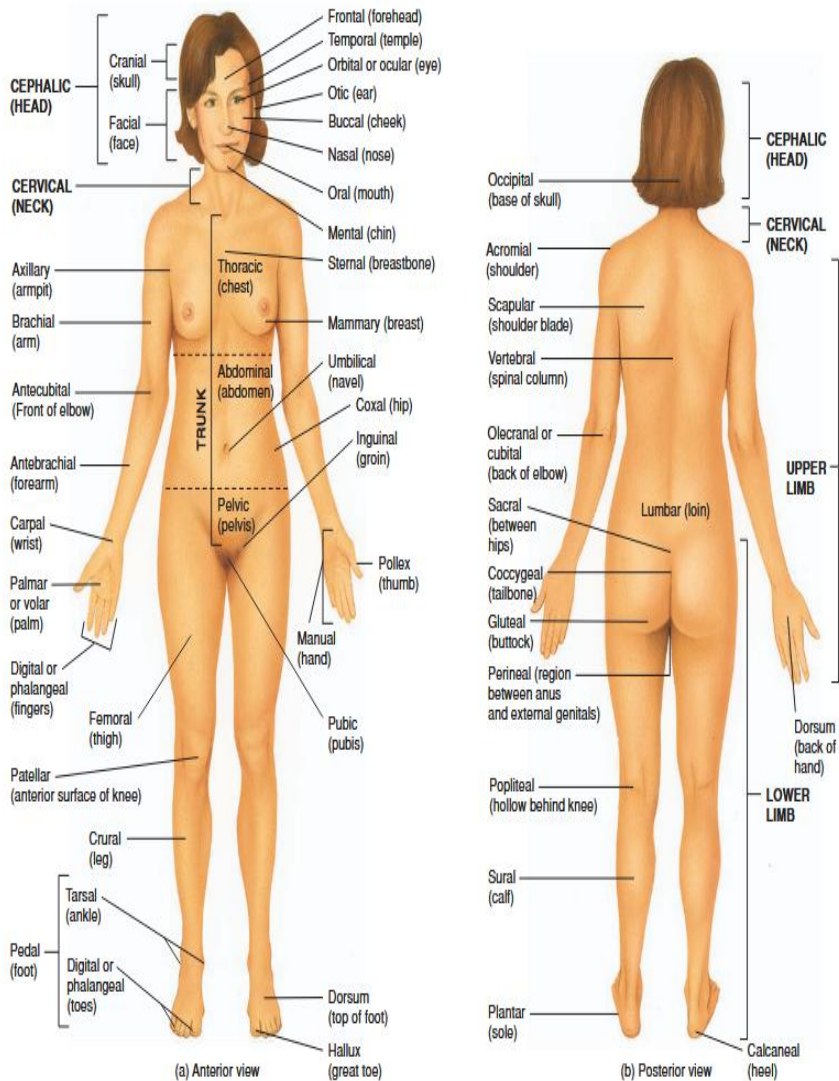
Fisiologi memberikan pemahaman tentang dinamika proses tubuh, seperti peredaran darah, pernapasan, pencernaan, hingga mekanisme reproduksi (Sherwood, 2016). Integrasi keduanya menjadikan mahasiswa mampu menalar fenomena klinis dan menjelaskan berbagai kondisi patologis yang mungkin muncul (Fox, 2018).

1.2.2 Terminologi Anatomi

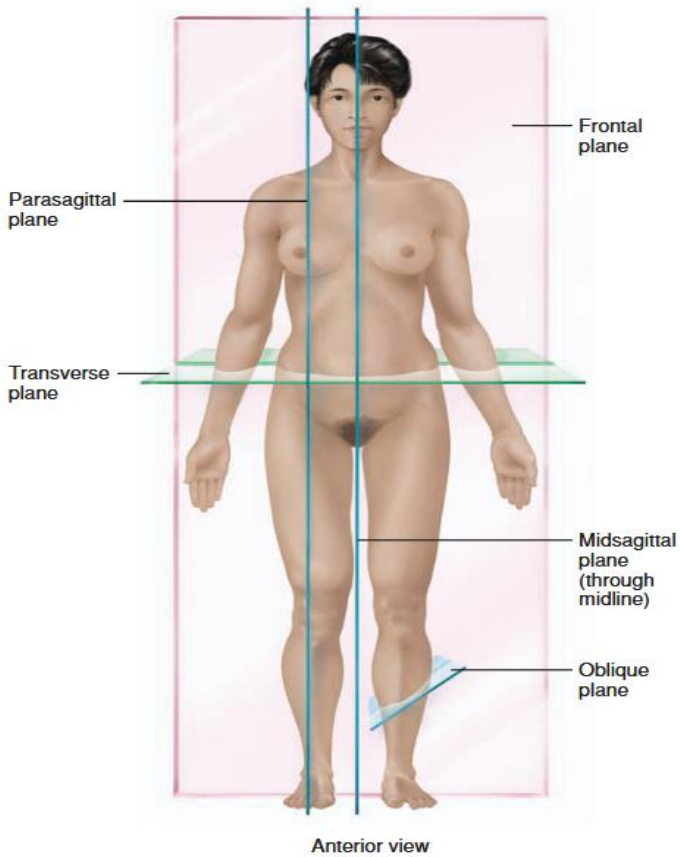
Dalam anatomi, penggunaan istilah baku sangat penting agar tenaga kesehatan memiliki pemahaman yang seragam. Beberapa istilah dasar anatomi antara lain:

- **Posisi anatomi standar:** tubuh berdiri tegak, pandangan lurus ke depan, lengan di samping badan dengan telapak tangan menghadap ke depan, serta kaki rapat (Tortora & Derrickson, 2017) (gambar 1.1)
- **Bidang anatomi:** meliputi bidang sagital (membagi kiri dan kanan), bidang frontal (membagi depan dan belakang), serta bidang transversal (membagi atas dan bawah) (Standring, 2021) (gambar 1.2).
- **Istilah arah:** gambar 1.3 misalnya superior (atas), inferior (bawah), anterior (depan), posterior (belakang), medial (tengah), lateral (samping),

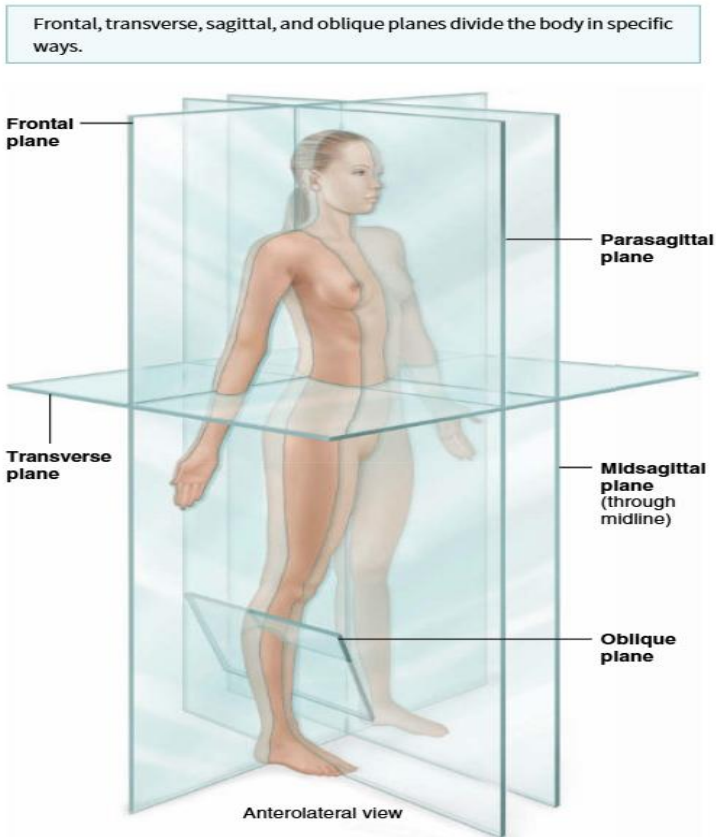
proksimal (dekat pangkal), dan distal (jauh dari pangkal) (Marieb & Hoehn, 2019)



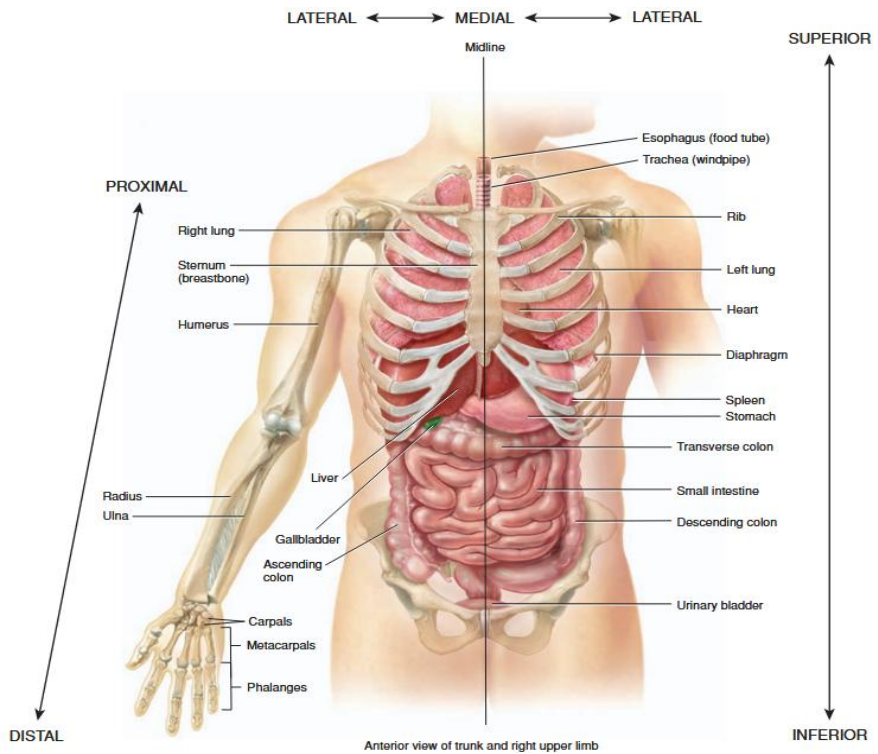
Gambar 1. 1 Posisi Anatomi Standar (Tortora & Derrickson, 2017)



Gambar 1. 2 Bidang Anatomi Tampilan Depan (Tortora & Derrickson, 2012)



**Gambar 1. 3 Bidang Anatomi Tampilan Anterolateral
(Tortora & Derrickson, 2017)**



Gambar 1. 4 Arah Anatomi (Tortora & Derrickson, 2017)

Penggunaan terminologi ini memungkinkan komunikasi medis menjadi lebih akurat, khususnya dalam praktik klinis dan dokumentasi kasus (Hall & Guyton, 2021)

1.2.3 Istilah Anatomi

Anterior : Bagian depan

Posterior : Bagian belakang

Superior : Bagian atas

Inferior	: Bagian bawah
Medial	: Bagian tengah atau lebih dekat dengan bidang median
Lateral	: Bagian samping
Ipsilateral	: Terletak di sisi yang sama
Kontralateral	: Terletak di sisi yang berlawanan
Dextra	: Bagian kanan
Sinistra	: Bagian kiri
Ventral	: Bagian depan ruas tulang belakang
Dorsal	: Bagian belakang ruas tulang belakang
Proximal	: Lebih dekat dengan pangkal tubuh atau mendekati batang tubuh
Distal	: Ujung atau menjauhi batang tubuh
Interna	: Bagian dalam
Externa	: Bagian luar
Parietal	: Lapisan luar
Superfisial	: Dangkal atau lebih dekat permukaan
Horizontal	: Bidang datar
Transversal	: Potongan melintang
Perifer	: Pinggir (tepi)
Visceral	: Lapisan dalam

Profunda	: Dalam atau lebih jauh dari permukaan
Vertical	: Bidang tegak
Longitudinal	: Potongan memanjang
Sentral	: Bagian tengah
Asenden	: Bagian naik
Desenden	: Bagian turun
Cranial	: Bagian kepala
Caudal	: Bagian ekor
Palmar	: Ke arah palmaris manus (anggota gerak atas)
Plantar	: Ke arah plantar pedis (anggota gerak bawah)
Ulna	: Ke arah ulna (tulang hasta)
Radial	: Ke arah radius (tulang pengumpil)
Tibia	: Ke arah tibia (tulang kering)
Fibula	: Ke arah fibula (tulang betis)

1.2.4 Homeostasis dalam Fisiologi

Homeostasis adalah kemampuan tubuh untuk mempertahankan kondisi internal yang stabil meskipun lingkungan eksternal berubah (Hall & Guyton, 2021). Konsep ini merupakan prinsip fundamental dalam fisiologi karena hampir semua mekanisme tubuh

berfungsi untuk menjaga keseimbangan tersebut (Fox, 2018).

Mekanisme homeostasis bekerja melalui **umpan balik negatif** (negative feedback) dan **umpan balik positif** (positive feedback). Contoh umpan balik negatif adalah pengaturan suhu tubuh oleh hipotalamus, sedangkan umpan balik positif dapat dilihat pada kontraksi rahim saat persalinan yang dipicu hormon oksitosin (Marieb & Hoehn, 2019).

Konsep homeostasis mengacu pada kemampuan tubuh untuk menjaga keseimbangan internal meskipun terjadi perubahan lingkungan eksternal (Hall & Guyton, 2021). Misalnya, tubuh mampu mempertahankan suhu sekitar 37°C melalui mekanisme pengaturan oleh hipotalamus, keringat, dan vasodilatasi (Tortora & Derrickson, 2017). Dengan demikian, fisiologi tidak hanya membahas fungsi organ secara terpisah, tetapi juga interaksi kompleks antar sistem tubuh (Marieb & Hoehn, 2019). Kegagalan homeostasis dapat menyebabkan gangguan fungsi tubuh dan menimbulkan penyakit (Sherwood, 2016).

1.2 Sejarah Perkembangan Anatomi Fisiologi

Ilmu anatomi dan fisiologi telah berkembang sejak ribuan tahun lalu melalui pengamatan sederhana terhadap tubuh manusia dan hewan (Standring, 2016). Pada masa Yunani Kuno, Hippocrates dianggap sebagai bapak kedokteran karena menekankan bahwa penyakit memiliki penyebab alami, bukan supranatural (Sherwood, 2016).

Kemudian, Galen memperluas pemahaman anatomi dengan membedah hewan dan mendokumentasikan temuan-temuannya, meskipun banyak kesalahpahaman karena keterbatasan teknologi pada masanya (O'Malley, 2017).

Pada masa Renaisans, Andreas Vesalius merevolusi ilmu anatomi dengan karyanya *De Humani Corporis Fabrica*, yang menyajikan ilustrasi tubuh manusia berdasarkan pembedahan aktual (Martini *et al.*, 2017). Perkembangan ini menjadi titik balik penting yang memisahkan anatomi dari dogma klasik menuju pendekatan ilmiah berbasis observasi (Fox, 2018). Selanjutnya, penemuan mikroskop oleh Antonie van Leeuwenhoek memungkinkan pengamatan sel dan jaringan secara detail, sehingga fisiologi modern dapat berkembang dengan dasar biologis yang lebih kuat (Alberts *et al.*, 2015).

Abad ke-19 hingga 20 ditandai dengan berkembangnya fisiologi eksperimental, terutama setelah Claude Bernard memperkenalkan konsep “milieu intérieur” atau lingkungan internal yang menjadi dasar pemahaman homeostasis (Guyton & Hall, 2016). Perkembangan teknologi pencitraan medis seperti X-ray, CT-scan, dan MRI pada abad ke-20 memperluas pemahaman anatomi tanpa harus melakukan pembedahan (Standring, 2016). Hingga saat ini, anatomi dan fisiologi terus berkembang seiring kemajuan teknologi biologi molekuler, genetika, dan bioimaging (Hall, 2021).

1.3 Tingkatan Organisasi Kehidupan Dari Sel ke Tubuh: Dasar Anatomi dan Fisiologi

Tubuh manusia tersusun atas beberapa tingkatan organisasi yang berjenjang, mulai dari tingkat terkecil yaitu atom dan molekul, hingga membentuk organisme secara utuh (Tortora & Derrickson, 2017).

1. **Tingkat Kimia:** terdiri atas atom dan molekul seperti air, protein, lipid, dan karbohidrat yang berfungsi sebagai penyusun dasar kehidupan (Marieb & Hoehn, 2019).
2. **Tingkat Sel:** sel merupakan unit struktural dan fungsional terkecil dari kehidupan, misalnya sel epitel, sel saraf, dan sel otot (Hall & Guyton, 2021). Sel menjalankan fungsi vital seperti metabolisme, pertumbuhan, dan reproduksi (Alberts *et al.*, 2022). Anatomi sel berfokus pada struktur seperti membran sel, sitoplasma, organel (mitokondria, retikulum endoplasma, aparatus Golgi, lisosom, nukleus), sedangkan fisiologi menekankan pada fungsi organel tersebut dalam menjaga homeostasis (Guyton & Hall, 2021).
 - a) **Membran sel** berperan sebagai pengatur transportasi ion, zat gizi, serta komunikasi antar sel.
 - b) **Mitokondria** menjadi pusat produksi energi (ATP).
 - c) **Nukleus** berfungsi mengendalikan ekspresi gen dan sintesis protein.

Kesehatan manusia sangat bergantung pada integritas sel; kerusakan pada DNA atau disfungsi

organel dapat memicu penyakit seperti kanker atau kelainan metabolik (Cooper & Hausman, 2019).

3. **Tingkat Jaringan:** Jutaan sel yang memiliki bentuk dan fungsi serupa berkumpul membentuk jaringan. kumpulan sel yang memiliki bentuk dan fungsi serupa, seperti jaringan epitel, jaringan ikat, jaringan otot, dan jaringan saraf (Sherwood, 2016). Secara anatomi, tubuh manusia memiliki empat jaringan utama: epitel, ikat, otot, dan saraf (Marieb & Hoehn, 2019).
 - a) **Jaringan epitel** melapisi permukaan tubuh dan organ, berfungsi sebagai pelindung serta penyerap zat.
 - b) **Jaringan ikat** (misalnya tulang, darah, kartilago) memberikan kekuatan struktural dan transportasi zat.
 - c) **Jaringan otot** memungkinkan pergerakan (skeletal, jantung, polos).
 - d) **Jaringan saraf** menghantarkan impuls listrik untuk koordinasi fungsi tubuh.
4. **Tingkat Organ:** Organ terbentuk dari kombinasi berbagai jaringan yang memiliki fungsi spesifik. Misalnya, **jantung** terdiri dari jaringan otot jantung, jaringan ikat, jaringan saraf, dan jaringan epitel pembuluh darah (Hall & Guyton, 2021).
 - a) **Anatomi** menekankan struktur organ, lokasi, dan hubungannya dengan organ lain.
 - b) **Fisiologi** membahas bagaimana organ bekerja, misalnya bagaimana jantung memompa darah melalui kontraksi ritmik yang diatur sistem konduksi.
5. **Tingkat Sistem Organ:** sekumpulan organ yang bekerja sama menjalankan fungsi vital. Misalnya:

- a) **Sistem pernapasan** (hidung, trakea, paru-paru) untuk pertukaran gas.
- b) **Sistem pencernaan** (mulut, lambung, usus) untuk memproses makanan.
- c) **Sistem saraf dan endokrin** untuk mengatur seluruh aktivitas tubuh.

Dalam anatomi, sistem organ dipelajari berdasarkan struktur; sedangkan fisiologi mempelajari mekanisme fungsinya serta interaksi antar sistem. Sebagai contoh, sistem pernapasan tidak bisa berfungsi tanpa dukungan sistem sirkulasi untuk mengangkut oksigen ke seluruh tubuh (Sherwood, 2016).

6. **Tingkat Organisme:** merupakan keseluruhan tubuh manusia sebagai satu kesatuan yang utuh (Standring, 2021). Tubuh manusia adalah hasil integrasi seluruh sistem organ yang bekerja secara harmonis menjaga homeostasis. Homeostasis merupakan kemampuan tubuh mempertahankan kondisi internal yang stabil meskipun lingkungan eksternal berubah (Guyton & Hall, 2021).

Contoh: ketika suhu lingkungan meningkat, tubuh akan meningkatkan pengeluaran keringat melalui sistem integumen untuk menurunkan suhu. Hal ini menunjukkan keterkaitan anatomi (kelenjar keringat di kulit) dan fisiologi (mekanisme pengaturan suhu oleh hipotalamus).

Hirarki sel ke tubuh ini menjelaskan molekul membentuk organel, organel menyusun sel, sel membentuk jaringan, jaringan menyusun organ, organ membentuk sistem organ, dan seluruh sistem organ membentuk organisme (Alberts *et al.*, 2015). Sel merupakan unit struktural dan fungsional terkecil tubuh

manusia (Alberts *et al.*, 2015). Pemahaman mengenai struktur sel, seperti membran plasma, nukleus, dan organel lain, memberikan gambaran bagaimana sel menjalankan fungsi vital (Marieb & Hoehn, 2019). Fisiologi sel menjelaskan proses dasar seperti transport membran, komunikasi antar sel, dan metabolisme energi (Sherwood, 2016). Konsep hierarki ini penting dipahami karena gangguan pada tingkat sel dapat berdampak besar pada tingkat organ maupun organisme (Hall, 2021) serta mengaitkan bagaimana gangguan pada level sel dapat mempengaruhi fungsi organ hingga sistem tubuh (Drake *et al.*, 2019).

Sebagai contoh adanya mekanisme difusi dan osmosis berperan penting dalam mempertahankan keseimbangan cairan tubuh (Guyton & Hall, 2016). Demikian pula, komunikasi sel melalui sinyal kimiawi mendukung koordinasi antar jaringan dan organ (Widmaier *et al.*, 2014). Gangguan fisiologi sel dapat menyebabkan berbagai penyakit, seperti kanker yang berawal dari proliferasi sel tidak terkendali (Fox, 2018). Oleh karena itu, pemahaman fisiologi sel menjadi dasar penting dalam mempelajari sistem tubuh secara keseluruhan (Tortora & Derrickson, 2017).

Contoh lainnya kerusakan mitokondria pada sel dapat mengakibatkan gangguan metabolisme energi yang berdampak pada kegagalan fungsi organ tertentu (Sherwood, 2016). Demikian pula, perubahan pada jaringan ikat dapat mengganggu stabilitas organ, sehingga mempengaruhi keseluruhan sistem tubuh (Widmaier *et al.*, 2014). Pemahaman menyeluruh mengenai tingkatan organisasi ini sangat penting bagi tenaga kesehatan dalam menilai kondisi pasien dari aspek terkecil hingga terbesar (Guyton & Hall, 2016).

1.4 Peran Sistem Organ dalam Menjaga Kehidupan

Tubuh manusia terdiri dari 11 sistem organ utama yang bekerja secara sinergis untuk mempertahankan kehidupan (Marieb & Hoehn, 2019). Sistem-sistem tersebut meliputi:

1. **Sistem integumen (kulit, rambut, kuku)**
Sistem integumen mencakup kulit, rambut, kuku, dan kelenjar terkait, yang berfungsi sebagai pelindung utama tubuh dari lingkungan luar (Hall, 2020). Kulit tidak hanya bertindak sebagai penghalang fisik, tetapi juga sebagai organ sensorik dan pengatur suhu (Sherwood, 2016). Selain itu, kulit memiliki peran imunologis dengan menghasilkan zat antimikroba dan memicu respons pertahanan tubuh (Marieb & Hoehn, 2019).
2. **Sistem rangka (Skeletal)**
Sistem skeletal meliputi tulang, sendi, dan otot, yang bersama-sama menopang tubuh dan memungkinkan pergerakan (Saladin, 2020). Tulang berfungsi sebagai penopang struktural sekaligus tempat penyimpanan mineral penting, seperti kalsium dan fosfor (Hall, 2020). Otot, dengan kemampuan kontraksinya, berperan dalam gerakan, postur, dan produksi panas (Sherwood, 2016).
3. **Sistem otot (Muskulo)**
Sistem muskulo meliputi Otot dengan kemampuan kontraksinya, berperan dalam gerakan, postur, dan produksi panas (Sherwood, 2016).
4. **Sistem saraf**
Sistem saraf terdiri atas otak, sumsum tulang belakang, dan saraf perifer yang mengatur koordinasi

aktivitas tubuh (Marieb & Hoehn, 2019). Otak berfungsi sebagai pusat kendali, mengintegrasikan informasi sensorik dan menghasilkan respons motorik (Hall, 2020). Selain itu, sistem saraf berperan dalam fungsi kognitif, emosi, dan perilaku (Sherwood, 2016). Sistem endokrin.

5. Sistem kardiovaskular

Sistem kardiovaskuler terdiri dari jantung, pembuluh darah, dan darah sebagai medium transportasi (Marieb & Hoehn, 2019). Jantung memompa darah yang membawa oksigen dan nutrisi ke jaringan, serta mengangkut limbah metabolisme (Sherwood, 2016).

6. Sistem Endokrin.

Sistem endokrin melibatkan kelenjar yang menghasilkan hormon, berfungsi dalam mengatur pertumbuhan, metabolisme, dan reproduksi (Saladin, 2020). Hormon yang dihasilkan bekerja secara sistemik melalui peredaran darah untuk memengaruhi berbagai organ (Hall, 2020).

7. Sistem limfatik

Sistem limfatik mencakup pembuluh limfatik, kelenjar getah bening, limpa, dan organ-organ limfoid lainnya seperti sumsum tulang, timus, amandel, dan usus buntu. Komponen-komponen ini bekerja sama untuk menyalurkan cairan limfatik (getah bening), menyaring patogen, dan berperan penting dalam menjaga keseimbangan cairan tubuh serta mendukung sistem kekebalan tubuh.

8. Sistem pernapasan

Sistem respirasi mencakup paru-paru dan saluran pernapasan yang memungkinkan pertukaran oksigen dan karbon dioksida (Saladin, 2020). Fungsi utama

sistem ini adalah memasok oksigen untuk metabolisme seluler dan mengeluarkan karbondioksida sebagai produk sampingan (Hall, 2020).

9. Sistem pencernaan

Sistem pencernaan meliputi saluran gastrointestinal dan organ tambahan seperti hati dan pankreas (Sherwood, 2016). Fungsinya adalah memecah makanan menjadi zat gizi yang dapat diserap dan digunakan tubuh (Marieb & Hoehn, 2019)

10. Sistem urinaria

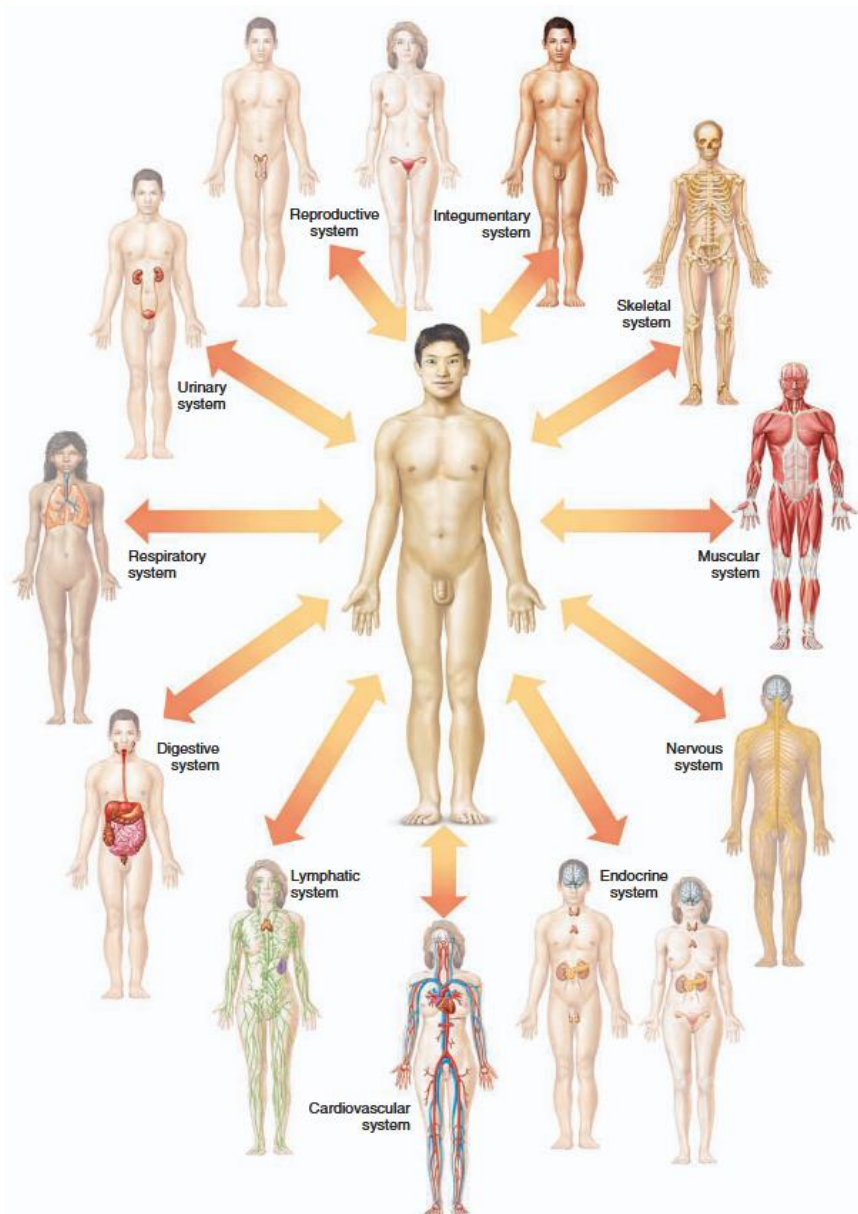
Sistem urinaria terdiri dari ginjal, ureter, kandung kemih, dan uretra, yang berperan dalam ekskresi produk limbah serta menjaga keseimbangan cairan dan elektrolit (Saladin, 2020). Ginjal juga berperan dalam pengaturan tekanan darah melalui sistem renin-angiotensin (Hall, 2020)

11. Sistem reproduksi

Sistem reproduksi terdiri dari organ reproduksi internal dan eksternal yang memungkinkan proses reproduksi (Marieb & Hoehn, 2019). Pada perempuan, organ ini termasuk ovarium, tuba fallopi, uterus, dan vagina, yang berperan dalam siklus menstruasi, ovulasi, serta kehamilan (Hall, 2020). Pemahaman sistem reproduksi adalah hal yang mendasar dalam kebidanan, karena setiap tahap kehamilan hingga persalinan berkaitan langsung dengan organ-organ ini (Cunningham *et al.*, 2018).

Setiap sistem memiliki fungsi khusus namun saling berhubungan satu sama lain (Widmaier *et al.*, 2014). Sebagai contoh, sistem pernapasan bekerja sama dengan sistem kardiovaskular dalam pertukaran oksigen dan karbon

dioksida, yang sangat penting untuk metabolisme sel (Guyton & Hall, 2016). Demikian pula, sistem saraf dan endokrin berkolaborasi dalam mengatur respon tubuh terhadap perubahan lingkungan internal maupun eksternal (Sherwood, 2016).



**Gambar 1. 5 Sistem Organ Pada Manusia Berinteraksi
Dalam Memelihara Homeostasis (Shier, *et al* 2016)**

1.5 Hubungan Struktur dan Fungsi

Prinsip dasar dari ilmu anatomi dan fisiologi adalah bahwa struktur tubuh menentukan fungsi, dan sebaliknya, fungsi mempengaruhi bentuk struktur (Marieb & Hoehn, 2019). Contohnya, struktur permukaan usus halus yang dipenuhi vili dan mikrovili memperluas area penyerapan nutrisi secara optimal (Tortora & Derrickson, 2017). Demikian juga, struktur jaringan otot jantung yang bersifat involunter memungkinkan kontraksi ritmis untuk memompa darah secara kontinu (Widmaier *et al.*, 2014).

Contoh lain dalam kebidanan, hubungan struktur dan fungsi dapat dilihat pada pelvis wanita yang memiliki bentuk lebih lebar dibandingkan pria, sehingga mendukung proses persalinan (Cunningham *et al.*, 2018). Perubahan fisiologis pada kehamilan seperti peningkatan volume darah dan perubahan struktur uterus menunjukkan adaptasi tubuh dalam mendukung pertumbuhan janin (Pillitteri, 2014). Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan struktur dan fungsi sangat penting untuk menjelaskan fenomena klinis dalam praktik kesehatan (Lowdermilk *et al.*, 2020).

1.6 Sistem Tubuh dalam Perspektif Anatomi dan Fisiologi

Tubuh manusia memiliki sebelas sistem organ yang saling mendukung, dan masing-masing memiliki kajian anatomi serta fisiologinya (Sherwood, 2016). Sistem integumen terdiri dari kulit, rambut, dan kelenjar, berfungsi melindungi tubuh dari gangguan eksternal serta membantu mengatur suhu (Martini *et al.*, 2017). Sistem muskuloskeletal

terdiri dari tulang, otot, dan sendi, yang mendukung pergerakan serta memberikan bentuk tubuh (Marieb & Hoehn, 2019).

Sistem saraf berfungsi menerima, memproses, dan merespon informasi melalui jaringan saraf yang kompleks, sedangkan sistem endokrin mengatur aktivitas tubuh melalui hormon (Guyton & Hall, 2016). Sistem kardiovaskular bertugas mendistribusikan oksigen, nutrien, serta hormon melalui darah, sementara sistem pernapasan memungkinkan pertukaran gas antara tubuh dan lingkungan (Fox, 2018). Sistem pencernaan memproses makanan menjadi zat gizi, sistem urinaria membuang limbah metabolik, dan sistem limfatik menjaga pertahanan tubuh (Widmaier *et al.*, 2014).

DAFTAR PUSTAKA

- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2015). *Molecular Biology of the Cell* (6th ed.). New York: Garland Science.
- Cunningham, F. G., Leveno, K. J., Bloom, S. L., Spong, C. Y., & Dashe, J. S. (2018). *Williams Obstetrics* (25th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Drake, R. L., Vogl, W., & Mitchell, A. W. (2019). *Gray's Anatomy for Students*. Elsevier.
- Fox, S. I. (2018). *Human Physiology* (15th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2016). *Textbook of Medical Physiology* (13th ed.). Philadelphia: Elsevier.
- Hall, J. E. (2021). *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology* (14th ed.). Philadelphia: Elsevier.
- Lowdermilk, D. L., Perry, S. E., Cashion, M. C., & Alden, K. R. (2020). *Maternity & Women's Health Care* (12th ed.). St. Louis: Mosby.
- Marieb, E. N., & Hoehn, K. (2019). *Human Anatomy & Physiology* (11th ed.). Boston: Pearson.
- Martini, F. H., Nath, J. L., & Bartholomew, E. F. (2017). *Fundamentals of Anatomy & Physiology* (11th ed.). Boston: Pearson.
- O'Malley, C. D. (2017). *Andreas Vesalius of Brussels: 1514–1564*. New York: Courier Dover Publications
- Pillitteri, A. (2014). *Maternal & Child Health Nursing: Care of the Childbearing & Childrearing Family* (7th ed.). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.

- Saladin, K. S. (2020). *Anatomy & Physiology: The Unity of Form and Function* (9th ed.). McGraw-Hill Education
- Sherwood, L. (2016). *Human Physiology: From Cells to Systems* (9th ed.). Boston: Cengage Learning.
- Shier, D., Butler, J., Lewis, R. (2016). *Hole's Human anatomy & Physiology* (14th ed.) New York; McGraw-Hill Education
- Silverthorn, D. U. (2019). *Human Physiology: An Integrated Approach* (8th ed.). Pearson.
- Standring, S. (2016). *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice* (41st ed.). Philadelphia: Elsevier.
- Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2012). *Principles of Anatomy and Physiology* (13th ed.). Hoboken: Wiley.
- _____, (2017). *Principles of Anatomy and Physiology* (15th ed.). Hoboken: Wiley.
- Widmaier, E. P., Raff, H., & Strang, K. T. (2014). *Vander's Human Physiology: The Mechanisms of Body Function* (14th ed.). New York: McGraw-Hill.

BAB 2

SISTEM RANGKA DAN OTOT

2.1 Kerangka

Kemampuan manusia untuk bergerak dan berpindah tempat merupakan salah satu ciri penting kehidupan yang menunjang kelangsungan aktivitas sehari-hari. Mulai dari gerakan sederhana seperti mengedipkan mata, mengangkat buku, hingga keterampilan motorik kompleks seperti berlari, menari, atau menulis, semua bergantung pada sistem gerak yang terkoordinasi. Sistem ini tersusun atas dua komponen utama, yaitu rangka dan otot, yang saling bekerja sama membentuk satu kesatuan fungsional.

Rangka manusia terdiri atas lebih dari dua ratus tulang yang bersama-sama memberi bentuk tubuh, menopang jaringan, dan melindungi organ vital. Sebagian tulang menyatu secara permanen untuk menjaga kekokohan struktur, sedangkan sebagian lain saling bertemu pada persendian. Persendian dihubungkan oleh jaringan ikat kuat bernama ligamen, yang menjaga kestabilan sambil tetap memungkinkan rentang gerak tertentu. Dengan demikian, rangka berperan sebagai kerangka pasif yang menyediakan tumpuan bagi seluruh bagian tubuh.

Otot melekat pada permukaan tulang melalui tendon, membentang dari satu tulang ke tulang lain sehingga membentuk sistem pengungkit. Sifat unik jaringan otot adalah

kemampuannya berkontraksi dan berelaksasi. Ketika serabut otot berkontraksi, panjang serabut berkurang dan menghasilkan gaya yang menggerakkan tulang pada sendi. Sebaliknya, saat relaksasi, otot kembali ke panjang semula dan gerakan berhenti. Karena menghasilkan tenaga yang menggerakkan rangka, otot dikenal sebagai alat gerak aktif, sedangkan tulang disebut alat gerak pasif karena tidak dapat bergerak tanpa dorongan dari otot (Widodo,2021).

Kerja sama rangka dan otot bukan hanya memungkinkan manusia berjalan, berlari, atau mengangkat beban, tetapi juga menjaga postur, mendukung keseimbangan, serta memfasilitasi fungsi vital lain seperti pernapasan. Proses ini berlangsung melalui mekanisme fisiologis yang diatur oleh sistem saraf, sehingga gerakan yang dihasilkan dapat presisi, terkoordinasi, dan adaptif terhadap kebutuhan. Pemahaman mengenai hubungan erat antara rangka, sendi, ligamen, dan otot penting bagi calon pendidik biologi, sebab pengetahuan tersebut menjadi dasar untuk menjelaskan bagaimana tubuh manusia dapat melakukan berbagai aktivitas tanpa disadari.

Dengan memahami prinsip dasar sistem gerak secara ilmiah sekaligus mengaitkannya dengan pengalaman nyata misalnya pentingnya peregangan sebelum olahraga atau menjaga postur duduk saat belajar mahasiswa calon guru akan lebih siap menanamkan kesadaran kesehatan gerak kepada peserta didik. Pengetahuan ini tidak hanya bermanfaat untuk menjelaskan anatomi dan fisiologi, tetapi juga mengajarkan penghargaan terhadap tubuh sebagai anugerah yang harus dijaga fungsinya sepanjang hayat.

2.1.1 Fungsi dan Kegunaan Sistem Rangka

Manusia memiliki rangka dalam (endoskeleton) yang tersusun atas jaringan tulang keras dan tulang rawan. Tulang keras berfungsi menopang tubuh dan melindungi organ vital, sedangkan tulang rawan menjaga kelenturan dan meredam benturan pada sendi. Rangka terbentuk dari tulang tunggal (misalnya humerus) maupun gabungan beberapa tulang yang saling berfusi seperti pada tengkorak. Stabilitas dan keluwesan sistem rangka ditunjang oleh jaringan ikat penunjang, yaitu ligamen yang menghubungkan satu tulang dengan tulang lain di daerah sendi, serta tendon yang menghubungkan otot ke tulang sehingga memungkinkan terjadinya gerakan. Keberadaan otot sebagai jaringan kontraktil melengkapi fungsi rangka, menjadikannya bukan hanya kerangka pasif tetapi juga sistem dinamis yang mendukung aktivitas, postur, dan ekspresi gerak manusia sehari-hari (Marieb & Hoehn, 2019).

Sistem rangka manusia menjalankan berbagai peran penting yang saling berkaitan dalam menopang kehidupan. Secara garis besar, sedikitnya terdapat lima fungsi utama yang dapat diuraikan sebagai berikut.

1. rangka berperan sebagai penopang dan penegak tubuh. Tulang membentuk kerangka yang menjaga postur sekaligus menjadi tempat melekatnya jaringan lunak dan organ, sehingga tubuh mempertahankan bentuk serta kestabilannya ketika berdiri maupun bergerak (Sherwood, 2022).
2. rangka berfungsi sebagai penyimpan mineral dan cadangan energi. Tulang mengandung berbagai mineral, terutama kalsium dan fosfat, yang penting

untuk kontraksi otot, transmisi impuls saraf, dan pembekuan darah. Saat kadar kalsium dalam plasma menurun, tubuh dapat mengambil cadangan tersebut dari matriks tulang. Selain itu, sumsum tulang kuning menyimpan lemak yang dapat dimobilisasi sebagai sumber energi ketika dibutuhkan (Marieb & Hoehn, 2019).

3. rangka berperan dalam pembentukan sel darah. Sumsum tulang merah yang terdapat di beberapa tulang seperti tulang pipih, tulang rusuk, sternum, dan epifisis tulang panjang menjadi lokasi hematopoiesis, yaitu proses pembentukan sel darah merah, sel darah putih, dan trombosit (Tortora & Derrickson, 2022). Peran ini memastikan pasokan komponen darah yang penting bagi transport oksigen, pertahanan imun, dan pembekuan.
4. rangka bertindak sebagai pelindung organ vital. Struktur tulang yang keras menyelubungi jaringan yang rentan. Misalnya, tengkorak melindungi otak, tulang rusuk dan sternum menjaga jantung serta paru, ruas-ruas tulang belakang mengamankan sumsum tulang belakang, sedangkan gelang panggul melindungi organ reproduksi dan sebagian saluran pencernaan (Sherwood, 2022).
5. rangka berfungsi sebagai alat pergerakan. Tulang berperan sebagai pengungkit yang digerakkan oleh otot rangka melalui sistem sendi. Ketika otot berkontraksi, gaya yang dihasilkan diteruskan ke tulang sehingga memungkinkan terjadinya gerakan seperti berjalan, menulis, atau mengangkat benda (Marieb & Hoehn, 2019) Dengan demikian bahwa rangka manusia bukan sekadar “kerangka mati”, melainkan jaringan hidup yang dinamis, mampu beradaptasi terhadap beban mekanis, menyimpan zat penting, dan

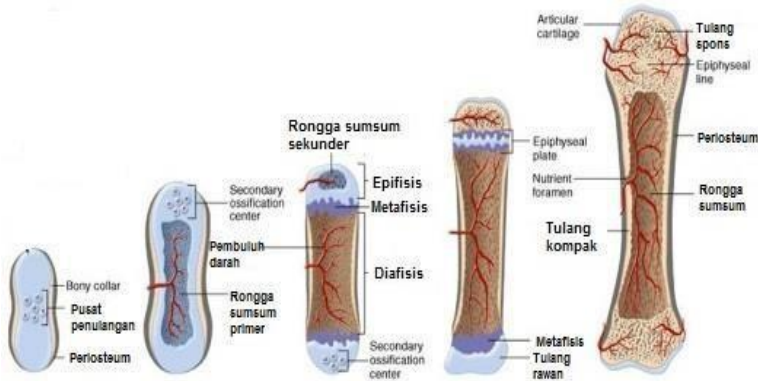
melindungi kelangsungan hidup organisme. Pengetahuan ini akan memudahkan penyampaian materi anatomi secara kontekstual dan humanis, misalnya dengan mengaitkan pentingnya asupan kalsium, aktivitas fisik, dan pencegahan cedera bagi kesehatan tulang sepanjang rentang kehidupan.

2.1.2 Perkembangan dan Pertumbuhan Tulang

Pada masa bayi, sebagian besar kerangka manusia masih berupa tulang rawan, jaringan ikat yang kaya kolagen sehingga bersifat padat sekaligus lentur. Kelenturan ini memungkinkan tubuh bayi lebih mudah beradaptasi terhadap proses kelahiran dan pertumbuhan awal. Seiring bertambahnya usia, sel-sel tulang rawan secara bertahap digantikan oleh tulang keras melalui proses mineralisasi, terutama oleh kalsium dan fosfat yang tersusun dalam pola lingkaran konsentris di sekitar sel-sel tulang.

Transformasi dari jaringan rawan menjadi jaringan tulang ini dikenal sebagai osifikasi, suatu mekanisme biologis penting yang memastikan rangka mampu menopang beban tubuh yang semakin besar (Hall, 2015). Di tulang panjang, terdapat lempeng epifisis daerah pertumbuhan yang secara aktif mengalami pembelahan sel sehingga menambah panjang tulang pada masa kanak-kanak dan remaja. Aktivitas epifisis inilah yang memungkinkan pertumbuhan linier anggota gerak hingga masa pubertas (Martin *et al.*, 2019). Selama proses ini, tulang menjadi lebih keras dan lebih berat, sementara sifat elastisitasnya menurun. Konsekuensinya, meskipun tulang dewasa lebih kuat menahan beban, ia juga lebih rentan patah ketika mengalami benturan melebihi ambang kekuatannya (Rho *et al.*, 2004). Pemahaman tentang dinamika perubahan ini penting bagi calon

pendidik, sebab kesehatan tulang sejak usia dini sangat menentukan kualitas hidup di masa mendatang.



Gambar 2. 1 Pembentukan Tulang
(Sumber:<http://www.slideshare.net/satyakiverma/stages-of-bone-formation>).

Pada fase embrio, sebagian besar tulang pipa awalnya berbentuk batang tulang rawan yang dibungkus oleh lapisan jaringan ikat tipis bernama perikondrium. Seiring perkembangan, muncul pusat osifikasi primer di bagian tengah batang tulang yang kelak dikenal sebagai diafisis. Di daerah ini, garam kalsium mulai tertimbun di dalam matriks ekstraseluler, sehingga jaringan rawan berangsur-angsur mengeras dan sel-sel tulang (osteoblas) bermunculan. Lapisan perikondrium kemudian berubah menjadi periosteum, yang berperan penting dalam pembentukan tulang baru. Pertumbuhan berikutnya berlangsung ke arah melingkar (menambah diameter) sekaligus memanjang, sehingga batang tulang bertambah besar dan panjang. Pada masa pertumbuhan, struktur tulang terdiri atas batang utama (diafisis) dan ujung tulang (epifisis) yang dipisahkan oleh lempeng pertumbuhan, tempat sel aktif

membelah hingga pertumbuhan linear berhenti menjelang dewasa.

2.1.2 Struktur Tulang dan Macam-Macam Tulang

Struktur rangka manusia tersusun dari ± 206 tulang yang berbeda ukuran, orientasi, dan bentuk. Bentuk tulang tidak ditetapkan secara kebetulan; ia merefleksikan adaptasi fungsional terhadap gaya mekanis, perlindungan organ, serta pergerakan. Klasifikasi tulang berdasarkan bentuk merupakan pendekatan anatomi yang membantu mahasiswa memahami hubungan struktur-fungsi. Umumnya, tulang dibagi menjadi lima kategori utama: tulang panjang, pendek, pipih, tidak beraturan, dan sesamoid.

1. Tulang Panjang

Tulang panjang memiliki sumbu longitudinal yang menonjol dengan dua ujung membulat yang disebut epifisis dan bagian tengah (diafisis) yang relatif silindris. Contoh klasik adalah humerus, radius, ulna, femur, tibia, dan fibula. Bentuk ini memungkinkan fungsi sebagai pengungkit untuk gerakan dan tumpuan berat badan. Rongga sumsum pada diafisis menyimpan sumsum kuning, sedangkan epifisis mengandung sumsum merah yang berperan dalam pembentukan sel darah (Marieb & Hoehn, 2022). Perancangan panjang tulang mendukung mekanika gerak: semakin panjang tuas, semakin besar gaya angkat yang dihasilkan otot untuk lokomosi.

2. Tulang Pendek

Tulang pendek memiliki dimensi panjang, lebar, dan tebal yang hampir setara sehingga berbentuk kuboid. Contoh terdapat pada karpal

(pergelangan tangan) dan tarsal (pergelangan kaki). Permukaan tulang pendek biasanya ditutupi kartilago hialin yang memungkinkan gesekan minimal di sendi. Fungsi utamanya adalah memberikan kestabilan sekaligus fleksibilitas gerak yang terbatas, misalnya gerakan fleksi-ekstensi kecil pada pergelangan (Saladin, 2020). Keberadaan tulang pendek membantu menyebarkan tekanan mekanis secara merata sehingga mencegah cedera akibat beban berulang.

3. Tulang Pipih

Tulang pipih dicirikan oleh dua lapisan tulang kompak yang mengapit lapisan spongiosa. Contoh meliputi tulang tengkorak, sternum, scapula, dan tulang rusuk. Struktur pipih menyediakan permukaan luas bagi perlekatan otot serta perlindungan organ vital. Tengkorak melindungi otak, sedangkan sternum dan tulang rusuk melindungi jantung serta paru. Tulang pipih juga kaya sumsum merah sehingga berperan penting dalam hematopoiesis, terutama pada orang dewasa (Marieb & Hoehn, 2022). Bentuk datar memungkinkan gaya yang datang dari berbagai arah didistribusikan merata, mengurangi risiko patah pada titik tekan tertentu.

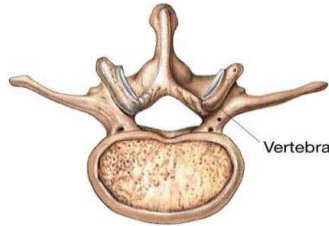


Gambar 2. 2 Struktur Tulang Pipih

(Sumber:<http://www.ikonet.com/en/visualdictionary/human-being/anatomy/skeleton/types-of-bones.php>)

4. Tulang Tidak Beraturan

Kategori ini mencakup tulang dengan bentuk kompleks yang tidak dapat digolongkan sebagai panjang, pendek, maupun pipih. Contoh utama adalah vertebra, os coxae (tulang panggul), dan beberapa tulang wajah seperti maxilla. Struktur tak beraturan ini memberikan keseimbangan antara kekuatan, perlindungan, dan mobilitas. Vertebra, misalnya, melindungi medula spinalis sekaligus memungkinkan pergerakan batang tubuh. Permukaan artikulasinya dirancang untuk menerima gaya kompresi tanpa mengorbankan fleksibilitas kolumna vertebralis (Saladin, 2020).



Gambar 2. 3 Tulang Tidak Beraturan

(Sumber:

<https://www.studyblue.com/notes/n/kine-3600-test-1/deck/15216137>)

5. Tulang Sesamoid

Tulang sesamoid berkembang di dalam tendon sebagai adaptasi untuk mengurangi gesekan, mengubah sudut tarikan otot, dan meningkatkan efisiensi gerak. Patela (tempurung lutut) adalah contoh terbesar. Tulang sesamoid kecil lainnya dapat ditemukan di tangan dan kaki. Keberadaannya memodifikasi gaya yang diteruskan dari otot ke tulang sehingga gerakan menjadi lebih halus dan tendon terlindungi dari tekanan berlebihan (Moore, Dalley, & Agur, 2023).



Gambar 2. 4 Tulang Sesamoid

(Sumber:<http://m.dev.tempo.co/read/news/2010/12/23/060301024/Mengatasi-Sesamoiditis>,
diunduh tanggal 3/9/2025)

2.1.4 Rangka Anggota Gerak (Apendikuler)

Sistem rangka manusia dibagi menjadi dua komponen besar: rangka aksial (tulang tengkorak, tulang belakang, rusuk) dan rangka apendikular (anggota gerak dan gelang penyambung). Rangka apendikular berperan penting dalam mobilitas, distribusi beban tubuh, dan interaksi lingkungan (Saladin, 2021). Komponen utamanya mencakup gelang bahu, lengan, tangan, gelang panggul, tungkai, kaki, serta struktur sendi.

1. Gelang Bahu

Gelang bahu dibentuk oleh tulang belikat (skapula) dan tulang selangka (klavikula). Kedua tulang ini menjadi penghubung antara rangka aksial (tulang dada) dengan anggota gerak atas. Struktur gelang bahu memberikan kestabilan sekaligus keleluasaan gerakan lengan. Posisi skapula yang relatif tipis dan mobil memungkinkan berbagai rentang gerak bahu, sementara klavikula bertindak sebagai penyangga

yang menjaga jarak skapula dari sternum (Marieb & Hoehn, 2019).

2. Lengan

Tulang utama pada lengan atas adalah humerus, yang melekat pada gelang bahu melalui sendi peluru di bagian bahu. Ujung distal humerus berartikulasi dengan radius dan ulna pada sendi engsel di siku, memungkinkan gerakan fleksibel seperti menekuk dan meluruskan lengan. Humerus berfungsi sebagai batang pengungkit yang mentransfer gaya otot bahu ke lengan bawah, sehingga penting untuk aktivitas angkat maupun dorong.

3. Tangan

Struktur tangan terdiri atas: Karpal (pergelangan tangan): delapan tulang kecil tersusun dua baris, empat di tiap baris, memungkinkan fleksibilitas gerak (fleksi, ekstensi, deviasi radial-ulnar). Metakarpal (telapak tangan): lima tulang yang menopang jaringan lunak telapak. Falanges (jari): masing-masing jari memiliki tiga ruas (proksimal, medial, distal), kecuali ibu jari yang hanya dua ruas. Posisi ibu jari yang oposabel memungkinkan manusia menggenggam dan memanipulasi objek dengan presisi (Standring, 2020).

4. Gelang Panggul

Gelang panggul dibentuk oleh penyatuan os ilium, os ischium, dan os pubis yang berfusi menjadi tulang panggul. Struktur ini menyokong berat tubuh saat berdiri dan berjalan, serta melindungi organ vital di rongga panggul seperti kandung kemih dan organ reproduksi. Kekuatan gelang panggul memungkinkan distribusi beban

tubuh ke tungkai bawah (Saladin, 2021). Berbeda dengan gelang bahu, gelang panggul lebih stabil dan kurang fleksibel karena fungsi utamanya menopang berat badan.

5. Tungkai

Femur (tulang paha) merupakan tulang terpanjang dan terkuat, menahan beban tubuh bagian atas serta menghasilkan gaya tumpuan untuk berjalan, berlari, dan melompat. Tibia (tulang kering) berada di sisi medial, menerima sebagian besar beban dari femur. Fibula (tulang betis) di sisi lateral lebih ramping, berperan dalam stabilitas pergelangan dan perlekatan otot. Patella (tempurung lutut) melindungi sendi lutut dan meningkatkan efisiensi otot paha melalui efek pengungkit (Marieb & Hoehn, 2019).

6. Kaki

Struktur kaki paralel dengan tangan tetapi lebih adaptif untuk menopang berat. Komponen utamanya meliputi:

- Tarsal (pergelangan kaki): tujuh tulang, termasuk calcaneus (tumit) yang menjadi titik tumpu beban.
- Metatarsal (telapak kaki): lima tulang yang menjaga lengkung kaki.
- Falanges (jari kaki): empat jari memiliki tiga ruas, sedangkan ibu jari kaki hanya dua ruas. Lengkung kaki berperan sebagai penyerap guncangan ketika berjalan atau berlari (Standring, 2020).

7. Sendi

Sendi adalah tempat bertemunya dua tulang, diperkuat oleh ligamen dan digerakkan oleh tendon otot. Secara fungsional, sendi dibagi menjadi:

- a. Sendi gerak bebas (diarthrosis): misalnya sendi peluru pada bahu dan pinggul.
- b. Sendi gerak terbatas (amphiarthrosis): misalnya pertautan antarruas tulang belakang.
- c. Sendi mati (synarthrosis): misalnya sutura pada tengkorak (Marieb & Hoehn, 2019).

2.2 Sistem Otot Manusia

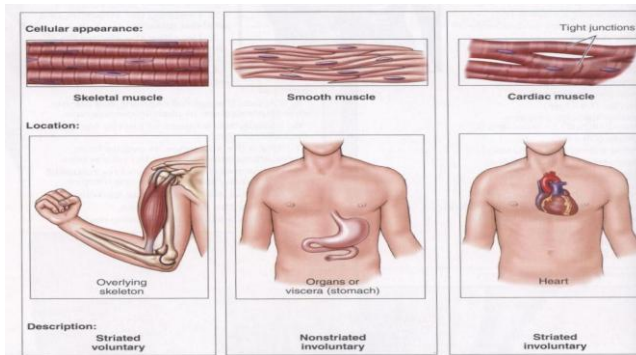
Gerakan tubuh manusia tidak mungkin terjadi tanpa jaringan otot. Otot berperan sebagai penghasil gaya, penopang postur, dan pengatur fungsi vital. Berdasarkan ciri mikroskopis dan mekanisme pengendaliannya, jaringan otot manusia dibagi menjadi tiga kategori utama (Marieb & Hoehn, 2022).

1. Otot Lurik (*Skeletal Muscle*)

Otot lurik mendapat sebutan demikian karena penampakan bergaris-garis terang dan gelap di bawah mikroskop, akibat keteraturan sarkomer dalam myofibril. Jaringan ini melekat pada tulang melalui tendon dan berperan penting dalam gerakan sadar misalnya mengangkat tangan atau berjalan. Pengendaliannya berada di bawah sistem saraf somatik sehingga manusia dapat mengatur kontraksi sesuai keinginan (Guyton & Hall, 2021). Selain fungsi motorik, otot lurik juga mendukung stabilitas sendi dan produksi panas tubuh melalui mekanisme kontraksi.

2. Otot Polos (*Smooth Muscle*)

Berbeda dari otot lurik, otot polos tidak memperlihatkan garis-garis melintang sehingga tampak “halus” di bawah mikroskop. Sel-selnya berbentuk gelendong dengan satu inti di tengah. Otot polos bekerja secara tak sadar, dikendalikan oleh sistem saraf otonom. Keberadaannya dominan pada dinding organ dalam seperti usus, pembuluh darah, rahim, dan saluran kemih. Fungsi utamanya ialah mengatur diameter pembuluh, menggerakkan isi usus, dan memfasilitasi proses fisiologis otomatis lain yang tidak memerlukan kontrol sadar (Marieb & Hoehn, 2022). Otot Jantung (*Cardiac Muscle*) Otot jantung bersifat unik karena bergaris melintang seperti otot lurik, tetapi pengendaliannya tidak disadari. Sel-selnya memiliki percabangan dan dihubungkan oleh diskus interkalaris yang memungkinkan impuls menyebar cepat dari satu sel ke sel lain sehingga jantung dapat berdenyut ritmis. Kontraksi otot jantung berlangsung otomatis berkat keberadaan jaringan pacu jantung (*nodus sinoatrial*). Fungsi utamanya jelas: memompa darah ke seluruh tubuh sepanjang hidup tanpa henti (Guyton & Hall, 2021).



Gambar 2. 5 Tiga Jenis Otot Meliputi Otot Rangka, Otot Polos dan Otot Jantung. (Sherwood,2022)

2.2.1 Stuktur Anatomi Otot

Setiap otot tersusun atas beberapa lapisan jaringan ikat yang bekerja serempak menjaga bentuk, kekuatan, serta kemampuan berkontraksi. Lapisan terluar disebut epimisium, jaringan ikat padat yang membungkus seluruh massa otot sekaligus menghubungkannya dengan jaringan sekitarnya, sehingga otot mempertahankan integritas bentuk dan mampu mentransmisikan gaya ke tendon. Di bawah epimisium, serabut-serabut otot dikelompokkan menjadi fasikulus, masing-masing dibalut perimisium. Pola pengelompokan ini tidak hanya memperkuat otot, tetapi juga memberi fleksibilitas sehingga otot dapat menahan regangan tanpa kehilangan kestabilan.

Setiap serabut otot sel panjang dengan banyak inti masih diselimuti lapisan jaringan ikat halus yang disebut endomisium. Lapisan tipis ini memfasilitasi suplai kapiler dan saraf ke setiap sel sehingga kontraksi dapat terkoordinasi. Di dalam sitoplasma (sarkoplasma) serabut otot terdapat ratusan hingga ribuan myofibril,

struktur silindris menyerupai benang yang tersusun atas unit berulang bernama sarkomer. Sarkomer mengandung filamen tipis aktin dan filamen tebal miosin yang akan saling bergeser selama kontraksi, menyebabkan serabut memendek dan menghasilkan gaya mekanik (Guyton & Hall, 2021).

Myofibril diselimuti retikulum sarkoplasma, gudang penyimpanan ion kalsium yang dilepaskan saat kontraksi dimulai. Keberadaan tubulus transversal (T-tubule) memungkinkan impuls listrik dari membran sel menjalar cepat ke seluruh bagian serabut sehingga setiap sarkomer berkontraksi hampir bersamaan. Sementara itu, mitokondria yang melimpah di dalam serabut menyediakan ATP yang menjadi sumber energi utama. Sel otot memanfaatkan cadangan fosfokreatin, glikogen, serta jalur metabolisme aerob dan anaerob untuk memastikan suplai energi tetap terjaga, terutama ketika terjadi aktivitas fisik intens. Keteraturan struktur berlapis-lapis inilah yang membuat jaringan otot mampu mengubah energi kimia menjadi gaya gerak secara efisien, memungkinkan tubuh manusia bergerak, mempertahankan postur, dan beradaptasi terhadap tuntutan fisik yang beragam.

2.2.2 Cara Kerja Otot

Gerakan tubuh manusia bergantung pada koordinasi rangka dan otot. Setiap gerakan terjadi karena perubahan panjang serabut otot yang berkontraksi atau berelaksasi, menghasilkan gaya yang diteruskan melalui tendon ke tulang. Tidak ada satu otot pun yang dapat melakukan semua gerakan sendiri; sebagian besar gerakan memerlukan kerja sama beberapa otot secara teratur (Marieb & Hoehn, 2022).

Otot sinergis adalah sekelompok otot yang berkontribusi bersama untuk menghasilkan gerakan yang sama atau mendukung fungsi utama suatu otot. Ketika satu otot primer berkontraksi, otot-otot sinergis membantu menstabilkan sendi atau memperkuat gaya tarik sehingga gerakan berlangsung lebih efisien (Tortora & Derrickson, 2021). Kerja otot sinergis bersifat searah, memperkuat gerakan utama, serta dapat menahan gerakan yang tidak diinginkan. Contoh yang mudah diamati adalah seluruh otot pronator pada lengan bawah yang bersama-sama menelungkupkan telapak tangan, dan kelompok otot supinator yang menengadahkan telapak tangan.

Sebaliknya, otot antagonis merupakan pasangan otot atau lebih yang melakukan gerakan berlawanan pada sendi yang sama. Ketika satu otot berkontraksi, pasangannya harus relaksasi agar gerakan dapat berlangsung. Mekanisme ini memungkinkan tubuh kembali ke posisi semula atau melakukan gerakan terbalik dengan presisi (Marieb & Hoehn, 2022). Hubungan antagonis dicirikan oleh kerja yang saling menyeimbangkan sehingga menghasilkan gerakan yang berkebalikan dan mengontrol kecepatan maupun kekuatan gerak. Contoh klasik adalah otot bisep dan trisep di lengan atas; bisep berkontraksi untuk menekuk siku (fleks) sementara trisep berelaksasi, lalu sebaliknya ketika meluruskan siku (ekstensi) trisep berkontraksi dan bisep berelaksasi. Selain itu terdapat beberapa pasangan antagonis lain, antara lain flektor dengan ekstensor, abduktor dengan adduktor, supinator dengan pronator, serta elevator dengan depressor. Keberadaan pasangan antagonis menjamin tubuh dapat

bergerak maju, mundur, menekuk, dan meluruskan dengan terkoordinasi tanpa kehilangan keseimbangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2021). Textbook of medical physiology. Elsevier.
- Hall, B. K. (2015). Bones and cartilage: Developmental and evolutionary skeletal biology. Academic Press.
- Marieb, E. N., & Hoehn, K. (2019). Human anatomy & physiology. Pearson.
- Marieb, E. N., & Hoehn, K. (2022). Human anatomy & physiology. Pearson.
- Martin, R. B., Burr, D. B., & Sharkey, N. A. (2019). Skeletal tissue mechanics (2nd ed.). Springer.
- Moore, K. L., Dalley, A. F., & Agur, A. M. R. (2023). Clinically oriented anatomy. Wolters Kluwer.
- Rho, J. Y., Kuhn-Spearing, L., & Zioupos, P. (2004). Mechanical properties and the hierarchical structure of bone. *Medical Engineering & Physics*, 26(5), 411–422.
- Saladin, K. S. (2020). Anatomy & physiology: The unity of form and function. McGraw-Hill.
- Saladin, K. S. (2021). Anatomy & physiology: The unity of form and function. McGraw-Hill.
- Sherwood, L. (2022). Human physiology: From cells to systems. Cengage.
- Standring, S. (2020). Gray's anatomy: The anatomical basis of clinical practice. Elsevier.
- Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2021). Principles of anatomy and physiology. Wiley.
- Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2022). Principles of anatomy and physiology. Wiley.
- Widodo, A. (2021). Anatomi fisiologi untuk pendidikan IPA. Pustaka Pelajar.

BAB 3

SISTEM KARDIOVASKULAR DAN RESPIRASI: TRANSPORTASI DAN PERTUKARAN GAS

3.1 Pendahuluan

Tubuh manusia merupakan suatu sistem yang kompleks dengan berbagai organ yang saling berinteraksi untuk menjaga kelangsungan hidup. Dua di antara sistem yang memiliki keterkaitan paling erat adalah sistem kardiovaskular dan sistem respirasi (Wilkins *et al.*, 2020). Keduanya bekerja sama untuk memastikan suplai oksigen yang cukup menuju jaringan tubuh sekaligus membuang karbon dioksida hasil metabolisme. Proses transportasi dan pertukaran gas ini sangat penting, karena tanpa oksigen sel tidak dapat menghasilkan energi, sedangkan akumulasi karbon dioksida yang berlebihan dapat menimbulkan gangguan serius pada keseimbangan asam-basa tubuh.

Sistem kardiovaskular berfungsi sebagai jalur distribusi, di mana jantung memompa darah yang membawa oksigen dan nutrisi ke seluruh tubuh, serta mengembalikan karbon dioksida dan sisa metabolisme untuk dikeluarkan. Sementara itu, sistem respirasi berperan sebagai pintu masuk oksigen dari udara dan tempat keluarnya karbon dioksida dari tubuh

melalui proses pernapasan. Kedua sistem ini saling melengkapi dalam menjaga homeostasis, yaitu kestabilan lingkungan internal tubuh.

Pemahaman mengenai mekanisme transportasi dan pertukaran gas bukan hanya penting bagi mahasiswa biologi atau kedokteran, tetapi juga bermanfaat bagi masyarakat umum. Hal ini karena kesehatan jantung dan paru-paru sangat dipengaruhi oleh pola hidup sehari-hari, seperti aktivitas fisik, pola makan, serta kebiasaan yang dapat mendukung atau justru merusak fungsi kedua sistem tersebut.

Dengan mempelajari sistem kardiovaskular dan respirasi secara terintegrasi, pembaca diharapkan mampu memahami bagaimana tubuh mempertahankan kehidupan melalui proses yang tampak sederhana seperti bernapas dan berdetak, namun sesungguhnya melibatkan mekanisme biologis yang sangat kompleks dan menakjubkan.

3.2 Sistem Kardiovaskuler

Sistem kardiovaskular manusia adalah sistem organ yang mengalirkan darah melalui pembuluh darah ke dan dari seluruh tubuh, membawa nutrisi dan oksigen ke jaringan serta membuang karbon dioksida dan limbah lainnya. Sistem ini merupakan sistem tubular tertutup di mana darah didorong oleh jantung yang berotot. Mencakup dua jalur, yaitu pulmonal dan sistemik, terdiri dari komponen arteri, kapiler, dan vena.

Fungsi utama jantung adalah sebagai pompa otot yang memompa darah ke dalam dan melalui pembuluh darah ke dan dari seluruh tubuh (Weitz & Fuster, 2022). Arteri, yang menerima darah ini dengan tekanan dan kecepatan tinggi serta mengalirkannya ke seluruh tubuh, memiliki dinding

tebal yang terdiri dari jaringan fibrosa elastis dan sel-sel otot pohon arteri berakhir di pembuluh darah pendek, sempit, dan berotot yang disebut arteriol, tempat darah memasuki tabung endotel sederhana (yaitu tabung yang terbentuk dari sel-sel endotel, atau lapisan,) yang dikenal sebagai kapiler. Kapiler tipis dan mikroskopis ini permeabel terhadap nutrisi seluler vital dan produk limbah yang diterima dan didistribusikannya. Dari kapiler, darah, yang kini kekurangan oksigen dan terbebani produk limbah, bergerak lebih lambat dan di bawah tekanan rendah, memasuki pembuluh kecil yang disebut vena yang bertemu membentuk vena, yang akhirnya mengarahkan darah dalam perjalanan kembali ke jantung.

3.2.1 Struktur dan Fungsi

- Jantung

Jantung manusia dewasa biasanya sedikit lebih besar dari kepalan tangan, dengan dimensi rata-rata sekitar $13 \times 9 \times 6$ cm ($5 \times 3,5 \times 2,5$ inci) dan berat sekitar 10,5 ons (300 gram). Bentuknya kerucut, dengan dasar lebar mengarah ke atas dan ke kanan dan puncaknya mengarah ke bawah dan ke kiri. Terletak di rongga dada (toraks) di belakang tulang dada (sternum), di depan trakea (trakea), esofagus, dan aorta desendens, di antara paru-paru, dan di atas diafragma (partisi otot antara rongga dada dan rongga perut). Sekitar dua pertiga jantung terletak di sebelah kiri garis tengah.

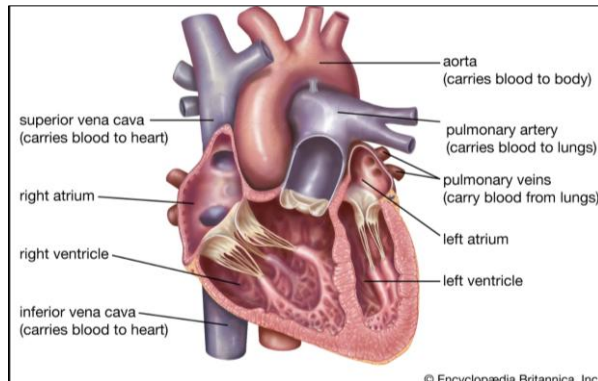
Jantung tersuspensi dalam kantung membrannya sendiri, yaitu perikardium. Bagian

luar kantung yang kuat, atau perikardium fibrosa, melekat erat pada diafragma di bawah, pleura mediastinal di samping, dan sternum di depan. Pleura ini secara bertahap menyatu dengan lapisan vena cava superior dan arteri serta vena pulmonalis (paru-paru) yang menuju dan dari jantung. Ruang antara paru-paru, mediastinum, dibatasi oleh pleura mediastinum, kelanjutan dari membran yang melapisi dada. Vena kava superior merupakan saluran utama darah vena dari dada, lengan, leher, dan kepala.

Selaput serosa halus (yang mengeluarkan cairan) melapisi perikardium fibrosa, lalu melengkung ke belakang dan menutupi jantung. Bagian membran yang melapisi perikardium fibrosa dikenal sebagai lapisan serosa parietal (perikardium parietal), yang menutupi jantung sebagai lapisan serosa viseral (perikardium viseral atau epikardium).

Dua lapisan membran serosa biasanya hanya dipisahkan oleh 10 hingga 15 ml (0,6 hingga 0,9 inci kubik) cairan. Cairan perikardial, yang disekresikan oleh membran serosa. Ruang sempit yang terbentuk akibat pemisahan ini disebut Rongga perikardium. Cairan perikardium melumasi kedua membran tersebut setiap kali jantung berdetak, sementara permukaannya saling bergesekan. Cairan disaring ke dalam rongga perikardium melalui perikardium viseral dan parietal (Pappano & Wier, 2022).

Jantung terbagi oleh septa, atau partisi, menjadi bagian kanan dan kiri, dan masing-masing bagian dibagi lagi menjadi dua ruang. Ruang atas, atrium, dipisahkan oleh partisi yang dikenal sebagai septum interatrial; ruang bawah, ventrikel, dipisahkan oleh septum interventrikular. Atrium menerima darah dari berbagai bagian tubuh dan mengalirkannya ke ventrikel. Ventrikel, selanjutnya, memompa darah ke paru-paru dan ke seluruh tubuh (Weitz & Fuster, 2022).



Gambar 3. 1 Potongan Melintang Jantung Manusia

Atrium, atau bagian kanan atas jantung, adalah ruang berdinding tipis yang menerima darah dari semua jaringan kecuali paru-paru. Tiga vena bermuara ke atrium kanan, vena kava superior dan inferior, yang masing-masing membawa darah dari bagian atas dan bawah tubuh, dan vena kava inferior. Sinus koroner, yang mengalirkan darah dari jantung itu sendiri. Darah

mengalir dari atrium kanan ke ventrikel kanan. Ventrikel kanan, bagian kanan bawah jantung, adalah ruang tempat darah mengalir. Arteri pulmonalis membawa darah ke paru-paru.

Atrium kiri, bagian kiri atas jantung, sedikit lebih kecil daripada atrium kanan dan memiliki dinding yang lebih tebal. Atrium kiri menerima empat Vena pulmonalis, yang membawa darah beroksigen dari paru-paru. Darah mengalir dari atrium kiri ke ventrikel kiri. Ventrikel kiri, bagian kiri bawah jantung, memiliki dinding tiga kali lebih tebal daripada ventrikel kanan. Darah dipaksa dari bilik ini melalui aorta ke seluruh tubuh kecuali paru-paru.

Alur dangkal disebut interventrikular sulkus, yang berisi pembuluh darah, menandai pemisahan antara ventrikel pada permukaan depan dan belakang jantung. Terdapat dua alur pada permukaan luar jantung. Satu, alur atrioventrikular, terletak di sepanjang garis pertemuan atrium kanan dan ventrikel kanan; alur ini berisi cabang arteri koroner kanan (arteri koroner yang mengalirkan darah ke otot jantung). Sulkus interventrikular anterior, berjalan di sepanjang garis antara ventrikel kanan dan kiri dan mengandung cabang arteri koroner kiri.

Di sisi posterior permukaan jantung, terdapat alur yang disebut sulkus longitudinal posterior menandai pemisahan antara ventrikel kanan dan kiri; sulkus ini mengandung cabang lain dari arteri koroner. Alur keempat, di antara atrium

kiri dan ventrikel, menampung sinus koroner, saluran untuk darah vena (Pagliaro *et al.*, 2022).

Untuk mencegah aliran balik darah, jantung dilengkapi dengan katup yang memungkinkan darah mengalir hanya dalam satu arah. Terdapat dua jenis katup yang terletak di jantung: katup atrioventrikular (trikuspid dan mitral) dan katup semilunar (pulmonal dan aorta).

Katup atrioventrikular adalah struktur tipis seperti daun yang terletak di antara atrium dan ventrikel. Lubang atrioventrikular kanan dijaga oleh Katup trikuspid, disebut demikian karena terdiri dari tiga daun katup yang bentuknya tidak beraturan. Daun katup pada dasarnya terdiri dari lipatan endokardium (selaput yang melapisi jantung) yang diperkuat dengan lembaran datar jaringan ikat padat. Di pangkal daun katup, pelat datar penyangga di tengah menyambung dengan pelat jaringan ikat padat pada tonjolan yang mengelilingi bukaan.

Tali tendon dari jaringan padat (korda tendinea) yang dilapisi endokardium tipis memanjang dari otot papiler yang menyerupai puting untuk terhubung dengan permukaan ventrikel lapisan penyangga tengah setiap daun katup. Korda tendinea dan otot papiler tempat keduanya muncul membatasi sejauh mana bagian katup di dekat tepi bebasnya dapat mengembang ke arah atrium. Bukaan atrioventrikular kiri dijaga oleh Katup mitral, atau bikuspid, dinamakan demikian karena terdiri dari dua daun katup.

Katup mitral terpasang dengan cara yang sama seperti katup trikuspid, tetapi lebih kuat dan lebih tebal karena ventrikel kiri pada dasarnya merupakan pompa yang lebih kuat yang bekerja di bawah tekanan tinggi.

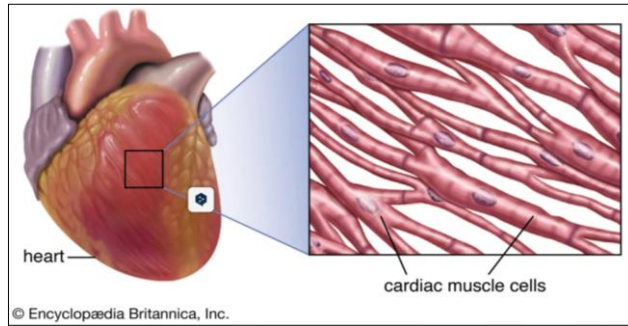
Darah didorong melalui katup trikuspid dan mitral saat atrium berkontraksi. Ketika ventrikel berkontraksi, darah dipaksa kembali, melewati celah antara flap dan dinding ventrikel. Flap-flap tersebut kemudian didorong ke atas hingga bertemu dan menyatu, membentuk sekat yang utuh antara atrium dan ventrikel. Flap katup yang mengembang ditahan oleh korda tendinea dan otot papiler agar tidak membuka ke atrium.

Katup semilunar adalah struktur seperti kantong yang melekat pada titik keluarnya arteri pulmonalis dan aorta dari ventrikel. Katup pulmonal melindungi lubang antara ventrikel kanan dan arteri pulmonalis. Katup aorta melindungi lubang antara ventrikel kiri dan aorta. Tiga daun katup semilunaris aorta dan dua daun katup pulmonalis lebih tipis daripada daun katup atrioventrikular, tetapi keduanya memiliki konstruksi umum yang sama, kecuali tidak memiliki korda tendinea (Levick, 2018).

Penutupan katup jantung dikaitkan dengan suara yang dapat didengar, disebut detak jantung. Bunyi pertama terjadi ketika katup mitral dan trikuspid menutup, dan bunyi kedua terjadi ketika katup semilunar pulmonal dan aorta menutup. Bunyi jantung yang khas ini diketahui disebabkan

oleh getaran dinding jantung dan pembuluh darah utama di sekitar jantung. Bunyi jantung pertama berfrekuensi rendah terdengar ketika ventrikel berkontraksi, menyebabkan aliran balik darah secara tiba-tiba yang menutup katup dan menyebabkannya mengembang kembali. Elastisitas katup kemudian menyebabkan darah memantul kembali ke masing-masing ventrikel. Efek ini membuat dinding ventrikel bergetar, dan getaran tersebut menjauhi katup. Ketika getaran mencapai dinding dada tempat dinding tersebut bersentuhan dengan jantung, gelombang suara tercipta yang dapat didengar dengan bantuan stetoskop.

Bunyi jantung kedua dihasilkan dari getaran yang terbentuk di dinding arteri pulmonalis, aorta, dan, pada tingkat yang lebih rendah, ventrikel, saat darah bergema bolak-balik di antara dinding arteri dan katup setelah katup semilunaris pulmonalis dan aorta tiba-tiba menutup. Getaran ini kemudian terdengar sebagai suara berfrekuensi tinggi saat dinding dada mengubah getaran menjadi gelombang suara. Bunyi jantung pertama diikuti setelah jeda singkat oleh bunyi jantung kedua. Jeda sekitar dua kali lebih lama terjadi antara bunyi kedua dan awal siklus berikutnya. Pembukaan katup berlangsung tanpa suara (Mohrman & Heller, 2022).



Gambar 3. 2 Otot Lurik di Jantung Manusia

Dinding jantung terdiri dari tiga lapisan yang berbeda lapisan epikardium (lapisan luar), miokardium (lapisan tengah), dan endokardium (lapisan dalam). Pembuluh koroner yang memasok darah arteri ke jantung menembus epikardium sebelum memasuki miokardium. Lapisan luar ini, atau perikardium viseral, terdiri dari permukaan sel-sel epitel pipih (penutup) yang bertumpu pada jaringan ikat (Levick, 2018).

Lapisan miokardium mengandung elemen-elemen kontraktil jantung. Berkas-berkas serat otot lurik yang terdapat dalam miokardium tersusun dalam pola percabangan dan menghasilkan gerakan seperti meremas yang secara efisien memeras darah dari jantung setiap kali berdetak. Ketebalan miokardium bervariasi sesuai dengan tekanan yang dihasilkan untuk mengalirkan darah ke tujuannya. Oleh karena itu, miokardium ventrikel kiri, yang harus memompa darah keluar ke sirkulasi sistemik, adalah yang paling tebal; miokardium ventrikel kanan, yang

memompa darah ke paru-paru, agak menebal, sementara dinding atrium relatif tipis (Levick, 2018).

Komponen miokardium yang menyebabkan kontraksi terdiri dari serat otot yang terdiri dari sel-sel otot jantung. Setiap sel mengandung serat yang lebih kecil yang dikenal sebagai miofibril yang mengandung unit-unit kontraktile yang sangat terorganisir yang disebut sarkomer. Fungsi mekanis yang timbul dari sarkomer dihasilkan oleh protein kontraktile spesifik yang dikenal sebagai aktin dan miosin (atau filamen tipis dan tebal). Sarkomer, yang terdapat di antara dua garis Z (atau cakram Z) pada serat otot, mengandung dua populasi filamen aktin yang menjorok dari garis Z yang berlawanan secara antiparalel dan tersusun di sekitar filamen miosin tebal. Saat aktin meluncur di sepanjang jembatan silang yang menjorok dari filamen miosin secara berkala, setiap miosin bersentuhan dengan filamen miosin di sebelahnya. Proses ini memperpendek serat otot dan menyebabkan kontraksi.

Interaksi antara aktin dan miosin diatur oleh berbagai proses biologis yang umumnya berhubungan dengan konsentrasi kalsium di dalam sel. Proses aktin yang meluncur di atas miosin membutuhkan kalsium dan energi dalam jumlah besar. Sementara mesin kontraktile menempati sekitar 70 persen volume sel jantung, mitokondria menempati sekitar 25 persen dan menyediakan energi yang diperlukan untuk

kontraksi. Untuk memfasilitasi konduktansi energi dan kalsium dalam sel otot jantung, sambungan unik yang disebut diskus interkalatus (*gap junction*) menghubungkan sel-sel dan menentukan batasnya. Diskus interkalatus merupakan portal utama untuk komunikasi antarsel jantung, yang diperlukan untuk kontraksi otot yang terkoordinasi dan pemeliharaan sirkulasi (Levick, 2018).

Lapisan tipis yang membentuk permukaan bagian dalam dinding miokardium disebut endokardium. Lapisan ini melapisi rongga jantung, menutupi katup dan otot-otot kecil yang berperan dalam membuka dan menutupnya katup, dan merupakan kelanjutan dari membran pelapis pembuluh darah besar.

Karena lapisan jantung yang kedap air (endokardium) dan ketebalan miokardium, jantung tidak dapat bergantung pada darah yang terkandung di dalam bilik-biliknya sendiri untuk mendapatkan oksigen dan nutrisi. Jantung memiliki sistem pembuluh darahnya sendiri, yang disebut Sistem arteri koroner. Dalam distribusi yang paling umum, sistem ini terdiri dari dua arteri koroner utama, kanan dan kiri; normalnya, arteri koroner kiri bercabang segera setelah asalnya menjadi dua cabang utama, yang disebut arteri koroner desendens anterior kiri dan arteri koroner sirkumfleks. Arteri koroner kanan, arteri koroner desendens anterior kiri, dan arteri koroner sirkumfleks kiri memiliki banyak cabang dan

hampir sama pentingnya. Dengan demikian, umumnya dikatakan terdapat tiga arteri koroner fungsional utama, bukan dua.

Arteri koroner kanan dan kiri berasal dari kanan dan kirisinus aorta (sinus Valsalva), yang merupakan tonjolan pada asal aorta ascendens tepat di luar, atau distal dari, katup aorta. Ostium, atau muara, arteri koroner kanan berada di sinus aorta kanan, sementara ostium arteri koroner kiri berada di sinus aorta kiri, tepat di atas cincin katup aorta. Terdapat pula sinus Valsalva non-koroner, yang terletak di sebelah kiri dan posterior pada pangkal aorta ascendens. Sistem arteri koroner kiri lebih penting daripada kanan karena mensuplai darah ke ventrikel kiri yang lebih besar, dan dimensi ostium koroner kiri lebih besar daripada kanan.

Arteri koroner kanan memiliki diameter lumen sekitar 2,5 mm (0,1 inci) atau lebih. Arteri ini mensuplai traktus keluar ventrikel kanan, nodus sinoatrial (alat pacu jantung utama), nodus atrioventrikular, dan sebagian besar ventrikel kanan, dengan cabang-cabang yang memanjang ke dalam septum interventrikular dan bergabung dengan cabang-cabang arteriol dari arteri koroner kiri, kurang lebih di titik pertemuan kedua ventrikel.

Batang utama arteri koroner kiri memiliki diameter luminal yang sering melebihi 4,5 mm (0,2 inci) dan merupakan salah satu pembuluh terpendek dan terpenting di dalam tubuh.

Biasanya, panjangnya antara 1 dan 2 cm (0,4 dan 0,8 inci), tetapi mungkin panjangnya hanya 2 mm (0,08 inci) sebelum terbagi. Kadang-kadang arteri koroner kiri utama sebenarnya mungkin hilang, dengan ostium koroner kiri memiliki dua bukaan terpisah untuk arteri desendens anterior kiri dan arteri sirkumfleks kiri. Arteri koroner kiri utama terbagi menjadi dua cabangnya, desendens anterior dan sirkumfleks, saat masih berada di ruang antara aorta dan arteri pulmonalis. Arteri koroner desendens anterior kiri biasanya dimulai sebagai kelanjutan dari arteri koroner utama kiri, dan ukuran, panjang, dan distribusinya merupakan faktor kunci dalam keseimbangan suplai darah ke ventrikel kiri dan septum interventrikular. Ada banyak cabang dari arteri desendens anterior kiri; Cabang septum yang pertama dan biasanya yang terbesar penting karena perannya yang utama dalam memasok darah ke septum.

Arteri sirkumfleks kiri meninggalkan arteri koroner utama kiri dan berjalan ke arah posterior sepanjang sulkus atrioventrikular. Arteri ini bercabang segera setelah asalnya menjadi cabang atrium dan cabang marginal tumpul. Cabang pertama terkadang memiliki cabang ke nodus sinoatrial (lebih sering disuplai dari arteri koroner kanan). Pembuluh marginal tumpul mensuplai dinding posterior ventrikel kiri ke arah apeks.

Darah vena dari jantung dibawa melalui vena, yang biasanya menyertai distribusi arteri distal. Vena jantung, bagaimanapun, melanjutkan

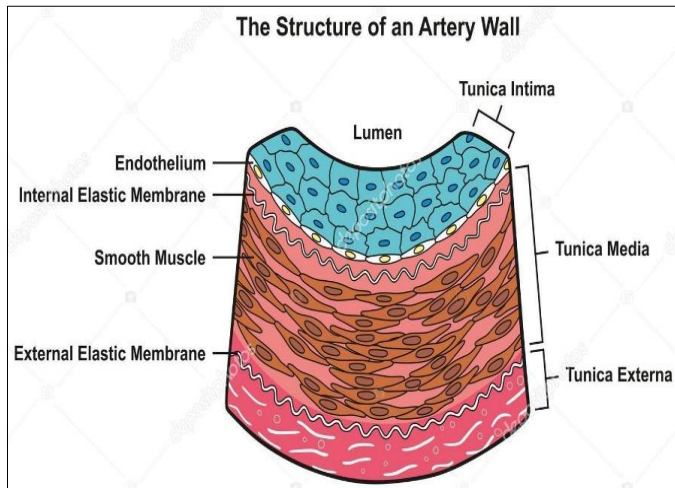
ke alur atrioventrikular di anterior dan posterior untuk membentuk sinus vena koroner, yang membuka ke atrium kanan.

Selain saluran arteri dan vena anatomis yang dapat diidentifikasi ini, pertukaran nutrisi hampir pasti terjadi antara lapisan otot ventrikel endokardium dan darah di rongga ventrikel. Hal ini tidak terlalu penting dan kemungkinan merupakan sistem adaptif dalam situasi patologi otot jantung.

- **Pembuluh darah**

Pembuluh darah terdiri dari sistem tabung tertutup yang mengangkut darah ke seluruh tubuh dan kembali ke jantung. Sebagaimana dalam sistem biologis lainnya, struktur dan fungsi pembuluh darah sangat erat kaitannya sehingga yang satu tidak dapat dibahas tanpa mempertimbangkan yang lain.

Arteri mengangkut darah ke jaringan tubuh di bawah tekanan tinggi, yang dihasilkan oleh aksi pemompaan jantung. Jantung memompa darah ke dalam tabung elastis ini, yang kemudian berputar kembali, mengirimkan darah dalam gelombang yang berdenyut. Oleh karena itu, sangat penting bagi pembuluh darah untuk memiliki dinding yang kuat dan elastis guna memastikan aliran darah yang cepat dan efisien ke jaringan.



Gambar 3. 3 Lapisan Dinding Pembuluh Arteri

Dinding arteri terdiri dari tiga lapisan, yaitu tunika intima, lapisan paling dalam, terdiri dari permukaan bagian dalam yang halus endotelium yang dilapisi oleh permukaan jaringan elastis. Tunika media, atau lapisan tengah, lebih tebal di arteri, terutama di arteri besar, dan terdiri dari sel-sel otot polos yang bercampur dengan serat elastis. Sel-sel otot dan serat elastis mengelilingi pembuluh darah. Pada pembuluh darah yang lebih besar, tunika media terutama terdiri dari serat elastis. Seiring arteri mengecil, jumlah serat elastis berkurang sementara jumlah serat otot polos meningkat. Tunika adventitia, lapisan terluar, adalah yang terkuat dari ketiga lapisan. Lapisan ini terdiri dari serat kolagen dan elastis. Tunika adventitia menyediakan penghalang pembatas, melindungi pembuluh darah dari ekspansi

berlebihan. Ciri khas lapisan ini adalah adanya pembuluh darah kecil yang disebut *Vasa vasorum* yang memasok darah ke dinding arteri dan vena yang lebih besar. Sebaliknya, lapisan dalam dan tengah menerima nutrisi melalui difusi dari darah saat diangkut. Dinding arteri yang lebih tebal dan lebih elastis memungkinkan arteri untuk mengembang seiring denyut nadi dan kembali ke ukuran aslinya.

Transisi dari arteri ke arteriol, adalah arteriol yang berkembang secara bertahap, ditandai dengan penipisan dinding pembuluh darah secara progresif dan penurunan ukuran lumen, atau salurannya. Pada arteriol, tunika intima masih terdapat sebagai lapisan yang dilapisi oleh serat longitudinal tipis; namun, tunika media tidak lagi mengandung serat elastis dan hanya terdiri dari satu lapisan serat otot polos sirkular atau spiral. Tunika adventitia terdiri dari elemen jaringan ikat.

Arteri kecil dan arteriol bertindak sebagai katup pengontrol yang mengalirkan darah ke kapiler. Dinding ototnya yang kuat mampu menutup saluran tersebut atau memungkinkannya mengembang beberapa kali lipat ukuran normalnya, sehingga sangat mengubah aliran darah ke kapiler. Aliran darah diarahkan oleh alat ini ke jaringan yang paling membutuhkannya.

Seiring arteriol mengecil, ketiga lapisannya menjadi semakin tidak jelas, dengan arteriol terkecil hanya terdiri dari endotelium, atau lapisan, yang dikelilingi oleh lapisan otot polos.

Tubulus kapiler mikroskopis terdiri dari satu lapisan endotelium yang merupakan kelanjutan dari sel-sel lapisan terdalam arteri dan vena.

Ketika kapiler bertemu, pembuluh darah kecil Venula terbentuk yang berfungsi untuk mengumpulkan darah dari kapiler (yaitu, jaringan kapiler). Venula terdiri dari tabung endotel yang disokong oleh sejumlah kecil jaringan kolagen dan, pada venula yang lebih besar, juga oleh beberapa serat otot polos. Seiring bertambahnya ukuran venula, mereka mulai menunjukkan struktur dinding yang merupakan ciri khas arteri, meskipun jauh lebih tipis.

Di dalam vena, yang berfungsi mengalirkan darah dari jaringan perifer ke jantung, memiliki lapisan endotel yang dikelilingi oleh tunika media, yang mengandung lebih sedikit otot dan jaringan elastis daripada yang terdapat pada dinding arteri. Lapisan terluar, tunika adventitia, sebagian besar terdiri dari jaringan ikat. Tekanan darah di pembuluh ini sangat rendah dibandingkan dengan sistem arteri, dan darah harus keluar pada tekanan yang lebih rendah lagi. Hal ini menciptakan kebutuhan akan mekanisme khusus untuk menjaga darah tetap bergerak saat kembali ke jantung.

Untuk mencapai hal ini, banyak pembuluh darah memiliki sistem yang unik, yaitu katup. Katup-katup ini, yang dibentuk oleh lipatan semilunaris di tunika intima, terdapat berpasangan dan berfungsi untuk mengarahkan

aliran darah ke jantung, terutama ke arah atas. Saat darah mengalir menuju jantung, lipatan katup mendatar di dinding vena; kemudian mengembang dan menyumbat lubang tersebut karena tekanan darah dan jaringan di sekitarnya mengisi kantong katup. Katup-katup ini lebih banyak terdapat di vena ekstremitas dibandingkan di bagian tubuh lainnya.

Vena lebih mudah mengembang daripada arteri, dan dindingnya dirancang sedemikian rupa sehingga memungkinkannya untuk mengembang atau berkontraksi. Fungsi utama kontraktilitasnya tampaknya adalah untuk mengurangi kapasitas sistem kardiovaskular melalui konstiksi pembuluh perifer sebagai respons terhadap ketidakmampuan jantung untuk memompa darah yang cukup.

Vena cenderung mengikuti jalur yang sejajar dengan arteri, tetapi jumlahnya lebih banyak. Salurannya lebih besar daripada arteri, dan dindingnya lebih tipis. Sekitar 60 persen volume darah berada dalam sirkulasi sistemik, dan 40 persen normalnya terdapat dalam vena.

Sirkuit paru terdiri dari ventrikel kanan; keluar arteri pulmonalis dan cabang-cabangnya; arteriol, kapiler, dan venula paru-paru; dan vena pulmonalis yang bermuara ke atrium kiri.

Batang paru-paru, batang umum arteri paru-paru, muncul dari permukaan atas ventrikel kanan dan memanjang empat hingga lima sentimeter di luar asal ini sebelum terbagi menjadi arteri paru-

paru kanan dan kiri, yang mensuplai paru-paru. Katup pulmonalis, yang memiliki dua daun katup, atau kuspis, menjaga bukaan antara ventrikel kanan dan trunkus pulmonalis. Trunkus ini berdinding relatif tipis untuk sebuah arteri, dengan dinding kira-kira dua kali ketebalan vena kava dan sepertiga ketebalan aorta. Arteri pulmonalis kanan dan kiri pendek tetapi memiliki diameter yang relatif besar. Dindingnya dapat diregangkan, memungkinkan pembuluh darah untuk mengakomodasi volume sekuncup ventrikel kanan, yang merupakan fungsi penting yang setara dengan ventrikel kiri.

Trunkus pulmonalis berjalan diagonal ke atas ke kiri melintasi rute aorta. Di antara vertebra toraks kelima dan keenam (kira-kira setinggi dasar tulang dada), trunkus terbagi menjadi dua cabang arteri pulmonalis kanan dan kiri yang memasuki paru-paru. Setelah memasuki paru-paru, cabang-cabang tersebut mengalami proses subdivisi, cabang terakhir menjadi kapiler. Kapiler yang mengelilingi kantung udara (alveoli) paru-paru mengambil oksigen dan melepaskan karbon dioksida. Kapiler yang membawa darah beroksigen bergabung dengan pembuluh yang lebih besar dan lebih besar hingga mencapai vena pulmonalis, yang membawa darah beroksigen dari paru-paru ke atrium kiri jantung.

Aorta adalah pembuluh darah terbesar dalam sirkuit sistemik, yang berasal dari ventrikel kiri. Aorta umumnya disebut memiliki tiga bagian:

aorta ascendens, arkus aorta, dan aorta descendens; aorta descendens dapat dibagi lagi menjadi aorta toraks dan aorta abdominalis.

Berasal dari bagian aorta yang menaik, terdapat arteri koroner kanan dan kiri yang memasok darah beroksigen ke jantung. Tiga arteri besar bercabang dari lengkung aorta, dinamai berdasarkan asalnya dari jantung. Innominata, bagian kiri umum karotis, dan kiri Subklavia. Ketiga cabang ini memasok darah beroksigen ke kepala, leher, dan lengan.

Saat arteri innominata (kadang-kadang disebut sebagai arteri brakiosefalika) bergerak ke atas menuju klavikula, atau tulang selangka, ia terbagi menjadi arteri karotis komunis kanan dan arteri subklavia kanan. Dua arteri karotis komunis, satu bercabang dari innominata dan yang lainnya langsung dari aorta, kemudian memanjang secara paralel di kedua sisi leher ke bagian atas tulang rawan tiroid (tulang rawan utama dalam kotak suara, atau laring), di mana mereka terbagi, masing-masing menjadi arteri karotis interna dan eksterna. Arteri karotis eksterna mengeluarkan cabang-cabang yang mensuplai sebagian besar kepala dan leher, sementara arteri karotis interna bertanggung jawab untuk mensuplai bagian depan otak, mata dan pelengkapannya, serta dahi dan hidung.

Dua orang arteri vertebralis, satu muncul sebagai cabang arteri innominata dan yang lainnya sebagai cabang arteri subklavia kiri, bersatu di

dasar otak untuk membentuk arteri basilar, yang kemudian terbagi menjadi arteri posterior arteri serebral. Pasokan darah ke otak sebagian besar berasal dari pembuluh darah yang dapat dianggap sebagai cabang darilingkaran Willis, yang terdiri dari dua arteri vertebralis dan dua arteri karotis interna serta arteri penghubung di antara keduanya.

Lengan disuplai oleh arteri subklavia di sebelah kiri dan oleh kelanjutan arteri innominata di sebelah kanan. Kira-kira di perbatasan tulang rusuk pertama, kedua pembuluh darah ini dikenal sebagai arteri aksilaris; pada gilirannya, menjadi arteri brakialis saat melewati lengan atas. Kira-kira setinggi siku, arteri brakialis terbagi menjadi dua cabang terminal, radial dan arteri ulnaris, arteri radialis berjalan ke bawah di sisi distal (ibu jari) lengan bawah, sedangkan arteri ulnaris di sisi medial. Saling terhubung (anastomosis) di antara keduanya, dengan cabang-cabang setinggi telapak tangan, mensuplai darah ke tangan dan pergelangan tangan.

Bagian toraks (dada) aorta descendens bercabang-cabang yang mensuplai visera (cabang viseral) dan dinding yang mengelilingi rongga toraks (cabang parietal). Cabang viseral mensuplai darah untuk perikardium, paru-paru, bronkus, kelenjar getah bening, dan esofagus. Pembuluh darah parietal mensuplai darah untuk otot-otot interkostal (otot-otot di antara tulang rusuk) dan otot-otot dinding toraks; pembuluh darah ini

mensuplai darah ke membran yang melapisi paru-paru dan rongga toraks, sumsum tulang belakang, kolumna vertebralis, dan sebagian diafragma.

Saat aorta turun melalui diafragma, aorta ini dikenal sebagai aorta abdominalis dan kembali bercabang menjadi cabang viseral dan parietal. Pembuluh viseral meliputi pembuluh seliaka, mesenterika superior, dan mesenterika inferior, yang tidak berpasangan, serta pembuluh ginjal dan testis atau ovarium, yang berpasangan. Arteri celiac muncul dari aorta pada jarak pendek di bawah diafragma dan segera terbagi menjadi arteri kiriarteri lambung, melayani sebagian lambung dan kerongkongan; arteri hepatic, yang terutama melayani hati; dan arteri limpa, yang memasok lambung, pankreas, dan limpa.

Arteri mesenterika muncul dari aorta abdominalis tepat di bawah arteri seliaka. Cabang-cabangnya mensuplai usus halus dan sebagian usus besar. Arteri mesenterika inferior muncul beberapa sentimeter di atas ujung aorta, yang bercabang untuk mensuplai bagian bawah usus besar. arteri ginjal melewati ginjal. testis atau arteri ovarium masing-masing memasok testis pada pria dan ovarium pada wanita.

Cabang parietal aorta abdominalis meliputi arteri frenikus inferior, yang melayani kelenjar suprarenal (adrenal), arteri lumbal, dan arteri sakral tengah. Arteri lumbal tersusun dalam empat pasang dan mensuplai otot-otot dinding perut,

kulit, vertebra lumbal, sumsum tulang belakang, dan meningen (lapisan sumsum tulang belakang).

Aorta abdominalis terbagi menjadi dua bagian umum arteri iliaka, yang masing-masing turun ke lateral dan bercabang menjadi cabang eksternal dan internal. Arteri iliaka eksternal kanan dan kiri merupakan kelanjutan langsung dari arteri iliaka komunis dan dikenal sebagai arteri iliaka komunis. Arteri femoralis setelah melewati daerah inguinal, mengeluarkan cabang yang memasok struktur perut dan ekstremitas bawah.

Pada titik tepat di atas lutut, arteri femoralis berlanjut sebagai arteri poplitea; dari sini muncul arteri tibialis posterior dan anterior. Arteri tibialis merupakan kelanjutan langsung dari arteri poplitea, yang melewati tungkai bawah untuk mensuplai struktur bagian posterior tungkai dan kaki.

Berasal dari arteri tibialis posterior pada jarak yang pendek di bawah lutut adalah Arteri peroneal; arteri ini bercabang-cabang dan memberi nutrisi pada otot-otot tungkai bawah dan fibula (tulang yang lebih kecil dari dua tulang di tungkai bawah) dan berakhir di kaki. Arteri tibialis anterior berjalan menuruni tungkai bawah ke pergelangan kaki, di mana ia menjadi arteri tibialis anterior. Arteri dorsalis pedis yang mensuplai darah ke kaki.

Venula mengumpulkan darah dari kapiler dan saluran darah yang dikenal sebagai sinusoid dan bersatu membentuk vena yang semakin besar yang berakhir sebagai vena besar, atau vena kava. Di ekstremitas terdapat vena superfisial dan vena profunda; vena superfisial terletak tepat di bawah kulit dan mengalirkan darah dari kulit dan fasia superfisial (lembaran jaringan fibrosa), sementara vena profunda menyertai arteri utama di ekstremitas dan dinamai serupa. Hubungan antara vena superfisial dan vena profunda sering terjadi.

Darah vena memasuki atrium kanan dari tiga sumber: otot jantung melalui sinus koroner; tubuh bagian atas melalui vena cava superior; dan tubuh bagian bawah melalui vena cava inferior.

Cabang-cabang dari kepala dan leher, lengan, dan sebagian dada bersatu membentuk vena kava superior. Saluran vena yang disebut Sinus vena terletak di antara dua lapisan duramater, lapisan terluar otak; sinus ini tidak memiliki katup. Drainase vena otak dilakukan oleh sinus-sinus ini dan pembuluh-pembuluh darah yang berkomunikasi. Vena jugularis merupakan kelanjutan dari sistem ini yang mengalir ke bawah melalui leher; vena ini menerima darah dari bagian-bagian wajah, leher, dan otak. Kira-kira setinggi tulang selangka, masing-masing vena ini menyatu dengan vena jugularis. Vena subklavia sisi itu untuk membentuk vena innominata.

Vena jugularis eksterna dibentuk oleh gabungan cabang-cabangnya di dekat sudut rahang bawah, atau mandibula. Vena ini mengalirkan beberapa struktur kepala dan leher dan mengalirkan isinya bersama vena subklavia ke dalam vena innominata di sisi yang sama. Semua vena di lengan merupakan cabang dari vena subklavia di sisi tersebut. Vena-vena ini ditemukan di lokasi superfisial dan profunda dan memiliki katup. Sebagian besar vena profunda tersusun berpasangan dengan hubungan silang di antara keduanya.

Drainase vena tangan dilakukan secara superfisial oleh vena-vena kecil yang saling beranastomosis (saling terhubung) yang bersatu membentuk vena cephalic, mengalir ke sisi radial (ibu jari) lengan bawah, dan vena basilika, yang mengalir di sisi ulnaris lengan bawah dan menerima darah dari tangan, lengan bawah, dan lengan. Vena-vena profunda lengan bawah meliputi: vena radial, kelanjutan dari vena anastomosis dalam tangan dan pergelangan tangan, dan vena ulnaris, kedua vena mengikuti jalur arteri terkait. Vena radialis dan ulnaris bertemu di siku untuk membentuk vena brakialis; ini, pada gilirannya, bersatu dengan vena basilika di tingkat bahu untuk menghasilkan Vena aksilaris. Di tepi luar tulang rusuk pertama, vena aksilaris menjadi vena subklavia, titik terminal sistem vena yang menjadi ciri khas ekstremitas atas.

Vena subklavia, vena jugularis eksternal, dan vena jugularis internal semuanya bertemu untuk membentuk vena innominata. Vena innominata kanan dan kiri berakhir di vena kava superior, yang bermuara ke bagian posterior atas atrium kanan.

Selain vena innominata, vena cava superior menerima darah dari vena azigot dan vena-vena kecil dari mediastinum (daerah antara kedua paru-paru) dan perikardium. Sebagian besar darah dari punggung dan dari dinding dada serta perut mengalir ke vena-vena yang terletak di sepanjang badan vertebra (bagian-bagian vertebra yang menopang berat badan). Vena-vena ini membentuk apa yang disebut Sistem azigot, yang berfungsi sebagai penghubung antara vena kava superior dan inferior. Vena terminal dari sistem ini adalah vena azigot, vena hemiazigot, dan vena aksesori. Pada tingkat diafragma, vena asenden kanan vena lumbal berlanjut ke atas sebagai vena azigot, yang cabang utamanya adalah vena interkostal kanan, yang mengalirkan darah ke otot-otot ruang interkostal. Vena ini juga menerima cabang dari esofagus, kelenjar getah bening, perikardium, dan paru-paru kanan, dan masuk ke vena kava superior kira-kira setinggi vertebra toraks keempat.

Sisi kiri sistem azigot sangat bervariasi antar individu. Biasanya, vena hemiazigot muncul tepat di bawah diafragma sebagai kelanjutan dari vena lumbal asendens kiri dan berakhir di vena azigot.

Cabang-cabang vena hemiazigot mengalirkan darah ke otot-otot interkostal, esofagus, dan sebagian mediastinum. Vena hemiazigot aksesori biasanya memanjang ke bawah sebagai kelanjutan dari vena ruang interkostal keempat, menerima cabang-cabang dari ruang interkostal kiri dan bronkus kiri. Vena ini bermuara ke vena azigot tepat di atas muara vena hemiazigot.

Vena cava inferior adalah batang vena besar tanpa katup yang menerima darah dari kaki, punggung, serta dinding dan isi perut dan panggul. Lengkung vena dorsal, yang melintasi bagian atas kaki, tidak jauh dari pangkal jari kaki. Lengkung ini terhubung dengan vena yang mengalirkan darah dari telapak kaki. Di permukaan, tungkai bawah dialirkan oleh vena besar dan kecil. Vena saphena, yang merupakan kelanjutan dari lengkung vena dorsal. Vena saphena kecil memanjang ke bagian belakang tungkai bawah dan biasanya berakhir di vena poplitea. Terdapat beberapa interkoneksi dengan vena dalam dan vena saphena magna. Vena poplitea, yang terpanjang di tubuh, memanjang dari lengkung vena dorsal ke bagian dalam tungkai bawah dan paha, menerima cabang vena dari daerah lutut dan paha dan berakhir di vena femoralis.

Sebagian besar darah dari ekstremitas bawah kembali melalui vena profunda. Vena-vena ini meliputi vena femoralis dan poplitea, serta vena-vena yang menyertai arteri tibialis anterior dan posterior serta arteri peroneal. Vena anterior

dan posterior Vena tibialis bermula di kaki dan menyatu di ketinggian lutut untuk membentuk vena poplitea; vena poplitea menjadi vena femoralis saat melanjutkan perpanjangannya melalui paha.

Pada tingkat ligamen inguinalis (yang berada di batas anterior, diagonal antara batang tubuh dan paha), vena femoralis dikenal sebagai vena eksternal. Vena iliaka; vena iliaka interna menyatu dengan vena iliaka interna membentuk vena iliaka komunis. Vena iliaka interna mengalirkan darah dari dinding panggul, visera, genitalia eksterna, bokong, dan sebagian paha. Melalui sepasang vena iliaka komunis, kaki dan sebagian besar panggul dialirkan darah. Kedua vena iliaka komunis kemudian menyatu di atas tulang ekor (tulang terbawah tulang belakang) menjadi vena kava inferior. Saat mengalir ke atas melalui abdomen, vena kava inferior menerima darah dari vena iliaka komunis dan dari vena lumbal, renal, suprarenal, dan hepatis sebelum bermuara ke atrium kanan (Pagliaro *et al.*, 2022).

Sepasang vena lumbal (yang mengalirkan darah dari pinggang dan dinding perut) disatukan di setiap sisi oleh vena penghubung vertikal, vena lumbal asendens; vena lumbal asendens kanan berlanjut sebagai vena azigot dan kiri sebagai vena hemiazigot. Vena-vena ini biasanya masuk secara terpisah ke dalam vena kava inferior.

Vena renalis terletak di depan arteri renalis yang sesuai; vena renalis kanan menerima cabang-cabangnya secara eksklusif dari ginjal, sementara vena renalis kiri juga menerima darah dari sejumlah organ lain. Vena renalis kanan vena suprarenal berakhir langsung di vena cava inferior seperti halnya vena cava kanan frenikus, di atas vena gonadal. Dua atau tiga vena pendek batang hati mengalirkan darah ke vena cava inferior saat melewati diafragma.

Kapiler berfungsi untuk menyediakan metode pertukaran cairan, nutrisi, dan limbah antara darah dan jaringan. Meskipun berukuran mikroskopis, kapiler terbesar berdiameter sekitar 0,2 milimeter (kira-kira selebar ujung peniti), jaringan kapiler yang besar berfungsi sebagai reservoir yang biasanya berisi sekitar seperenam dari total volume darah yang bersirkulasi. Jumlah kapiler di jaringan aktif, seperti otot, hati, ginjal, dan paru-paru, lebih banyak daripada jumlah di tendon atau ligamen; selain itu, kornea mata, epidermis, dan tulang rawan hialin (tulang rawan semitransparan seperti yang ditemukan pada sendi) tidak memiliki kapiler.

Jaringan kapiler yang saling terhubung tempat arterioler bermuara tidak hanya dicirikan oleh ukuran mikroskopisnya, tetapi juga oleh dinding yang sangat tipis, hanya setebal satu sel. Pembuluh darah ini hanyalah kelanjutan tubular dari sel-sel lapisan dalam pembuluh darah yang lebih besar, biasanya berukuran seragam, biasanya

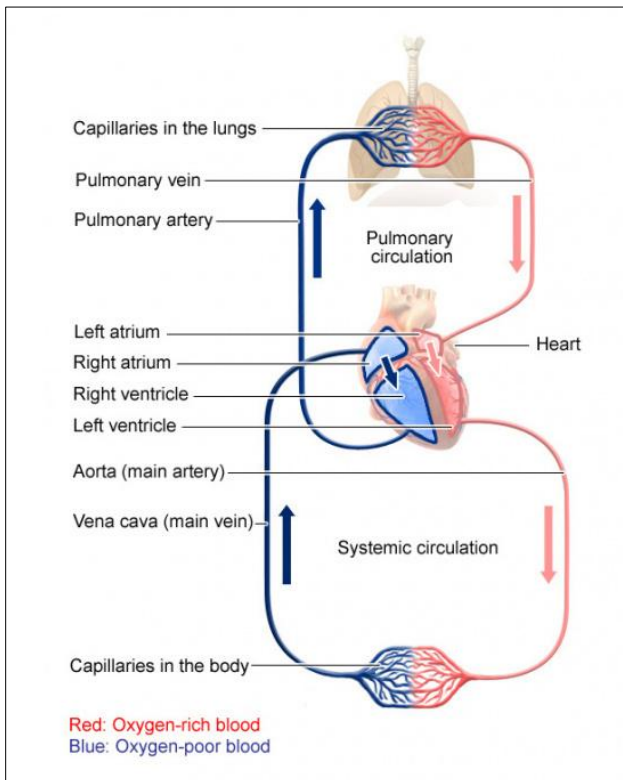
memiliki tiga hingga empat sel endotel di lingkarinya, kecuali ke arah ujung vena, di mana mereka menjadi sedikit lebih lebar, dengan empat hingga enam sel di lingkarinya. Sebuah membran tipis, yang disebut membran dasar, mengelilingi sel-sel ini dan berfungsi untuk menjaga integritas pembuluh darah.

Satu unit kapiler tunggal terdiri dari jaringan pembuluh yang bercabang dan saling berhubungan (anastomosis), masing-masing panjangnya rata-rata 0,5 hingga 1 milimeter. Dinding kapiler sangat tipis dan bertindak sebagai membran semipermeabel yang memungkinkan zat yang mengandung molekul kecil, seperti oksigen, karbon dioksida, air, asam lemak, glukosa, dan keton, untuk melewati membran. Oksigen dan bahan nutrisi masuk ke jaringan melalui dinding di ujung arteriol unit kapiler; karbon dioksida dan produk limbah bergerak melalui membran ke dalam pembuluh di ujung vena dari dasar kapiler. Konstriksi dan pelebaran arteriol terutama bertanggung jawab untuk mengatur aliran darah ke kapiler. Penjaga gerbang otot, atau sfingter, di unit kapiler itu sendiri, bagaimanapun, berfungsi untuk mengarahkan aliran ke area yang paling membutuhkan.

Terdapat tiga moda transportasi melintasi membran sel dinding kapiler. Zat-zat yang larut dalam membran lipid (lemak) sel kapiler dapat melewati membran ini secara langsung melalui proses difusi. Beberapa zat yang dibutuhkan oleh

jaringan dan larut dalam air tetapi tidak larut sepenuhnya dalam membran lipid melewati saluran kecil berisi air, atau pori-pori, di membran melalui proses yang disebut ultrafiltrasi. Hanya 1 / 1.000 dari luas permukaan kapiler yang diwakili oleh pori-pori ini. Zat-zat lain, seperti kolesterol, diangkut oleh reseptor spesifik di endotelium (Mohrman & Heller, 2022).

3.2.2 Mekanisme Transportasi



Gambar 3. 4 Sistem Peredaran Sistemik dan Pulmonal

Sistem portal dapat digambarkan sebagai bagian khusus dari sistem peredaran darah sistemik. Meskipun bermula dari kapiler, sistem portal unik dibandingkan pembuluh darah lain karena juga berakhir di pembuluh darah mirip kapiler, yang terletak di hati. Darah dari limpa, lambung, pankreas, dan usus terlebih dahulu melewati hati sebelum menuju jantung. Darah yang mengalir ke hati berasal dari arteri hepatis (20 persen) dan vena porta (80 persen); darah yang meninggalkan hati mengalir melalui vena hepatis dan kemudian bermuara ke vena kava inferior. Darah arteri hepatis memasok kebutuhan oksigen untuk hati. Darah dari visera abdomen, terutama saluran usus, mengalir ke vena porta dan kemudian ke hati. Zat-zat dalam darah porta diproses oleh hati (Mohrman & Heller, 2022).

Dari kapiler paru-paru, tempat darah mengambil oksigen dan melepaskan karbon dioksida, darah yang mengandung oksigen di vena dikumpulkan terlebih dahulu ke dalam venula dan kemudian ke vena yang semakin besar; akhirnya mengalir melalui empat vena pulmonalis, dua dari hilum masing-masing paru-paru. (Hilum merupakan titik masuk pada masing-masing paru-paru untuk bronkus, pembuluh darah, dan saraf.) Vena-vena ini kemudian menuju ke atrium kiri, tempat isinya dituangkan ke dalam jantung.

3.2.3 Regulasi Kardiovaskular

- Mekanisme homeostasis kardiovaskular
Homeostasis, setiap proses pengaturan diri yang memungkinkan sistem biologis menjaga stabilitas sambil menyesuaikan diri dengan

kondisi optimal untuk kelangsungan hidup. Jika homeostasis berhasil, kehidupan berlanjut; jika tidak berhasil, bencana atau kematian akan terjadi. Stabilitas yang dicapai sebenarnya merupakan Keseimbangan dinamis, di mana perubahan terus-menerus terjadi namun kondisi yang relatif seragam tetap berlaku. Gagasan umum tentang proses pengaturan diri ini dieksplorasi oleh ahli fisiologi Prancis Claude Bernard pada tahun 1849 dan kata homeostasis diciptakan oleh ahli saraf dan fisiologi Amerika Meriam Walter Bradford pada tahun 1926.

Setiap sistem dalam kesetimbangan dinamis cenderung mencapai keadaan tunak, suatu keseimbangan yang melawan gaya perubahan dari luar. Ketika sistem tersebut terganggu, perangkat pengatur bawaan merespons perubahan tersebut untuk menciptakan keseimbangan baru; proses semacam itu merupakan salah satu bentuk kendali umpan balik. Semua proses integrasi dan koordinasi fungsi, baik yang dimediasi oleh sirkuit listrik maupun oleh sistem saraf dan hormonal, merupakan contoh regulasi homeostatis.

Sistem kardiovaskuler memainkan peran penting: baroreseptornya (reseptor peka tekanan dalam pembuluh darah yang merespons peregangan) menyampaikan informasi tekanan darah kembali ke otak, dan mengangkut hormon yang disekresikan oleh hipotalamus dan kelenjar tiroid untuk mengatur metabolisme tubuh. Kehilangan panas pada manusia dibantu oleh

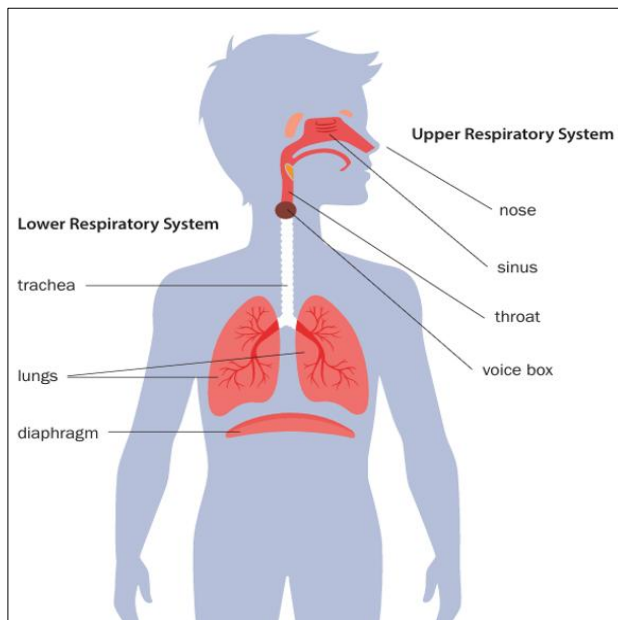
pengurangan aktivitas, oleh keringat, dan oleh mekanisme pertukaran panas yang memungkinkan lebih banyak darah bersirkulasi di dekat permukaan kulit. Kehilangan panas dikurangi dengan isolasi, penurunan sirkulasi ke kulit, dan modifikasi budaya seperti penggunaan pakaian, tempat berlindung, dan sumber panas eksternal. Kisaran antara tingkat suhu tubuh tinggi dan rendah merupakan dataran tinggi homeostatis kisaran "normal" yang menopang kehidupan. Saat salah satu dari dua ekstrem tersebut didekati, tindakan korektif (melalui umpan balik negatif) mengembalikan sistem ke kisaran normal (Mohrman & Heller, 2022).

- Sistem saraf otonom (simpatis dan parasimpatis)
Kontrol saraf jantung dipertahankan oleh serat parasimpatis disaraf vagus (parasimpatis) dan oleh saraf simpatis. Saraf vagus adalah inhibitor jantung, dan saraf simpatis adalah eksitor jantung. Stimulasi saraf vagus menekan laju pembentukan impuls dan kontraktilitas atrium, sehingga mengurangi curah jantung dan memperlambat denyut jantung. Stimulasi parasimpatis juga dapat menyebabkan gangguan pembentukan impuls atau blok jantung dengan derajat yang bervariasi pada penyakit jantung. Pada blok jantung komplit, atrium dan ventrikel berdetak secara independen. Stimulasi saraf simpatis meningkatkan kontraktilitas atrium dan ventrikel (Mohrman & Heller, 2022).

Siklus jantung didefinisikan sebagai waktu dari akhir satu kontraksi jantung hingga akhir kontraksi berikutnya dan terdiri dari periode relaksasi yang disebut diastol diikuti oleh periode kontraksi yang disebut sistole. Selama seluruh siklus, tekanan dipertahankan di dalam arteri; namun, tekanan ini bervariasi selama dua periode, tekanan diastolik normal adalah 60 hingga 80 milimeter air raksa dan tekanan sistolik normal adalah 90 hingga 120 milimeter air raksa.

3.3 Sistem Respirasi

Sistem pernapasan adalah semua organ yang berfungsi bersama untuk memungkinkan seseorang bernapas. Gas bergerak antara udara dan sistem pernapasan. Sistem pernapasan dijelaskan dalam dua bagian yaitu sistem pernapasan atas dan bawah. Transisi antara kedua sistem ini terletak di persimpangan jalur pernapasan dan pencernaan, tepat di bagian atas laring.



Gambar 3. 5 Organ-organ Respirasi

Sistem saluran napas atas terdiri dari hidung dan rongga paranasal (atau sinus), faring (atau tenggorokan), dan sebagian juga rongga mulut, karena dapat digunakan untuk bernapas (Ward *et al.*, (2016). Sistem saluran napas bawah terdiri dari laring, trakea, batang bronkus, dan semua saluran napas yang bercabang secara intensif di dalam paru-paru, seperti bronkus intrapulmonalis, bronkiolus, dan duktus alveolaris. Untuk pernapasan, kolaborasi sistem organ lain jelas penting. Diafragma, sebagai otot pernapasan utama, dan otot-otot interkostal dinding dada memainkan peran penting dengan menghasilkan aksi pemompaan pada paru-paru, di bawah kendali sistem saraf pusat. Otot-otot tersebut mengembang dan berkontraksi ruang internal toraks, kerangka tulang yang dibentuk oleh tulang rusuk dan vertebra toraks. Kontribusi paru-paru dan dinding dada (tulang rusuk dan otot) terhadap pernapasan dijelaskan dalam mekanisme

pernapasan. Darah, sebagai pembawa gas, dan sistem peredaran darah (yaitu jantung dan pembuluh darah) merupakan elemen wajib dari sistem pernapasan.

3.3.1 Struktur dan Fungsi

- Hidung

Hidung adalah tonjolan luar dari suatu ruang dalam, rongga hidung. Rongga ini terbagi menjadi kanal kiri dan kanan oleh dinding tulang rawan dan tulang medial yang tipis, septum hidung. Setiap kanal bermuara ke wajah melalui lubang hidung dan ke faring melalui koana. Dasar rongga hidung dibentuk oleh langit-langit, yang juga membentuk atap rongga mulut. Bentuk rongga hidung yang kompleks disebabkan oleh proyeksi tulang-tulang lengkung, yaitu superior, medius, dan inferior. Tulang turbinat (atau konka), dari dinding lateral. Lorong yang terbentuk di bawah setiap punggungan disebut meatus nasal superior, medius, dan inferior.

Di setiap sisi, ruang intranasal berkomunikasi dengan serangkaian rongga berisi udara di dalam tengkorak (paranasalsinus) dan juga, melalui saluran nasolakrimal, dengan Aparatus lakrimal di sudut mata. Saluran ini mengalirkan cairan lakrimal ke dalam rongga hidung. Fakta ini menjelaskan mengapa pernapasan hidung dapat terganggu atau bahkan terhambat dengan cepat saat menangis: cairan lakrimal tidak hanya meluap menjadi air mata, tetapi juga membanjiri rongga hidung.

Sinus paranasal adalah kumpulan rongga tunggal atau ganda yang berpasangan dengan

ukuran bervariasi. Sebagian besar perkembangannya terjadi setelah lahir, dan mencapai ukuran akhir menjelang usia 20 tahun. Sinus-sinus ini terletak di empat tulang tengkorak yang berbeda: tulang maksila, tulang frontal, tulang etmoid, dan tulang sphenoid. Oleh karena itu, sinus-sinus ini disebut sinus maksilaris, yang merupakan rongga terbesar; sinus frontalis; sinus etmoid; dan sinus sphenoid, yang terletak di dinding posterior atas rongga hidung. Sinus memiliki dua fungsi utama: karena terisi udara, membantu menjaga berat tengkorak dalam batas yang wajar, dan berfungsi sebagai ruang resonansi untuk suara manusia.

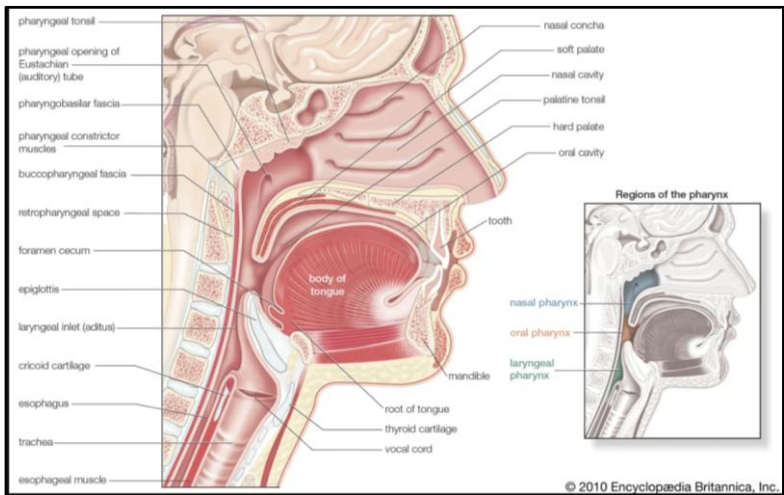
Rongga hidung beserta ruang-ruang di sekitarnya dilapisi oleh saluran pernapasan. Mukosa hidung, biasanya mengandung kelenjar penghasil lendir dan pleksus vena; lapisan sel teratasnya, epitelium, terutama terdiri dari dua jenis sel, yaitu sel bersilia dan sel sekretori. Desain struktural ini mencerminkan fungsi pendukung khusus hidung dan saluran pernapasan bagian atas secara umum terkait pernapasan. Mereka membersihkan, melembapkan, dan menghangatkan udara yang dihirup, mempersiapkannya untuk kontak langsung dengan jaringan halus di area pertukaran gas. Selama ekspirasi melalui hidung, udara dikeringkan dan didinginkan, suatu proses yang menghemat air dan energi.

Dua daerah rongga hidung memiliki lapisan yang berbeda. Vestibulum, di pintu masuk hidung, dilapisi oleh kulit yang memiliki rambut pendek dan tebal yang disebut vibrissae. Di langit-langit

hidung, bulbus olfaktorius dengan epitel sensoriknya memeriksa kualitas udara yang dihirup. Sekitar dua lusin saraf penciuman menyampaikan sensasi penciuman dari sel-sel penciuman melalui atap tulang rongga hidung ke sistem saraf pusat (Wilkins *et al.*,2021).

- Faring

Anatomi, faring dapat dibagi menjadi tiga bagian. Bagian atas, disebut Nasofaring, terutama merupakan saluran udara dan sekresi dari hidung ke faring oral. Nasofaring juga terhubung ke rongga timpani di telinga tengah melalui tuba auditorius yang bermuara di kedua dinding lateral. Tindakan menelan membuka sebentar tuba auditorius yang biasanya kolaps dan memungkinkan telinga tengah diaerasi dan perbedaan tekanan disamakan. Di dinding posterior nasofaring terdapat organ limfatik, yaitu tonsil faring. Ketika tonsil membesar (seperti pada hipertrofi tonsil atau vegetasi adenoid), dapat mengganggu pernapasan hidung dan mengubah pola resonansi suara.



Gambar 3. 6 Anatomi Faring

Bagian tengah faring terhubung ke bagian anterior mulut dan oleh karena itu disebut faring oral atau orofaring. Dibatasi dari nasofaring oleh langit-langit lunak, yang menutupi bagian posterior rongga mulut.

Bagian bawah faring disebut Hipofaring. Dinding anteriornya dibentuk oleh bagian posterior lidah. Terletak tepat di atas laring, hipofaring merupakan tempat persilangan jalur udara dan makanan: Udara dari rongga hidung mengalir ke laring, dan makanan dari rongga mulut dialirkan ke esofagus tepat di belakang laring. Epiglottis, lipatan berbentuk daun yang bertulang rawan, berfungsi sebagai penutup laring dan, selama proses menelan, mengendalikan lalu lintas udara dan makanan (Wilkins *et al.*, 2021).

- Laring

Laring adalah organ berstruktur kompleks yang memiliki fungsi ganda: sebagai saluran udara ke paru-paru dan pengontrol aksesnya, dan sebagai organ fonasi. Suara dihasilkan dengan memaksa udara melalui celah sagittal yang dibentuk olehpita suara, glotis. Hal ini menyebabkan tidak hanya pita suara tetapi juga kolom udara di atasnya bergetar.

Sebagaimana dibuktikan oleh para ahli pada penyanyi, fungsi ini dapat dikontrol secara ketat dan disetel dengan tepat. Kontrol dicapai oleh sejumlah otot yang dipersarafi oleh saraf laring. Agar aparatus otot berfungsi dengan tepat, otot - otot harus terikat pada kerangka yang menstabilkan. Kerangka laring terdiri dari hampir seluruh bagiantulang rawan, sebagian besar sangat kecil, saling terhubung olehligamen dan membran. Tulang rawan laring terbesar, tulang rawan tiroid, terbuat dari dua lempeng yang menyatu di anterior garis tengah. Di ujung atas garis fusi terdapat sebuah insisi, yaitu takik tiroid; di bawahnya terdapat tonjolan ke depan, yaitu prominensia laring. Kedua struktur ini mudah teraba melalui kulit. Sudut antara kedua lempeng tulang rawan ini lebih tajam dan prominensianya lebih menonjol pada pria dibandingkan pada wanita, sehingga struktur ini diberi nama umum jakun (*Wilkins et al.,2021*).

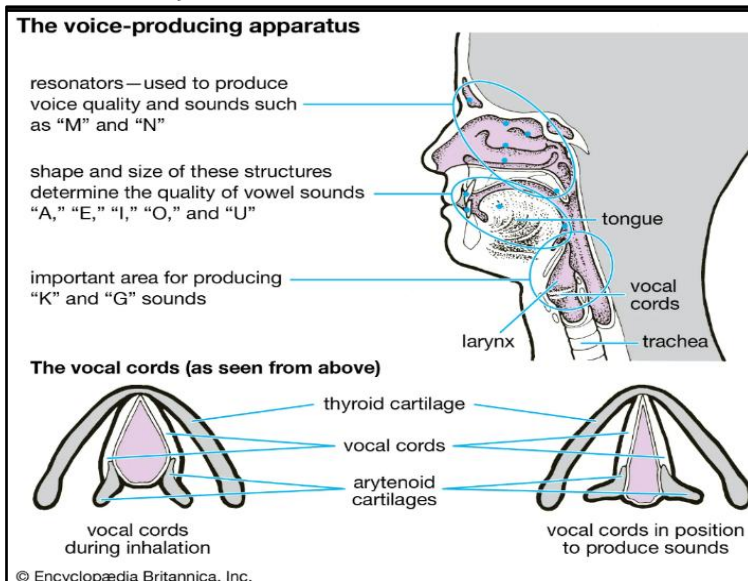
Di balik tulang rawan tiroid yang menyerupai perisai, pita suara membentang ke lumen laring. Mereka berhubungan dengan ligamen elastis yang melekat di bagian anterior sudut pelindung tiroid

dan di bagian posterior pada sepasang potongan tulang rawan piramidal kecil, kartilago aritenoid. Ligamen vokal merupakan bagian dari tabung yang menyerupai pipa organ, terbuat dari jaringan elastis. Tepat di atas pita suara, epiglotis juga melekat pada bagian belakang lempeng tiroid melalui tangkainya. Krikoid, bagian tulang rawan besar lain dari kerangka laring, memiliki bentuk cincin tanda. Pelat lebar cincin terletak di dinding posterior laring dan lengkungan sempit di dinding anterior.

Krikoid terletak di bawah tulang rawan tiroid, yang bergabung dalam artikulasi yang diperkuat oleh ligamen. Sumbu transversal sendi memungkinkan rotasi seperti engsel antara dua tulang rawan. Gerakan ini memiringkan lempeng krikoid sehubungan dengan perisai tulang rawan tiroid dan karenanya mengubah jarak di antara keduanya. Karena tulang rawan aritenoid terletak tegak di atas lempeng krikoid, mereka mengikuti gerakan miringnya. Mekanisme ini memainkan peran penting dalam mengubah panjang dan ketegangan pita suara. Tulang rawan aritenoid berartikulasi dengan lempeng krikoid dan karenanya dapat berputar dan meluncur untuk menutup dan membuka glotis.

Dilihat dari depan, lumen tuba laring berbentuk seperti jam pasir, dengan lebar tersempit di glotis. Tepat di atas pita suara terdapat sepasang lipatan mukosa tambahan yang disebut pita suara palsu atau plika vestibularis. Seperti pita suara sejati, pita suara palsu juga

dibentuk oleh ujung bebas membran fibroelastis. Di antara plika vestibularis dan pita suara, ruang laring membesar dan membentuk kantong lateral yang memanjang ke atas. Ruang ini disebut ventrikel laring. Karena celah antara plika vestibularis selalu lebih besar daripada celah antara pita suara, celah antara pita suara dapat dengan mudah dilihat dari atas dengan laringoskop, instrumen yang dirancang untuk pemeriksaan visual bagian dalam laring (Wilkins *et al.*, 2021).



Gambar 3. 7 Anatomi Penghasil Suara

Aparatus otot laring terdiri dari dua kelompok fungsional yang berbeda. Otot intrinsik bekerja secara langsung maupun tidak langsung pada bentuk, panjang, dan tegangan pita suara. Otot ekstrinsik bekerja pada laring secara keseluruhan, menggerakkannya ke atas (misalnya,

saat fonasi bernada tinggi atau menelan) atau ke bawah. Otot intrinsik melekat pada komponen rangka laring itu sendiri; otot ekstrinsik menghubungkan kerangka laring secara kranial ke tulang hioid atau ke faring dan secara kaudal ke sternum (tulang dada).

- **Trakhea dan Batang Bronkus**

Di bawah laring terdapat trakea, sebuah tabung dengan panjang sekitar 10 hingga 12 cm (3,9 hingga 4,7 inci) dan lebar 2 cm (0,8 inci). Dindingnya diperkuat oleh 16 hingga 20 cincin tulang rawan berbentuk tapal kuda yang khas, tidak lengkap, yang membuka ke arah belakang dan tertanam dalam jaringan ikat padat. Dinding dorsalnya mengandung lapisan serat otot polos transversal yang kuat yang membentang di celah tulang rawan. Bagian dalam trakea dilapisi oleh epitel pernapasan yang khas. Lapisan mukosa mengandung kelenjar mukus.

Di ujung bawahnya, trakea terbagi dalam bentuk Y terbalik menjadi dua bronkus batang (atau utama), masing-masing untuk paru-paru kiri dan kanan. Bronkus utama kanan memiliki diameter yang lebih besar, berorientasi lebih vertikal, dan lebih pendek daripada bronkus utama kiri. Konsekuensi praktis dari susunan ini adalah benda asing yang melewati laring biasanya akan masuk ke paru-paru kanan. Struktur batang bronkus sangat mirip dengan trakea (Wilkins *et al.*, 2021).

- Bronkus dan Bronkiolus

Bronkus dilapisi oleh lapisan jaringan ikat longgar yang berkesinambungan dengan elemen jaringan ikat paru lainnya dan karenanya merupakan bagian dari kerangka fibrosa yang membentang dari hilus hingga kantung pleura. Lapisan fibrosa luar ini mengandung, selain pembuluh limfatik dan saraf, pembuluh bronkial kecil untuk memasok darah dari sirkulasi sistemik ke dinding bronkial. Bronkiolus adalah saluran udara konduksi kecil dengan diameter berkisar antara tiga hingga kurang dari satu milimeter. Dinding bronkiolus tidak memiliki tulang rawan dan kelenjar seromukosa. Lumennya dilapisi oleh epitel kuboid selapis dengan sel bersilia dan sel Clara, yang menghasilkan sekresi yang tidak jelas secara kimiawi. Dinding bronkiolus juga mengandung lapisan sel otot polos yang berkembang dengan baik, yang mampu mempersempit jalan napas. Kejang abnormal pada otot ini menyebabkan gejala klinis asma bronkial (Wilkins *et al.*, 2021).

- Paru-paru

Paru-paru terbagi menjadi dua bagian yang sedikit tidak sama, paru-paru kiri dan paru-paru kanan, yang menempati sebagian besar ruang intratoraks. Ruang di antara keduanya diisi oleh mediastinum, yang merupakan ruang jaringan ikat berisi jantung, pembuluh darah utama, trakea dengan bronkus batang, esofagus, dan kelenjar timus. Paru-paru kanan mewakili 56 persen dari total volume paru-paru dan terdiri dari tiga rongga. lobus, yaitu lobus superior, medius, dan

inferior, yang dipisahkan satu sama lain oleh lobus horizontal dalam dan lobus oblik fisura. Paru-paru kiri, yang volumenya lebih kecil karena posisi jantung yang asimetris, hanya memiliki dua lobus yang dipisahkan oleh fisura oblik. Di toraks, kedua paru-paru terletak dengan basis di diafragma, sementara puncaknya memanjang di atas iga pertama. Di medial, keduanya terhubung dengan mediastinum di hilum, area berbatas tegas tempat saluran udara, pembuluh darah dan limfatik, serta saraf masuk atau keluar dari paru-paru. Bagian dalam rongga toraks dan permukaan paru-paru masing-masing dilapisi oleh membran serosa. Parietal pleura dan pleura viseral, yang bersambung langsung di hilus. Tergantung pada struktur di bawahnya, pleura parietal dapat dibagi menjadi tiga bagian: pleura mediastinal, kosta, dan diafragma. Permukaan paru yang menghadap ke pleura ini Area pleura diberi nama sesuai dengan namanya, karena bentuk paru-paru ditentukan oleh bentuk rongga pleura. Karena adanya rongga pleura, yang membentuk semacam ruang cadangan, rongga pleura lebih besar dari volume paru-paru.

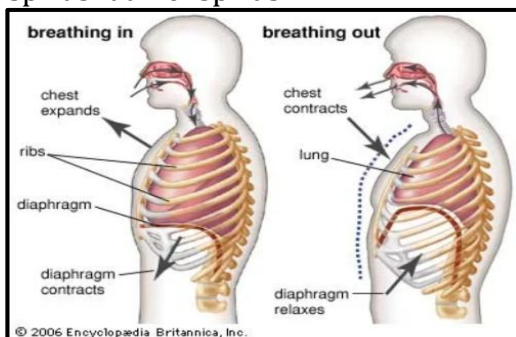
Selama inspirasi, rongga-rongga tersebut sebagian terbuka karena paru-paru yang mengembang, sehingga memungkinkan paru-paru untuk meningkatkan volumenya. Meskipun hilus adalah satu-satunya tempat paru-paru melekat pada struktur di sekitarnya, paru-paru tetap menempel erat pada dinding toraks melalui tekanan negatif antara pleura viseral dan parietal. Lapisan tipis cairan ekstraseluler di antara pleura

memungkinkan paru-paru bergerak dengan lancar di sepanjang dinding rongga saat bernapas (Levitzy, 2022). Jika membran serosa mengalami peradangan (pleuritis), gerakan pernapasan bisa terasa nyeri. Jika udara masuk ke rongga pleura (pneumothorax), paru-paru segera kolaps karena sifat elastisnya, dan pernapasan terhenti pada sisi ini.

Lobus paru-paru dibagi menjadi unit yang lebih kecil, yaitu: segmen paru. Terdapat 10 segmen di paru kanan dan, tergantung klasifikasinya, terdapat delapan hingga 10 segmen di paru kiri. Tidak seperti lobus, segmen paru tidak dibatasi satu sama lain oleh fisura, melainkan oleh membran tipis jaringan ikat yang mengandung vena dan limfatik; suplai arteri mengikuti bronkus segmental. Fitur anatomi ini penting karena proses patologis mungkin terbatas pada unit-unit terpisah, dan ahli bedah dapat mengangkat segmen tunggal yang sakit, alih-alih seluruh lobus.

3.3.2 Mekanisme Pernapasan

- Inspirasi dan ekspirasi



Gambar 3. 8 Diafragma Berkontraksi dan Berelaksasi

Udara bergerak masuk dan keluar paru-paru sebagai respons terhadap perbedaan tekanan. Ketika tekanan udara di dalam ruang alveolus turun di bawah tekanan atmosfer, udara masuk ke paru-paru (inspirasi), asalkan laring terbuka; ketika tekanan udara di dalam alveoli melebihi tekanan atmosfer, udara dihembuskan dari paru-paru (ekspirasi). Aliran udara cepat atau lambat sebanding dengan besarnya perbedaan tekanan. Karena tekanan atmosfer relatif konstan, aliran ditentukan oleh seberapa besar tekanan di dalam paru-paru naik atau turun di atas atau di bawah tekanan atmosfer.

Fluktuasi tekanan alveolar disebabkan oleh ekspansi dan kontraksi paru-paru yang diakibatkan oleh ketegangan dan relaksasi otot-otot dada dan perut. Setiap peningkatan kecil ekspansi secara sementara meningkatkan ruang yang melingkupi udara paru-paru. Oleh karena itu, terdapat lebih sedikit udara per satuan volume di paru-paru dan tekanan turun. Perbedaan tekanan udara antara atmosfer dan paru-paru tercipta, dan udara mengalir masuk hingga mencapai keseimbangan dengan tekanan atmosfer dipulihkan pada volume paru-paru yang lebih tinggi. Ketika otot-otot inspirasi berelaksasi, volume dada dan paru-paru berkurang, udara paru-paru mengalami kompresi sementara, tekanannya naik di atas tekanan atmosfer, dan terjadi aliran ke atmosfer hingga keseimbangan tekanan tercapai pada volume paru-paru semula.

Inilah urutan kejadian selama setiap siklus pernapasan normal: perubahan volume paru-paru menyebabkan perbedaan tekanan, yang mengakibatkan aliran udara masuk atau keluar paru-paru dan pembentukan volume paru-paru baru (Levitzky, 2022).

- Ventilasi paru

Kekuatan yang biasanya menyebabkan perubahan volume dada dan paru-paru tidak hanya berasal dari kontraksi otot tetapi juga dari sifat elastis paru-paru dan dada. Paru-paru mirip dengan balon karena ia menahan peregangan, cenderung mengempis hampir seluruhnya kecuali jika dipompa oleh perbedaan tekanan antara bagian dalam dan luarnya. Kecenderungan paru-paru untuk mengempis atau menjauh dari dada dapat diukur dengan menempatkan jarum tumpul secara hati-hati di antara bagian luar paru-paru dan bagian dalam dinding dada, sehingga memungkinkan paru-paru terpisah dari dada pada titik tertentu ini.

Tekanan yang diukur dalam rongga pleura kecil yang tercipta tersebut jauh di bawah tekanan atmosfer pada saat tekanan di dalam paru-paru itu sendiri sama dengan tekanan atmosfer. Tekanan negatif (di bawah atmosfer) ini merupakan ukuran gaya yang dibutuhkan untuk menjaga paru-paru tetap mengembang. Gaya tersebut meningkat (tekanan pleura menjadi lebih negatif) saat paru-paru diregangkan dan volumenya meningkat

selama inspirasi. Gaya tersebut juga meningkat sebanding dengan kecepatan udara yang dihisap ke dalam paru-paru dan menurun sebanding dengan gaya udara yang dihembuskan dari paru-paru. Singkatnya, tekanan pleura terutama mencerminkan dua gaya: (1) gaya yang dibutuhkan untuk menjaga paru-paru tetap mengembang melawan elastisitasnya dan (2) gaya yang dibutuhkan untuk menyebabkan aliran udara masuk dan keluar dari paru-paru. Karena tekanan pleura di bawah tekanan atmosfer, udara terhisap ke dalam dada dan paru-paru kolaps (pneumothorax) ketika dinding dada berlubang. Kekuatan yang dibutuhkan untuk mempertahankan inflasi paru-paru dan menyebabkan aliran udara disediakan oleh dada dan diafragma (sekat otot antara dada dan perut), yang kemudian teregang ke dalam oleh tarikan paru-paru.

Otot-otot pernapasan menggeser keseimbangan gaya elastis di paru-paru dan dada ke satu arah atau yang lain dengan menambahkan kontraksi otot. Selama inspirasi, kontraksi otot ditambahkan ke gaya elastis keluar dada untuk meningkatkan traksi pada paru-paru yang diperlukan untuk peregangan tambahannya. Ketika otot-otot ini rileks, retraksi tambahan paru-paru mengembalikan sistem ke posisi keseimbangannya.

Kontraksi dari otot perut menggeser keseimbangan ke arah yang berlawanan dengan menambahkan tekanan perut yang meningkat pada retraksi paru-paru, sehingga diafragma semakin terangkat dan menyebabkan ekspirasi yang kuat. Kekuatan otot tambahan ini dihilangkan saat relaksasi dan volume paru-paru kembali seperti semula. Selama pernapasan normal, kontraksi otot hanya terjadi saat inspirasi, sementara ekspirasi dilakukan "secara pasif" oleh elastisitas paru-paru.

Pada relaksasi total otot-otot inspirasi dan ekspirasi, paru-paru mengembang hingga mencapai volume disebut kapasitas residu fungsional sekitar 40 persen dari volume maksimumnya pada akhir inspirasi penuh. Penurunan volume paru-paru lebih lanjut terjadi akibat kontraksi maksimal otot-otot ekspirasi dada dan perut. Volume dalam kondisi ini dikenal sebagai Volume residu; sekitar 20 persen dari volume pada akhir inspirasi penuh (dikenal sebagai kapasitas paru total). Kolaps paru-paru lebih lanjut hingga mencapai "kapasitas udara minimal" hanya dapat dicapai dengan membuka dinding dada dan menciptakan pneumotoraks.

Selaput permukaan paru-paru (pleura viseral) dan di bagian dalam dada (pleura parietalis) biasanya tetap berdekatan (meskipun paru-paru dan dada tertarik ke arah yang berlawanan) oleh tegangan permukaan lapisan tipis cairan yang menutupi permukaan tersebut.

Kekuatan ikatan ini dapat dirasakan dengan upaya memisahkan dua permukaan halus (West, 2020).

3.3.3 Regulasi Respirasi

Ritme pernapasan dihasilkan di dalam pons dan medula oblongata. Tiga agregasi neuron utama terlibat, yaitu kelompok yang sebagian besar terdiri dari neuron inspirasi di medula dorso medial, kelompok yang terdiri dari neuron inspirasi dan ekspirasi di medula ventrolateral, dan kelompok di pons rostral yang sebagian besar terdiri dari neuron yang melepaskan impuls di kedua sisi. Inspirasi dan diperkirakan bahwa siklus pernapasan inspirasi dan ekspirasi dihasilkan oleh interaksi sinaptik dalam kelompok neuron ini.

Neuron meduler inspirasi dan ekspirasi terhubung ke proyeksi dari pusat otak yang lebih tinggi dan dari kemoreseptor dan mekanoreseptor; pada gilirannya mereka menggerakkan saraf kranial. Neuron motorik, yang mengatur aktivitas otot-otot di saluran napas bagian atas dan aktivitas neuron motorik spinal, yang mempersarafi diafragma serta otot-otot toraks dan abdomen lainnya. Neuron meduler inspirasi dan ekspirasi juga menerima masukan dari sel-sel saraf yang bertanggung jawab atas pengaturan kardiovaskular dan suhu, sehingga memungkinkan aktivitas sistem fisiologis ini terkoordinasi dengan pernapasan.

Secara neurologis, inspirasi ditandai dengan pelepasan muatan neuron medula yang meningkat dan berakhir secara tiba-tiba. Setelah jeda beberapa milidetik, aktivitas inspirasi dimulai kembali, tetapi pada tingkat yang jauh lebih rendah, dan secara bertahap menurun hingga dimulainya aktivitas neuron

ekspirasi. Kemudian siklus dimulai lagi. Perkembangan penuh pola ini bergantung pada interaksi beberapa jenis neuron pernapasan: inspirasi, inspirasi awal, sakelar mati, pasca-inspirasi, dan ekspirasi.

Neuron inspirasi dini memicu pelepasan muatan listrik yang meningkat dari neuron inspirasi. Peningkatan aktivitas ini, yang menghasilkan ekspansi paru-paru, disebabkan oleh eksitasi diri neuron inspirasi dan mungkin oleh aktivitas generator pola hulu yang belum ditemukan. Neuron sakelar mati di medula menghentikan inspirasi, tetapi neuron pons dan masukan dari reseptor regangan di paru-paru membantu mengontrol lamanya inspirasi. Ketika saraf vagus terpotong atau pusat pons hancur, pernapasan ditandai dengan aktivitas inspirasi yang berkepanjangan yang dapat berlangsung selama beberapa menit. Jenis pernapasan ini, yang terkadang terjadi pada orang dengan penyakit batang otak, disebut pernapasan apneustik.

Neuron pascainspirasi bertanggung jawab atas penurunan pelepasan otot-otot inspirasi yang terjadi pada awal ekspirasi. Secara mekanis, pelepasan ini membantu memperlambat laju aliran ekspirasi dan kemungkinan membantu efisiensi pertukaran gas. Beberapa pihak berpendapat bahwa neuron pascainspirasi ini memiliki efek penghambatan pada neuron inspirasi dan ekspirasi, sehingga memainkan peran penting dalam menentukan panjang siklus pernapasan dan fase-fase pernapasan yang berbeda.

Seiring dengan menurunnya aktivitas neuron pascainspirasi, pelepasan neuron ekspirasi dan neuron inspirasi dihambat secara kuat. Mungkin tidak ada

manifestasi perifer dari pelepasan neuron ekspirasi kecuali tidak adanya aktivitas otot inspirasi, meskipun pada manusia tegak, otot interkostal ekspirasi bawah dan otot perut mungkin aktif bahkan saat bernapas tenang. Selain itu, seiring meningkatnya kebutuhan bernapas (misalnya, saat berolahraga), lebih banyak otot interkostal dan otot perut ekspirasi yang berkontraksi. Seiring berlanjutnya ekspirasi, penghambatan otot-otot inspirasi secara bertahap berkurang dan neuron inspirasi melanjutkan aktivitasnya.

Salah satu cara pernapasan dikendalikan adalah melalui umpan balik oleh kemoreseptor. Ada dua jenis kemoreseptor pernapasan: kemoreseptor arteri, yang memantau dan merespons perubahan tekanan parsial oksigen dan kemoreseptor vaskular, yang memantau dan merespons perubahan tekanan parsial oksigen. Karbon dioksida dalam darah arteri, dan kemoreseptor sentral dalam otak, yang merespons perubahan tekanan parsial karbon dioksida di lingkungan terdekatnya. Tingkat ventilasi berperilaku seolah-olah diatur untuk mempertahankan tekanan parsial karbon dioksida yang konstan dan memastikan kadar oksigen yang memadai dalam darah arteri. Peningkatan aktivitas kemoreseptor yang disebabkan oleh hipoksia atau peningkatan tekanan parsial karbon dioksida meningkatkan laju dan kedalaman pernapasan, yang mengembalikan tekanan parsial oksigen dan karbon dioksida ke tingkat normalnya. Di sisi lain, ventilasi yang terlalu banyak menekan tekanan parsial karbon dioksida, yang menyebabkan penurunan

aktivitas kemoreseptor dan penurunan ventilasi. Selama tidur dan anestesi, menurunkan kadar karbon dioksida tiga hingga empat milimeter merkuri di bawah nilai yang terjadi saat terjaga dapat menyebabkan penghentian pernapasan total.

Hipoksia atau penurunan suplai oksigen ke jaringan hingga di bawah tingkat fisiologis (yang disebabkan, misalnya, oleh perjalanan ke dataran tinggi), menstimulasi badan karotis dan aorta, kemoreseptor arteri utama. Badan karotis adalah organ kecil yang terletak di leher pada percabangan masing-masing dari dua arteri karotis komunis menjadi arteri karotis interna dan eksterna. Organ ini memiliki perfusi yang sangat baik dan merespons perubahan tekanan parsial oksigen dalam darah arteri yang mengalir melaluinya daripada terhadap kandungan oksigen dalam darah itu (jumlah oksigen yang secara kimiawi bergabung dengan hemoglobin).

Saraf sensorik dari badan karotis meningkatkan laju aktivasinya secara hiperbolik saat tekanan parsial oksigen turun. Selain merespons hipoksia, badan karotis meningkatkan aktivitasnya secara linear saat tekanan parsial karbon dioksida dalam darah arteri dinaikkan. Parameter darah arteri ini naik dan turun saat udara masuk dan keluar paru-paru, dan badan karotis merasakan fluktuasi ini, merespons lebih cepat daripada perubahan lambat pada tekanan parsial karbon dioksida. Osilasi yang lebih besar pada tekanan parsial karbon dioksida terjadi saat bernapas saat laju metabolisme meningkat. Amplitudo fluktuasi ini, seperti yang tercermin dalam ukuran sinyal badan karotis,

dapat digunakan oleh otak untuk mendeteksi perubahan dalam laju metabolisme dan menghasilkan penyesuaian yang tepat dalam ventilasi.

Badan karotis berkomunikasi dengan neuron pernapasan meduler melalui serabut sensorik yang berjalan bersama saraf sinus karotis, cabang saraf glossofaringeus. Secara mikroskopis, badan karotis terdiri dari dua jenis sel yang berbeda.

Sel tipe I tersusun dalam kelompok dan dikelilingi oleh sel tipe II. Sel tipe II umumnya tidak dianggap memiliki peran langsung dalam kemoreseptor. Serabut saraf sensorik halus ditemukan berdampingan dengan sel tipe I, yang, tidak seperti sel tipe II, mengandung vesikel padat elektron. Asetilkolin, katekolamin, dan neuropeptida seperti enkefalin, polipeptida intestinal vasoaktif, dan substansi P, terletak di dalam vesikel. Diperkirakan bahwa hipoksia dan Hiperkapnia (kelebihan karbon dioksida dalam darah) menyebabkan pelepasan satu atau lebih zat neuroaktif ini dari sel tipe I, yang kemudian bekerja pada saraf sensorik. Respons badan karotis terhadap karbon dioksida dan oksigen dapat diintervensi secara independen, yang menunjukkan bahwa mekanisme yang sama tidak digunakan untuk mendeteksi atau mengirimkan perubahan oksigen atau karbon dioksida. Badan aorta yang terletak di dekat lengkung aorta juga merespons perubahan akut tekanan parsial oksigen, tetapi kurang responsif dibandingkan badan karotis terhadap perubahan tekanan parsial karbon dioksida. Badan aorta bertanggung jawab atas banyak efek kardiovaskular akibat hipoksia.

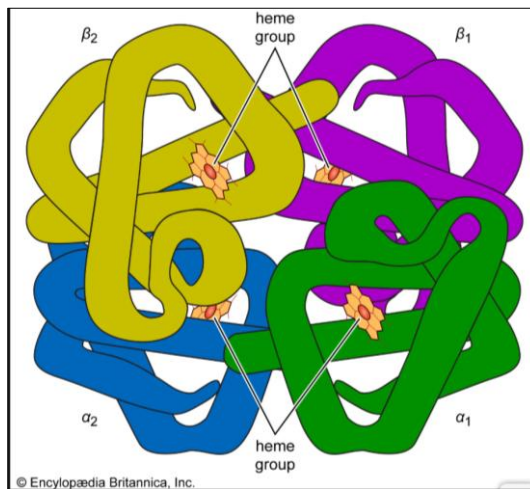
Karbon dioksida merupakan salah satu stimulan pernapasan yang paling kuat. Seiring meningkatnya tekanan parsial karbon dioksida dalam darah arteri, ventilasi meningkat hampir secara linear. Ventilasi normalnya meningkat dua hingga empat liter per menit untuk setiap peningkatan satu milimeter merkuri pada tekanan parsial karbon dioksida. Karbon dioksida meningkatkan keasaman cairan di sekitar sel tetapi juga mudah masuk ke dalam sel dan dengan demikian dapat membuat bagian dalam sel menjadi lebih asam. Belum jelas apakah reseptor merespons efek intraseluler atau ekstraseluler dari karbon dioksida atau keasaman.

Bahkan jika badan karotis dan aorta dihilangkan, menghirup gas yang mengandung karbon dioksida merangsang pernapasan. Pengamatan ini menunjukkan bahwa harus ada reseptor tambahan yang merespons perubahan tekanan parsial karbon dioksida. Pemikiran saat ini menempatkan reseptor ini di dekat permukaan bawah (bagian ventral) medula. Namun, pemeriksaan mikroskopis belum secara meyakinkan mengidentifikasi sel kemoreseptor spesifik di wilayah ini. Area yang sama dari medula ventral juga mengandung neuron vasomotor yang berkaitan dengan pengaturan tekanan darah. Beberapa peneliti menduga bahwa respons pernapasan yang dihasilkan di permukaan medula ventral bersifat langsung dan disebabkan oleh gangguan masukan eksitatori dan inhibitori ke pernapasan dari neuron vasomotor ini. Mereka lebih lanjut menduga bahwa kemoreseptor pernapasan yang merespons karbon dioksida terdistribusi lebih difus di otak.

3.4 Transportasi Gas

3.4.1 Oksigen (O_2)

Oksigen sulit larut dalam plasma, sehingga kurang dari 2 persen oksigen yang diangkut terlarut dalam plasma. Sebagian besar oksigen terikat Hemoglobin, protein yang terkandung dalam sel darah merah. Hemoglobin terdiri dari empat struktur cincin yang mengandung besi (heme) yang terikat secara kimia dengan protein besar (globin). Setiap atom besi dapat mengikat dan kemudian melepaskan molekul oksigen. Hemoglobin yang cukup hadir dalam darah manusia normal untuk memungkinkan pengangkutan sekitar 0,2 mililiter oksigen per mililiter darah. Jumlah oksigen yang terikat pada hemoglobin bergantung pada tekanan parsial oksigen di paru-paru tempat darah terpapar. Kurva yang mewakili kandungan oksigen dalam darah pada berbagai tekanan parsial oksigen, disebut kurva disosiasi oksigen, adalah bentuk S yang khas karena pengikatan oksigen ke satu atom besi memengaruhi kemampuan oksigen untuk mengikat ke tempat besi lainnya. Di alveoli di permukaan laut, tekanan parsial oksigen cukup untuk mengikat oksigen ke hampir semua tempat besi yang tersedia pada molekul hemoglobin.



Gambar 3. 9 Struktur Hemoglobin

Tidak semua oksigen yang diangkut dalam darah ditransfer ke sel-sel jaringan. Jumlah oksigen yang diekstraksi oleh sel bergantung pada laju pengeluaran energinya. Saat istirahat, darah vena yang kembali ke paru-paru masih mengandung 70 hingga 75 persen oksigen yang terdapat dalam darah arteri; cadangan ini tersedia untuk memenuhi peningkatan kebutuhan oksigen. Selama latihan ekstrem, jumlah oksigen yang tersisa dalam darah vena berkurang hingga 10 hingga 25 persen. Pada bagian paling curam dari kurva disosiasi oksigen (bagian antara 10 dan 40 milimeter tekanan parsial merkuri), penurunan tekanan parsial oksigen dalam darah yang relatif kecil dikaitkan dengan pelepasan oksigen terikat yang relatif besar.

Hemoglobin tidak hanya mengikat oksigen tetapi juga zat lain seperti ion hidrogen (yang menentukan keasaman, atau pH, darah), karbon dioksida, dan 2,3-difosfoglisarat (2,3-DPG; garam dalam sel darah merah

yang berperan dalam melepaskan oksigen dari hemoglobin dalam sirkulasi perifer). Zat-zat ini tidak mengikat hemoglobin di tempat pengikatan oksigen. Namun, dengan pengikatan oksigen, terjadi perubahan struktur molekul hemoglobin yang memengaruhi kemampuannya untuk mengikat gas atau zat lain. Sebaliknya, pengikatan zat-zat ini pada hemoglobin memengaruhi afinitas hemoglobin terhadap oksigen. (Afinitas menunjukkan kecenderungan molekul dari spesies yang berbeda untuk saling mengikat.) Peningkatan ion hidrogen, karbon dioksida, atau 2,3-DPG menurunkan afinitas hemoglobin terhadap oksigen, dan kurva disosiasi oksigen bergeser ke kanan. Karena penurunan afinitas ini, peningkatan tekanan parsial oksigen diperlukan untuk mengikat sejumlah oksigen tertentu ke hemoglobin. Pergeseran kurva ke kanan dianggap bermanfaat dalam melepaskan oksigen ke jaringan ketika kebutuhan oksigen sangat tinggi, seperti yang terjadi pada anemia atau olahraga ekstrem. Penurunan konsentrasi normal ion hidrogen, karbon dioksida, dan 2,3-DPG mengakibatkan peningkatan afinitas hemoglobin terhadap oksigen, dan kurva bergeser ke kiri. Pergeseran ini meningkatkan ikatan oksigen dengan hemoglobin pada setiap tekanan parsial oksigen dan dianggap bermanfaat jika ketersediaan oksigen berkurang, seperti yang terjadi pada ketinggian ekstrem.

Perubahan suhu memengaruhi kurva disosiasi oksigen dengan cara yang serupa. Peningkatan suhu menggeser kurva ke kanan (afinitas menurun; pelepasan oksigen meningkat); penurunan suhu

menggeser kurva ke kiri (afinitas meningkat). Rentang suhu tubuh yang biasanya ditemukan pada manusia relatif sempit, sehingga perubahan afinitas oksigen yang berkaitan dengan suhu kurang memiliki dampak fisiologis.

3.4.2 Karbon Dioksida (CO₂)

Pengangkutan karbon dioksida dalam darah jauh lebih kompleks. Sebagian kecil karbon dioksida, sekitar 5 persen, tetap tidak berubah dan diangkut dalam bentuk terlarut dalam darah. Sisanya ditemukan dalam kombinasi kimia reversibel dalam sel darah merah atau plasma. Sebagian karbon dioksida berikatan dengan protein darah, terutama hemoglobin, untuk membentuk senyawa yang dikenal sebagai karbamat. Sekitar 88 persen karbon dioksida dalam darah berada dalam bentuk ion bikarbonat. Distribusi spesies kimia ini antara bagian dalam sel darah merah dan plasma di sekitarnya sangat bervariasi, dengan sel darah merah mengandung jauh lebih sedikit bikarbonat dan lebih banyak karbamat daripada plasma.

Kurang dari 10 persen dari total jumlah karbon dioksida yang dibawa dalam darah dikeluarkan selama perjalanan melalui paru-paru. Pembuangan total akan menyebabkan perubahan keasaman yang signifikan antara darah arteri dan vena. Lebih lanjut, darah biasanya berada di kapiler paru kurang dari satu detik, waktu yang tidak cukup untuk membuang semua karbon dioksida.

Karbon dioksida masuk ke dalam darah di jaringan karena tekanan parsial lokalnya lebih besar daripada tekanan parsialnya dalam darah yang mengalir melalui jaringan. Saat karbon dioksida masuk ke dalam darah, ia bergabung dengan air untuk membentuk Asam karbonat (H_2CO_3), asam yang relatif lemah, yang terdisosiasi menjadi ion hidrogen (H^+) dan ion bikarbonat (HCO_3^-). Keasaman darah hanya sedikit dipengaruhi oleh ion hidrogen yang dilepaskan karena protein darah, terutama hemoglobin, merupakan agen penyangga yang efektif. (Larutan penyangga menahan perubahan keasaman dengan berikatan dengan ion hidrogen yang ditambahkan dan, pada dasarnya, menonaktifkannya.)

Konversi alami karbon dioksida menjadi asam karbonat merupakan proses yang relatif lambat; namun, Karbonat anhidrase, suatu enzim protein yang terdapat di dalam sel darah merah, mengkatalisis reaksi ini dengan kecepatan yang cukup tinggi sehingga dapat diselesaikan hanya dalam sepersekian detik. Karena enzim ini hanya terdapat di dalam sel darah merah, bikarbonat terakumulasi jauh lebih banyak di dalam sel darah merah dibandingkan di dalam plasma. Kemampuan darah untuk membawa karbon dioksida sebagai bikarbonat ditingkatkan oleh sistem transpor ion di dalam membran sel darah merah yang secara bersamaan memindahkan ion bikarbonat keluar dari sel dan masuk ke dalam plasma untuk ditukar dengan ion klorida. Pertukaran kedua ion ini secara bersamaan, yang dikenal sebagai Pergeseran klorida memungkinkan plasma digunakan sebagai tempat penyimpanan bikarbonat tanpa mengubah muatan listrik plasma

maupun sel darah merah. Hanya 26 persen dari total kandungan karbon dioksida darah yang terdapat sebagai bikarbonat di dalam sel darah merah, sementara 62 persen terdapat sebagai bikarbonat di dalam plasma; namun, sebagian besar ion bikarbonat pertama-tama diproduksi di dalam sel, kemudian diangkut ke plasma. Urutan reaksi terbalik terjadi ketika darah mencapai paru-paru, di mana tekanan parsial karbon dioksida lebih rendah daripada di dalam darah (Cloutier, 2019).

Hemoglobin bertindak dengan cara lain untuk memfasilitasi pengangkutan karbon dioksida. Gugus amino pada molekul hemoglobin bereaksi secara reversibel dengan karbon dioksida dalam larutan menghasilkan karbamat. Beberapa situs amino pada hemoglobin bersifat oksilabil, artinya, kemampuannya untuk mengikat karbon dioksida bergantung pada keadaan oksigenasi molekul hemoglobin. Perubahan konfigurasi molekul hemoglobin yang menyertai pelepasan oksigen menyebabkan peningkatan pengikatan karbon dioksida pada gugus amino oksilabil. Dengan demikian, pelepasan oksigen di jaringan tubuh meningkatkan pengikatan karbon dioksida sebagai karbamat. Oksigenasi hemoglobin di paru-paru memiliki efek sebaliknya dan menyebabkan eliminasi karbon dioksida.

Hanya 5 persen karbon dioksida dalam darah yang diangkut bebas dalam larutan fisik tanpa perubahan kimia atau ikatan, namun jumlah ini penting, karena hanya karbon dioksida bebas yang dapat dengan mudah melintasi membran biologis. Hampir setiap molekul karbon dioksida yang dihasilkan oleh metabolisme

harus berada dalam bentuk bebas saat memasuki darah di jaringan dan meninggalkan kapiler di paru-paru. Di antara kedua peristiwa ini, sebagian besar karbon dioksida diangkut sebagai bikarbonat atau karbamat.

3.5 Pertukaran Gas

3.5.1 Pertukaran di Paru (Respirasi Eksternal)

Kurang dari 10 persen dari total jumlah karbon dioksida yang dibawa dalam darah dikeluarkan selama perjalanan melalui paru-paru. Pembuangan total akan menyebabkan perubahan keasaman yang signifikan antara darah arteri dan vena. Lebih lanjut, darah biasanya berada di kapiler paru kurang dari satu detik, waktu yang tidak cukup untuk membuang semua karbon dioksida.

Pengangkutan karbon dioksida dalam darah jauh lebih kompleks. Sebagian kecil karbon dioksida, sekitar 5 persen, tetap tidak berubah dan diangkut dalam bentuk terlarut dalam darah. Sisanya ditemukan dalam kombinasi kimia reversibel dalam sel darah merah atau plasma. Sebagian karbon dioksida berikatan dengan protein darah, terutama hemoglobin, untuk membentuk senyawa yang dikenal sebagai karbamat. Sekitar 88 persen karbon dioksida dalam darah berada dalam bentuk ion bikarbonat. Distribusi spesies kimia ini antara bagian dalam sel darah merah dan plasma di sekitarnya sangat bervariasi, dengan sel darah merah mengandung jauh lebih sedikit bikarbonat dan lebih banyak karbamat daripada plasma (Cloutier, 2019).

Karbon dioksida masuk ke dalam darah di jaringan karena tekanan parsial lokalnya lebih besar daripada tekanan parsialnya dalam darah yang mengalir melalui jaringan. Saat karbon dioksida masuk ke dalam darah, ia bergabung dengan air untuk membentuk Asam karbonat (H_2CO_3), asam yang relatif lemah, yang terdisosiasi menjadi ion hidrogen (H^+) dan ion bikarbonat (HCO_3^-). Keasaman darah hanya sedikit dipengaruhi oleh ion hidrogen yang dilepaskan karena protein darah, terutama hemoglobin, merupakan agen penyangga yang efektif. Larutan penyangga menahan perubahan keasaman dengan berikatan dengan ion hidrogen yang ditambahkan dan, pada dasarnya, menonaktifkannya.

Konversi alami karbon dioksida menjadi asam karbonat merupakan proses yang relatif lambat; namun, karbonat anhidrase, suatu enzim protein yang terdapat di dalam sel darah merah, mengkatalisis reaksi ini dengan kecepatan yang cukup tinggi sehingga dapat diselesaikan hanya dalam sepersekian detik. Karena enzim ini hanya terdapat di dalam sel darah merah, bikarbonat terakumulasi jauh lebih banyak di dalam sel darah merah dibandingkan di dalam plasma. Kemampuan darah untuk membawa karbon dioksida sebagai bikarbonat ditingkatkan oleh sistem transpor ion di dalam membran sel darah merah yang secara bersamaan memindahkan ion bikarbonat keluar dari sel dan masuk ke dalam plasma untuk ditukar dengan ion klorida. Pertukaran kedua ion ini secara bersamaan, yang dikenal sebagai Pergeseran klorida memungkinkan plasma digunakan sebagai tempat penyimpanan bikarbonat tanpa mengubah muatan listrik plasma

maupun sel darah merah. Hanya 26 persen dari total kandungan karbon dioksida darah yang terdapat sebagai bikarbonat di dalam sel darah merah, sementara 62 persen terdapat sebagai bikarbonat di dalam plasma; namun, sebagian besar ion bikarbonat pertama-tama diproduksi di dalam sel, kemudian diangkut ke plasma. Urutan reaksi terbalik terjadi ketika darah mencapai paru-paru, di mana tekanan parsial karbon dioksida lebih rendah daripada di dalam darah (Cloutier, 2019).

Hemoglobin bertindak dengan cara lain untuk memfasilitasi pengangkutan karbon dioksida. Gugus amino pada molekul hemoglobin bereaksi secara reversibel dengan karbon dioksida dalam larutan menghasilkan karbamat. Beberapa situs amino pada hemoglobin bersifat oksilabil, artinya, kemampuannya untuk mengikat karbon dioksida bergantung pada keadaan oksigenasi molekul hemoglobin. Perubahan konfigurasi molekul hemoglobin yang menyertai pelepasan oksigen menyebabkan peningkatan pengikatan karbon dioksida pada gugus amino oksilabil. Dengan demikian, pelepasan oksigen di jaringan tubuh meningkatkan pengikatan karbon dioksida sebagai karbamat. Oksigenasi hemoglobin di paru-paru memiliki efek sebaliknya dan menyebabkan eliminasi karbon dioksida.

Hanya 5 persen karbon dioksida dalam darah yang diangkut bebas dalam larutan fisik tanpa perubahan kimia atau ikatan, namun jumlah ini penting, karena hanya karbon dioksida bebas yang dapat dengan mudah melintasi membran biologis. Hampir setiap molekul karbon dioksida yang dihasilkan oleh metabolisme

harus berada dalam bentuk bebas saat memasuki darah di jaringan dan meninggalkan kapiler di paru-paru. Di antara kedua peristiwa ini, sebagian besar karbon dioksida diangkut sebagai bikarbonat atau karbamat.

Masuknya udara ke dalam alveoli memungkinkan pembuangan karbon dioksida dan penambahan oksigen ke darah vena (Cloutier, 2019). Karena ventilasi merupakan fenomena siklik yang terjadi melalui sistem saluran napas konduksi, tidak semua udara inspirasi ikut serta dalam pertukaran gas. Sebagian udara inspirasi tetap berada di saluran napas konduksi dan tidak mencapai alveoli tempat terjadinya pertukaran gas. Porsi ini kira-kira sepertiga dari setiap napas saat istirahat, tetapi berkurang hingga hanya 10 persen selama berolahraga, karena peningkatan ukuran napas inspirasi.

Berbeda dengan ventilasi yang bersifat siklik, aliran darah melalui paru-paru bersifat kontinu, dan hampir semua darah yang masuk ke paru-paru berpartisipasi dalam pertukaran gas. Efisiensi pertukaran gas sangat bergantung pada distribusi aliran darah dan udara inspirasi yang seragam di seluruh paru-paru. Dalam keadaan sehat, ventilasi dan aliran darah sangat selaras di setiap unit pertukaran di seluruh paru-paru. Bagian bawah paru-paru menerima aliran darah sedikit lebih banyak daripada ventilasi karena gravitasi memiliki efek yang lebih besar pada distribusi darah daripada distribusi udara inspirasi. Dalam keadaan ideal, tekanan parsial oksigen dan karbon dioksida dalam gas alveolus dan darah arteri adalah identik. Biasanya terdapat sedikit perbedaan antara tekanan

oksigen dalam gas alveolus dan darah arteri karena efek gravitasi pada pencocokan dan penambahan sejumlah kecil drainase vena ke aliran darah setelah meninggalkan paru-paru. Peristiwa ini tidak memiliki efek terukur pada tekanan parsial karbon dioksida karena perbedaan antara darah arteri dan vena sangat kecil.

3.5.2 Pertukaran di Jaringan (Respirasi Internal)

Metabolisme sel bergantung pada energi yang berasal dari fosfat berenergi tinggi seperti adenosin trifosfat (ATP), yang ikatan fosfat ketiganya dapat melepaskan sejumlah energi untuk memicu banyak proses sel, seperti kontraksi protein serat otot atau sintesis molekul protein. Dalam proses ini, ATP didegradasi menjadi adenosin difosfat (ADP), molekul yang hanya memiliki dua ikatan fosfat.

Untuk mengisi ulang molekul dengan menambahkan gugus fosfat ketiga, diperlukan energi yang berasal dari pemecahan bahan makanan, atau substrat. Terdapat dua jalur: (1) anaerobik glikolisis, atau fermentasi, yang beroperasi tanpa adanya oksigen; dan (2) metabolisme aerobik, yang membutuhkan oksigen dan melibatkan mitokondria. Jalur anaerobik menghasilkan produk limbah asam dan boros sumber daya: Pemecahan satu molekul glukosa hanya menghasilkan dua molekul ATP. Sebaliknya, metabolisme aerobik memiliki hasil yang lebih tinggi (36 molekul ATP per molekul glukosa) dan menghasilkan "limbah bersih" air dan karbon dioksida, yang mudah dikeluarkan dari tubuh dan didaur ulang

oleh tumbuhan dalam proses fotosintesis. Untuk aktivitas sel tingkat tinggi yang berkelanjutan, jalur metabolisme aerobik lebih disukai. Karena fosforilasi oksidatif hanya terjadi di mitokondria, dan karena setiap sel harus menghasilkan ATP-nya sendiri (tidak dapat diimpor), jumlah mitokondria dalam sel mencerminkan kapasitasnya untuk metabolisme aerobik, atau kebutuhannya akan oksigen.

Pasokan oksigen ke mitokondria dengan laju yang memadai merupakan fungsi penting sistem pernapasan, karena sel-sel hanya menyimpan cadangan fosfat berenergi tinggi dan oksigen dalam jumlah terbatas, sementara mereka biasanya memiliki persediaan substrat yang memadai. Jika pasokan oksigen terganggu selama beberapa menit, banyak sel, atau bahkan organisme, akan mati (Cloutier, 2019).

Oksigen dikumpulkan dari udara lingkungan, ditransfer ke darah di paru-paru, dan diangkut oleh aliran darah ke perifer sel, tempat oksigen dilepaskan untuk mencapai mitokondria melalui difusi. Transfer oksigen ke mitokondria melibatkan beberapa struktur dan berbagai moda transportasi. Proses ini dimulai dengan ventilasi paru-paru, yang dicapai melalui konveksi atau aliran massa udara melalui sistem saluran napas yang bercabang secara cerdas. Pada saluran napas paling perifer, ventilasi alveoli diselesaikan oleh difusi oksigen melalui udara ke permukaan alveolus. Transfer oksigen dari alveolus ke dalam darah kapiler terjadi melalui difusi melintasi penghalang jaringan; didorong oleh perbedaan tekanan parsial oksigen antara udara alveolar dan darah kapiler dan bergantung pada

ketebalan sekitar $0,5 \mu\text{m}$ dan luas permukaan (sekitar 130 m^2) penghalang. Transportasi konvektif oleh darah bergantung pada laju aliran darah (curah jantung) dan pada kapasitas oksigen darah, yang ditentukan oleh kandungan hemoglobin dalam sel darah merah. Langkah terakhir adalah pembuangan oksigen secara difusif dari kapiler ke dalam jaringan dan sel, yang didorong oleh perbedaan tekanan parsial oksigen dan bergantung pada kuantitas darah kapiler di jaringan. Dalam proses ini darah memainkan peran sentral dan memengaruhi semua langkah transportasi: penyerapan oksigen di paru-paru, transportasi oleh aliran darah, dan pembuangan ke sel. Darah juga berfungsi sebagai pembawa kedua gas pernapasan: oksigen, yang diikat oleh hemoglobin dalam sel darah merah, dan karbon dioksida, yang dibawa oleh plasma dan sel darah merah dan yang juga berfungsi sebagai penyangga keseimbangan asam-basa dalam darah dan jaringan (Cloutier, 2019).

Laju metabolisme sel, menentukan kebutuhan oksigen. Saat istirahat, manusia mengonsumsi sekitar 250 ml oksigen setiap menit. Dengan berolahraga, laju ini dapat meningkat lebih dari 10 kali lipat pada individu sehat normal, tetapi atlet yang sangat terlatih dapat mencapai peningkatan lebih dari 20 kali lipat. Seiring semakin banyak sel otot yang terlibat dalam bekerja, kebutuhan ATP dan oksigen meningkat secara linear seiring dengan laju kerja. Hal ini disertai dengan peningkatan curah jantung, terutama karena denyut jantung yang lebih tinggi, dan peningkatan ventilasi paru-paru; akibatnya, perbedaan tekanan parsial

oksigen melintasi sawar udara-darah meningkat dan transfer oksigen melalui difusi meningkat. Penyesuaian dinamis terhadap kebutuhan otot ini terjadi hingga batas yang dua kali lebih tinggi pada atlet dibandingkan pada individu yang tidak terlatih. Rentang metabolisme oksidatif yang mungkin terjadi dari istirahat hingga latihan maksimal disebut ruang lingkup aerobik. Batas atas konsumsi oksigen tidak ditentukan oleh kemampuan otot untuk bekerja, melainkan oleh keterbatasan kemampuan sistem pernapasan untuk menyediakan atau memanfaatkan oksigen dengan kecepatan yang lebih tinggi. Otot dapat bekerja lebih banyak, tetapi di luar ruang lingkup aerobik, mereka harus kembali ke metabolisme anaerobik, sehingga produk limbah, terutama asam laktat, menumpuk dan membatasi durasi kerja.

Batasan metabolisme oksidatif karenanya ditetapkan oleh beberapa fitur sistem pernapasan, dari paru-paru hingga mitokondria. Mengetahui secara tepat apa yang menetapkan batas tersebut penting untuk memahami respirasi sebagai proses vital utama, tetapi tidak mudah, karena kompleksitas sistem tersebut. Banyak yang telah dipelajari dari fisiologi dan morfologi komparatif, berdasarkan pengamatan bahwa laju konsumsi oksigen berbeda secara signifikan di antara spesies. Misalnya, spesies atletik di alam, seperti anjing atau kuda, memiliki cakupan aerobik lebih dari dua kali lipat lebih besar daripada hewan lain dengan ukuran yang sama; ini disebut variasi adaptif. Kemudian, konsumsi oksigen per satuan massa tubuh meningkat seiring hewan menjadi lebih kecil, sehingga tikus

mengonsumsi oksigen enam kali lebih banyak per gram massa tubuh daripada sapi, suatu fitur yang disebut variasi alometrik. Lebih lanjut, cakupan aerobik dapat ditingkatkan dengan pelatihan pada individu, tetapi variasi yang diinduksi ini paling baik mencapai perbedaan 50 persen antara keadaan tidak terlatih dan terlatih, jauh di bawah perbedaan antarspesies (Cloutier, 2019).

Dalam lingkup aerobik, penyesuaian terjadi karena variasi fungsional. Misalnya, curah jantung meningkat dengan meningkatnya detak jantung. Semakin banyak bukti menunjukkan bahwa batas metabolisme oksidatif berkaitan dengan fitur desain struktural sistem. Jumlah total mitokondria dalam otot rangka berbanding lurus dengan konsumsi oksigen maksimal, dalam semua jenis variasi.

Dalam latihan, mitokondria meningkat sebanding dengan peningkatan cakupan aerobik. Mitokondria mengatur kebutuhan oksigen, dan tampaknya mampu mengonsumsi hingga 5 ml oksigen per menit dan gram mitokondria. Jika energi (ATP) perlu diproduksi pada tingkat yang lebih tinggi, sel otot memproduksi lebih banyak mitokondria. Dengan demikian, ada kemungkinan bahwa konsumsi oksigen terbatas di perifer, pada langkah terakhir metabolisme aerobik. Namun, ada juga kemungkinan bahwa bagian yang lebih sentral dari sistem pernapasan dapat membatasi transportasi oksigen, terutama jantung, yang kapasitasnya untuk memompa darah mencapai batas, baik dari segi kecepatan maupun ukuran ventrikel, yang menentukan volume darah yang dapat dipompa setiap

kali denyutan. Persoalan keterbatasan perifer versus sentral masih diperdebatkan. Namun, tampaknya paru-paru sebagai organ pertukaran gas memiliki redundansi yang cukup sehingga tidak membatasi metabolisme aerobik di lokasi penyerapan oksigen. Namun, sementara mitokondria, darah, pembuluh darah, dan jantung dapat meningkat jumlah, laju, atau volumenya untuk meningkatkan kapasitasnya ketika kebutuhan energi meningkat, seperti saat latihan, paru-paru tidak memiliki kapasitas untuk beradaptasi. Jika ini terbukti benar, paru-paru mungkin merupakan batas akhir bagi sistem pernapasan, yang melampaui batas tersebut metabolisme oksidatif tidak dapat ditingkatkan melalui latihan (Cloutier, 2019).

3.6 Keterkaitan Sistem Kardiovaskular dan Respirasi

Interaksi antara sistem kardiovaskuler dan sistem respirasi merupakan kunci berfungsinya sistem secara keseluruhan. Sel-sel mengatur kebutuhan untuk penyerapan oksigen dan pengeluaran karbon dioksida, yaitu untuk pertukaran gas di paru-paru. Sirkulasi darah menghubungkan tempat-tempat pemanfaatan dan penyerapan oksigen. Berfungsinya sistem pernapasan bergantung pada kemampuan sistem untuk melakukan penyesuaian fungsional terhadap berbagai kebutuhan dan fitur desain urutan struktur yang terlibat, yang menentukan batas respirasi (West, 2020).

Tujuan utama respirasi adalah menyediakan oksigen ke sel-sel dengan laju yang memadai untuk memenuhi kebutuhan metabolismenya. Hal ini melibatkan pengangkutan oksigen dari paru-paru ke jaringan melalui sirkulasi darah.

Pada zaman kuno dan abad pertengahan, jantung dianggap sebagai tungku tempat "api kehidupan" menjaga darah tetap mendidih. Biologi sel modern telah mengungkap kebenaran di balik metafora tersebut. Setiap sel memelihara seperangkat tungku, yaitu mitokondria, yang melaluinya, oksidasi bahan makanan seperti glukosa, memenuhi kebutuhan energi sel. Oleh karena itu, tujuan utama respirasi adalah penyediaan oksigen ke mitokondria.

Metabolisme sel bergantung pada energi yang berasal dari fosfat berenergi tinggi seperti adenosin trifosfat (ATP), yang ikatan fosfat ketiganya dapat melepaskan sejumlah energi untuk memicu berbagai proses sel, seperti kontraksi protein serat otot atau sintesis molekul protein. Dalam proses ini, ATP didegradasi menjadi adenosin difosfat (ADP), molekul yang hanya memiliki dua ikatan fosfat. Untuk mengisi ulang molekul dengan menambahkan gugus fosfat ketiga, diperlukan energi yang berasal dari pemecahan bahan makanan, atau substrat. Terdapat dua jalur: (1) anaerobik glikolisis, atau fermentasi, yang beroperasi tanpa adanya oksigen; dan (2) metabolisme aerobik, yang membutuhkan oksigen dan melibatkan mitokondria. Jalur anaerobik menghasilkan produk limbah asam dan boros sumber daya: Pemecahan satu molekul glukosa hanya menghasilkan dua molekul ATP. Sebaliknya, metabolisme aerobik memiliki hasil yang lebih tinggi (36 molekul ATP per molekul glukosa) dan menghasilkan "limbah bersih" air dan karbon dioksida, yang mudah dikeluarkan dari tubuh dan didaur ulang oleh tumbuhan dalam proses fotosintesis. Untuk aktivitas sel tingkat tinggi yang berkelanjutan, jalur metabolisme aerobik lebih disukai. Karena fosforilasi oksidatif hanya terjadi di mitokondria, dan karena setiap sel harus menghasilkan ATP-nya sendiri (tidak dapat diimpor),

jumlah mitokondria dalam sel mencerminkan kapasitasnya untuk metabolisme aerobik, atau kebutuhannya akan oksigen.

Pasokan oksigen ke mitokondria dengan laju yang memadai merupakan fungsi penting sistem pernapasan, karena sel-sel hanya menyimpan cadangan fosfat berenergi tinggi dan oksigen dalam jumlah terbatas, sementara mereka biasanya memiliki persediaan substrat yang memadai. Jika pasokan oksigen terganggu selama beberapa menit, banyak sel, atau bahkan organisme, akan mati.

Oksigen dikumpulkan dari udara lingkungan, ditransfer ke darah di paru-paru, dan diangkut oleh aliran darah ke perifer sel, tempat oksigen dilepaskan untuk mencapai mitokondria melalui difusi. Transfer oksigen ke mitokondria melibatkan beberapa struktur dan berbagai moda transportasi. Proses ini dimulai dengan ventilasi paru-paru, yang dicapai melalui konveksi atau aliran massa udara melalui sistem saluran napas yang bercabang secara cerdik. Pada saluran napas paling perifer, ventilasi alveoli diselesaikan oleh difusi oksigen melalui udara ke permukaan alveolus.

Transfer oksigen dari alveolus ke dalam darah kapiler terjadi melalui difusi melintasi penghalang jaringan ; didorong oleh perbedaan tekanan parsial oksigen antara udara alveolar dan darah kapiler dan bergantung pada ketebalan (sekitar $0,5\ \mu\text{m}$ [$1\ \mu\text{m} = 0,000039\ \text{inci}$]) dan luas permukaan (sekitar 130 meter persegi [sekitar 1.400 kaki persegi] pada manusia) penghalang. Transportasi konvektif oleh darah bergantung pada laju aliran darah (curah jantung) dan pada kapasitas oksigen darah, yang ditentukan oleh kandungan hemoglobin dalam sel darah merah. Langkah terakhir adalah pembuangan oksigen secara difusif dari kapiler ke dalam jaringan dan sel, yang didorong oleh perbedaan tekanan parsial oksigen dan bergantung pada kuantitas darah kapiler di jaringan. Dalam proses ini darah

memainkan peran sentral dan memengaruhi semua langkah transportasi: penyerapan oksigen di paru-paru, transportasi oleh aliran darah, dan pembuangan ke sel. Darah juga berfungsi sebagai pembawa kedua gas pernapasan: oksigen, yang diikat oleh hemoglobin dalam sel darah merah, dan karbon dioksida, yang dibawa oleh plasma dan sel darah merah dan yang juga berfungsi sebagai penyangga keseimbangan asam-basa dalam darah dan jaringan.

Metabolisme, atau lebih tepatnya, laju metabolisme sel, menentukan kebutuhan oksigen. Saat istirahat, manusia mengonsumsi sekitar 250 ml (sekitar 15 inci kubik) oksigen setiap menit. Dengan berolahraga, laju ini dapat meningkat lebih dari 10 kali lipat pada individu sehat normal, tetapi atlet yang sangat terlatih dapat mencapai peningkatan lebih dari 20 kali lipat. Seiring semakin banyak sel otot yang terlibat dalam bekerja, kebutuhan ATP dan oksigen meningkat secara linear seiring dengan laju kerja. Hal ini disertai dengan peningkatan curah jantung, terutama karena denyut jantung yang lebih tinggi, dan peningkatan ventilasi paru-paru; akibatnya, perbedaan tekanan parsial oksigen melintasi sawar udara-darah meningkat dan transfer oksigen melalui difusi meningkat. Penyesuaian dinamis terhadap kebutuhan otot ini terjadi hingga batas yang dua kali lebih tinggi pada atlet dibandingkan pada individu yang tidak terlatih.

Rentang metabolisme oksidatif yang mungkin terjadi dari istirahat hingga latihan maksimal ini disebut ruang lingkup aerobik. Batas atas konsumsi oksigen tidak ditentukan oleh kemampuan otot untuk bekerja, melainkan oleh keterbatasan kemampuan sistem pernapasan untuk menyediakan atau memanfaatkan oksigen dengan kecepatan yang lebih tinggi. Otot dapat bekerja lebih banyak, tetapi di luar ruang lingkup aerobik, mereka harus kembali ke

metabolisme anaerobik, sehingga produk limbah, terutama asam laktat, menumpuk dan membatasi durasi kerja.

Batasan metabolisme oksidatif karenanya ditetapkan oleh beberapa fitur sistem pernapasan, dari paru-paru hingga mitokondria. Mengetahui secara tepat apa yang menetapkan batas tersebut penting untuk memahami respirasi sebagai proses vital utama, tetapi tidak mudah, karena kompleksitas sistem tersebut. Banyak yang telah dipelajari dari fisiologi dan morfologi komparatif, berdasarkan pengamatan bahwa laju konsumsi oksigen berbeda secara signifikan di antara spesies. Misalnya, spesies atletik di alam, seperti anjing atau kuda, memiliki cakupan aerobik lebih dari dua kali lipat lebih besar daripada hewan lain dengan ukuran yang sama; ini disebut variasi adaptif. Kemudian, konsumsi oksigen per satuan massa tubuh meningkat seiring hewan menjadi lebih kecil, sehingga tikus mengonsumsi oksigen enam kali lebih banyak per gram massa tubuh daripada sapi, suatu fitur yang disebut variasi alometrik. Lebih lanjut, cakupan aerobik dapat ditingkatkan dengan pelatihan pada individu, tetapi variasi yang diinduksi ini paling baik mencapai perbedaan 50 persen antara keadaan tidak terlatih dan terlatih, jauh di bawah perbedaan antarspesies.

Dalam lingkup aerobik, penyesuaian terjadi karena variasi fungsional. Misalnya, curah jantung meningkat dengan meningkatnya Detak jantung. Semakin banyak bukti menunjukkan bahwa batas metabolisme oksidatif berkaitan dengan fitur desain struktural sistem. Jumlah total mitokondria dalam otot rangka berbanding lurus dengan konsumsi oksigen maksimal, dalam semua jenis variasi. Dalam latihan, mitokondria meningkat sebanding dengan peningkatan cakupan aerobik. Mitokondria mengatur kebutuhan oksigen, dan tampaknya mampu mengonsumsi hingga 5 ml (0,3 inci kubik) oksigen per menit dan gram

mitokondria. Jika energi (ATP) perlu diproduksi pada tingkat yang lebih tinggi, sel otot memproduksi lebih banyak mitokondria. Dengan demikian, ada kemungkinan bahwa konsumsi oksigen terbatas di perifer, pada langkah terakhir metabolisme aerobik. Namun, ada juga kemungkinan bahwa bagian yang lebih sentral dari sistem pernapasan dapat membatasi transportasi oksigen, terutama jantung, yang kapasitasnya untuk memompa darah mencapai batas, baik dari segi kecepatan maupun ukuran ventrikel, yang menentukan volume darah yang dapat dipompa setiap kali denyutan. Persoalan keterbatasan perifer versus sentral masih diperdebatkan. Namun, tampaknya paru-paru sebagai organ pertukaran gas memiliki redundansi yang cukup sehingga tidak membatasi metabolisme aerobik di lokasi penyerapan oksigen. Namun, sementara mitokondria, darah, pembuluh darah, dan jantung dapat meningkat jumlah, laju, atau volumenya untuk meningkatkan kapasitasnya ketika kebutuhan energi meningkat, seperti saat latihan, paru-paru tidak memiliki kapasitas untuk beradaptasi. Jika ini terbukti benar, paru-paru mungkin merupakan batas akhir bagi sistem pernapasan, yang melampaui batas tersebut metabolisme oksidatif tidak dapat ditingkatkan melalui latihan.

3.7 Gangguan dan Penyakit Terkait

- Penyakit kardiovaskular

1. Gagal Jantung

Gagal jantung kongestif (juga disebut gagal jantung) adalah kondisi yang diakibatkan oleh berbagai penyakit jantung yang berhubungan dengan fungsi pemompaan jantung yang tidak memadai. Ketidakmampuan jantung untuk memompa

secara efektif menyebabkan penumpukan darah di paru-paru dan vena, berkurangnya aliran darah ke jaringan, dan penumpukan cairan di jaringan edema, yang menyebabkan kongesti sirkulasi. Gagal jantung kongestif sebagian disebabkan oleh konsekuensi mekanisme kompensasi disfungsi jantung dan sebagian lagi oleh efek langsung penurunan aliran darah ke jantung. Masalah-masalah ini seringkali berkaitan dengan retensi garam dan air dalam jaringan dan dapat bervariasi dari gejala minimal hingga edema paru (akumulasi cairan abnormal di paru-paru) hingga kematian jantung mendadak (Zipes *et al.*, 2018).

2. Hipertensi

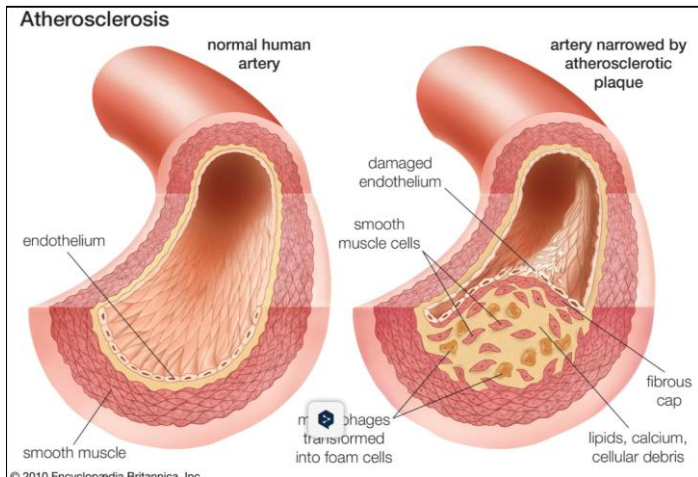
Hipertensi adalah penyakit di mana pengaturan tekanan darah tidak normal, sehingga mengakibatkan tekanan arteri yang secara kronis lebih tinggi dari normal. Hipertensi disebabkan oleh beberapa penyebab, tetapi penyebab bentuk yang paling umum (hipertensi esensial) belum dipahami. Kecenderungan keluarga terhadap hipertensi telah ditemukan pada orang dengan penyakit ini, dan mungkin terdapat kelainan genetik dasar yang melibatkan permeabilitas membran sel dalam pembuluh darah. Kelainan ini dapat membuat orang tersebut kurang mampu mentoleransi tekanan darah tinggi.

Konsumsi garam berlebihan dalam makanan telah dianggap sebagai penyebab hipertensi pada orang-orang tertentu. Stres juga telah terbukti menyebabkan hipertensi, dan rasa takut dan cemas dapat menyebabkan peningkatan tekanan darah karena peningkatan aktivitas dalam sistem saraf simpatik. Hormon dan zat vasoaktif lainnya (zat yang merelaksasi atau menyempitkan pembuluh darah) memiliki efek langsung pada tekanan darah, tetapi interaksi faktor-faktor ini masih belum jelas. Hipertensi juga disebabkan oleh sejumlah jenis penyakit ginjal kronis (ginjal) dan dari beberapa tumor kelenjar adrenal. Dalam kelainan struktural tertentu dari aorta, seperti koarktasio, di mana lapisan tengah arteri berubah bentuk dengan penyempitan saluran yang dihasilkan, tekanan arteri di bagian atas tubuh menjadi sangat tinggi (Zipes *et al.*, 2018).

3. Aterosklerosis

Aterosklerosis adalah penyakit yang ditemukan di arteri berukuran besar dan sedang. Penyakit ini ditandai dengan pengendapan zat lemak, seperti kolesterol, di lapisan paling dalam arteri. Saat endapan lemak menjadi lebih besar, sel darah putih inflamasi yang disebut makrofag mencoba untuk menghilangkan endapan lipid dari dinding arteri. Namun, makrofag berisi lipid, yang disebut "sel busa," tumbuh semakin tidak efisien dalam menghilangkan lipid dan

mengalami kematian sel, terakumulasi di tempat pengendapan lipid. Saat endapan lipid fokal ini tumbuh lebih besar, mereka dikenal sebagai plak aterosklerotik dan mungkin memiliki distribusi dan ketebalan yang bervariasi. Dalam sebagian besar kondisi, penggabungan lipoprotein kaya kolesterol adalah faktor dominan dalam menentukan apakah plak berkembang secara progresif atau tidak (Wilkins *et al.*, 2021).



Gambar 3. 10 Diagram Penampang Pembuluh Darah Arteri yang Normal dan Mengalami Aterosklerosis

Cedera endotel yang dihasilkan (atau yang dapat terjadi secara independen) menyebabkan keterlibatan dua jenis sel yang bersirkulasi dalam darah trombosit dan monosit (sejenis sel darah putih). Trombosit melekat pada area cedera endotel dan pada dirinya sendiri. Trombosit memerangkap

fibrinogen, suatu protein plasma, yang menyebabkan pembentukan trombus fibrinogen-trombosit. Trombosit menyimpan faktor pro-inflamasi, yang disebut kemokin, pada dinding pembuluh darah. Pengamatan pada bayi dan anak kecil menunjukkan bahwa aterosklerosis dapat dimulai sejak usia dini sebagai garis-garis penimbunan lemak (*fatty streaks*) (Zipes *et al.*, 2018).

- Penyakit respirasi

1. Asma

Asma ditandai dengan kontraksi spasmodik otot polos saluran napas, peningkatan produksi lendir yang sangat kental oleh kelenjar lendir bronkial, dan, pada serangan berat, obstruksi saluran napas akibat lendir yang terakumulasi di cabang bronkial (Wilkins *et al.*, 2021). Hal ini mengakibatkan kesulitan bernapas, baik yang lebih besar maupun lebih kecil. Salah satu pendekatan untuk mengklasifikasikan asma adalah membedakan kasus-kasus yang terjadi dengan gejala yang dapat diidentifikasi. Antigen, di mana antigen memengaruhi sel-sel jaringan yang disensitisasi oleh antibodi spesifik, dan kasus-kasus yang terjadi tanpa antigen atau antibodi spesifik yang dapat diidentifikasi. Kondisi pertama dikenal sebagai asma ekstrinsik dan yang terakhir disebut asma intrinsik. Asma ekstrinsik umumnya bermanifestasi pertama kali pada masa

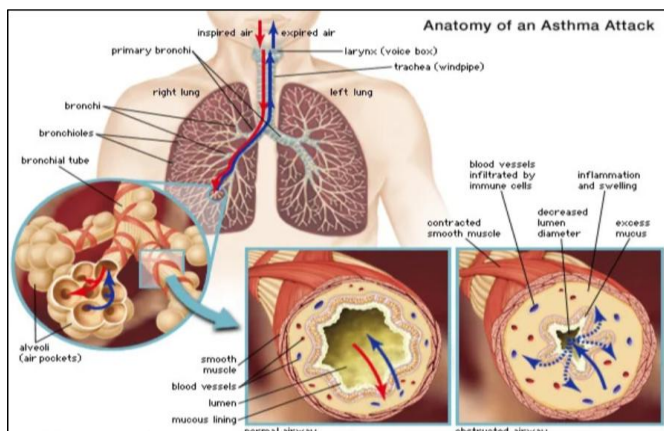
kanak-kanak karena penderitanya mewarisi karakteristik atopik: serum mengandung antigen spesifik terhadap serbuk sari, spora jamur, berbagai jenis protein hewani, dan zat dari berbagai serangga, terutama kecoak dan tungau yang terdapat dalam debu rumah.

Eksaserbasi asma ekstrinsik dipicu oleh kontak dengan salah satu zat yang telah menyebabkan sensitisasi; obstruksi jalan napas seringkali memburuk pada dini hari. Bentuk asma lainnya, asma intrinsik, dapat berkembang pada usia berapa pun, dan mungkin tidak terdapat bukti antigen spesifik. Penderita asma intrinsik mengalami serangan obstruksi jalan napas yang tidak terkait dengan perubahan musim, meskipun tampaknya obstruksi jalan napas tersebut dapat dipicu oleh infeksi, yang dalam banyak kasus diasumsikan sebagai virus. Serangan asma dapat dipicu oleh makanan. Misalnya, pada anak kecil, sensitivitas terhadap susu dapat memicu serangan, dan pada beberapa orang dewasa, sensitivitas terhadap senyawa sulfit yang terdapat dalam beberapa makanan dan anggur dapat memicu serangan. Sebagian penderita asma sangat sensitif terhadap aspirin (asam asetilsalisilat) sehingga konsumsi bahan kimia ini dapat menyebabkan serangan yang mengancam jiwa.

Pada beberapa orang, asma didapat akibat paparan di tempat kerja (bentuk khusus asma intrinsik). Paparan resin solder

yang digunakan dalam industri elektronik, toluena diisosiyanat (digunakan dalam banyak proses sebagai pelarut), debu cedar merah barat (di mana asam polikatat merupakan agen penyebabnya), dan banyak zat lainnya dapat memicu kondisi asma, dengan obstruksi aliran udara yang parah ketika subjek terpapar oleh agen tersebut (Fishman & Elias, 2008).

Individu yang menderita asma jenis apa pun dapat mengalami obstruksi aliran udara ketika diberikan aerosol histamin atau metilkolin dengan konsentrasi yang jauh lebih rendah daripada yang memicu obstruksi aliran udara pada orang sehat. Individu dengan asma juga dapat mengalami obstruksi aliran udara saat menghirup udara dingin atau saat berolahraga. Karakteristik ini digunakan di laboratorium untuk mempelajari status jalan napas pasien.



Gambar 3. 11 Paru-paru Penderita Asma

2. Pneumonia

Pneumonia merupakan penyakit pernapasan yang menyebabkan kematian tertinggi dan akibatnya menjadi salah satu penyakit yang paling ditakuti. Karena sering menyebabkan kematian lansia dengan disabilitas berat, pneumonia juga dikenal sebagai "sahabat orang tua". Bentuk penyakit yang paling umum, pneumonia streptokokus (kadang-kadang disebut pneumonia pneumokokus), disebabkan oleh streptokokus yang disebut *Streptococcus pneumoniae*. Bentuk pneumonia ini dimulai secara tiba-tiba dengan demam tinggi dan malaise berat yang diikuti oleh resolusi alami pada penyintas setelah beberapa hari atau lebih lama. Dalam beberapa kasus, infeksi diikuti oleh komplikasi, seperti abses paru-paru, pleuritis, atau gagal jantung. Terapi antibiotik yang cepat mengendalikan proses akut dalam waktu 24 jam dalam banyak kasus; namun, beberapa kematian terjadi meskipun telah dilakukan terapi antibiotik yang tepat. Munculnya galur *S. pneumoniae* yang resistan terhadap antibiotik merupakan kekhawatiran yang berkembang (Fishman & Elias, 2008).

Pneumonia streptokokus juga dapat terjadi sebagai komplikasi dari serangan influenza akut karena kerentanan terhadap infeksi oleh streptokokus meningkat. Selain

itu, mortalitas influenza yang jauh lebih rendah dapat dijelaskan oleh antibiotik yang efektif melawan streptokokus. Pneumonia stafilokokus terjadi sebagai penyakit akut pada anak kecil dan dapat menyebabkan kerusakan jaringan paru yang cepat dengan pembentukan abses; namun, jika keadaan akut dapat diatasi, seperti yang biasanya terjadi dengan kemoterapi, paru-paru akan pulih sepenuhnya. Jenis pneumonia ini juga dapat terjadi sebagai komplikasi dari penyakit paru-paru yang sudah ada sebelumnya dalam bentuk apa pun dan dapat terjadi setelah aspirasi isi lambung ke dalam paru-paru. Perkembangan stafilokokus yang resistan terhadap antibiotik, seperti *Staphylococcus aureus* yang resistan terhadap methicillin (MRSA), berarti bahwa bentuk pneumonia ini dapat menjadi masalah di lingkungan rumah sakit, yang mempersulit penyakit paru-paru lainnya atau terjadi pasca operasi (Fishman & Elias, 2008).

Pneumonia akibat infeksi *Klebsiella pneumoniae* mungkin sulit diobati dan biasanya terjadi sebagai serangkaian episode pneumonia yang berulang, yang masing-masing berlangsung cukup lama dengan penyelesaian yang lambat (Wilkins *et al.*, 2021).

Organisme *Hemophilus influenzae* umumnya diisolasi dari dahak pasien dengan bronkitis kronis selama eksaserbasi infeksi akut dan merupakan penyebab penting pneumonia pada orang dewasa.

3. Kanker paru

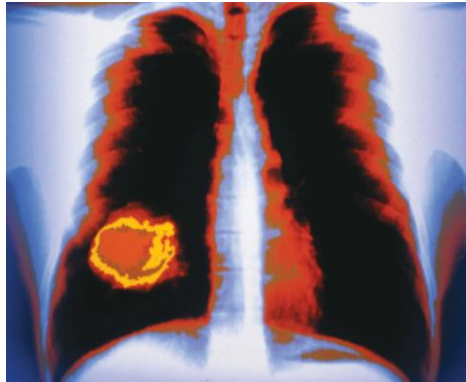
Kanker paru-paru merupakan kondisi yang relatif jarang. Peningkatan insidennya di Eropa setelah Perang Dunia II awalnya dikaitkan dengan metode diagnostik yang lebih baik, tetapi pada tahun 1956 menjadi jelas bahwa laju peningkatannya terlalu besar untuk dijelaskan dengan cara ini. Pada saat itu, studi epidemiologi pertama mulai menunjukkan bahwa sejarah panjang rokok. Merokok dikaitkan dengan peningkatan risiko kematian akibat kanker paru-paru. Pada tahun 1965, kanker paru-paru dan bronkus menyumbang 43 persen dari semua kanker di Amerika Serikat. Pria, insidennya hampir tiga kali lebih besar daripada kanker kedua paling umum (kelenjar prostat) pada pria, yang mencakup 16,7 persen dari seluruh kanker. Pada tahun 1964, *Smoking and Health: Report of the Advisory Committee to the Surgeon General of the Public Health Service* (Amerika Serikat) menyimpulkan secara kategoris bahwa merokok secara kausal berhubungan dengan kanker paru-paru pada pria. Sejak itu, banyak penelitian

lanjutan di berbagai negara telah mengonfirmasi kesimpulan ini.

Insiden kanker paru-paru di jumlah perempuan mulai meningkat pada tahun 1960 dan terus meningkat hingga pertengahan 1990-an. Hal ini diduga disebabkan oleh perkembangan konsumsi rokok berat pada perempuan yang lebih lambat dibandingkan dengan laki-laki, karena perempuan meningkatkan konsumsi rokok mereka secara signifikan selama Perang Dunia II. Pada akhir 1980-an, terdapat bukti yang menunjukkan bahwa puncak insiden kanker paru-paru akibat merokok pada laki-laki mungkin telah terlewati. Pada awal 2000-an, risiko seumur hidup terkena kanker paru-paru hanya sedikit lebih tinggi pada laki-laki dibandingkan perempuan.

Alasan untuk karsinogenesis asap tembakau belum diketahui. Asap tembakau mengandung lebih dari 60 senyawa karsinogenik, termasuk nitrosamin berbahaya dan hidrokarbon aromatik polisiklik. Selain efek agen tunggalnya, merokok sangat meningkatkan kecenderungan serat asbes untuk menyebabkan kanker, meningkatkan risiko kanker paru-paru akibat inhalasi radon anak (produk peluruhan radioaktif gas radon), dan kemungkinan juga meningkatkan risiko

kanker paru-paru akibat paparan arsenik. Orang yang tidak merokok tetapi tinggal atau bekerja dengan perokok dan oleh karena itu terpapar asap rokok orang lain memiliki risiko kanker paru-paru yang lebih tinggi.



Gambar 3. 12 Paru-paru yang Ditumbuhi Tumor

Karena kanker paru-paru ditandai oleh berbagai jenis tumor, karena dapat berlokasi di berbagai bagian paru-paru, dan karena dapat menyebar ke luar paru-paru pada tahap awal, gejala pertama yang dirasakan pasien bervariasi. Gejala-gejala ini dapat meliputi batuk terus-menerus, bercak darah pada dahak, pneumonia yang tidak sembuh total dengan antibiotik, atau sesak napas akibat efusi pleura. Dokter mungkin menemukan metastasis jauh di jaringan tulang atau otak yang menyebabkan gejala yang tidak berhubungan dengan paru-paru.

Kelenjar getah bening mungkin terlibat lebih awal, dan pembesaran kelenjar getah bening di leher dapat menyebabkan pemeriksaan dada dan penemuan tumor (Wilkins *et al.*, 2021). Dalam beberapa kasus, metastasis tumor kecil di kulit, fungsi mental atau perilaku abnormal, penyakit kuning akibat disfungsi hati, atau perubahan sensorik di kaki akibat neuropati perifer (kerusakan saraf di luar sistem saraf pusat) mungkin merupakan tanda pertama penyakit ini.

Dalam kasus lain, hanya perasaan tidak enak badan secara umum, kelelahan yang tidak biasa, atau gejala yang tampaknya ringan dapat menjadi indikasi pertama. Selain itu, beberapa individu yang terkena mengalami clubbing (pembengkakan) pada jari tangan dan kaki, tanda yang tidak biasa yang mungkin hilang setelah operasi pengangkatan tumor. Kanker paru-paru dapat berkembang pada individu yang sudah menderita bronkitis kronis dan oleh karena itu telah menderita batuk selama bertahun-tahun. Diagnosis sering kali bergantung pada pengamatan jaringan untuk pemeriksaan histologis, meskipun dalam beberapa kasus hal ini memerlukan pengangkatan seluruh neoplasma sebelum diagnosis definitif dapat dibuat.

Orang yang terpapar radon berisiko menyebabkan kanker paru-paru. Bahaya paparan radon sebelumnya dianggap terbatas pada penambang uranium, yang karena pekerjaan mereka di bawah tanah, terpapar bahan radioaktif tingkat tinggi ini. Namun, tingkat radon yang signifikan telah terdeteksi di rumah-rumah yang dibangun di atas sumber alami dan dengan semakin efisiennya insulasi rumah, radon dapat mencapai konsentrasi yang cukup tinggi sehingga menempatkan penghuninya pada risiko kanker paru-paru. Variasi regional yang signifikan dalam distribusi alami radon terjadi, dan belum memungkinkan untuk mengukur secara tepat besarnya risiko yang sebenarnya. Pekerja yang terpapar Arsenik dalam operasi peleburan logam, dan masyarakat di sekitar pabrik tempat arsenik dipancarkan, memiliki risiko lebih tinggi terkena kanker paru-paru. Arsenik banyak digunakan dalam industri elektronik dalam pembuatan berbagai produk, termasuk mikrochip dan semikonduktor, dan pengawasan yang cermat terhadap industri ini telah membantu mencegah penyakit di masa mendatang.

Beberapa jenis kanker paru-paru tidak berhubungan dengan kebiasaan merokok. Kanker sel alveolar adalah kondisi yang menyebar perlahan dan memengaruhi pria

dan wanita dalam proporsi yang sama, serta tidak berhubungan dengan kebiasaan merokok. Kanker paru-paru Adenokarsinoma paru-paru juga memiliki insidensi jenis kelamin yang lebih seimbang dibandingkan jenis lainnya; meskipun insidensinya meningkat pada perokok, hal itu juga dapat disebabkan oleh faktor lain.

Umumnya, secara intuitif kita merasa bahwa kita seharusnya dapat membagi kasus kanker paru-paru berdasarkan penyebab-penyebab yang berbeda, berdasarkan persentase. Namun, pada penyakit multifaktorial, hal ini tidak mungkin. Meskipun insiden kanker paru-paru mungkin jauh lebih rendah tanpa merokok, kontribusi faktor ini maupun faktor-faktor lain yang disebutkan tidak dapat diukur secara tepat. Penanganan sebagian besar kanker paru-paru dapat melibatkan kemoterapi, terapi radiasi, atau pembedahan.

DAFTAR PUSTAKA

- Cloutier, M. M. (2019). *Respiratory physiology* (2nd ed.). Elsevier.
- Fishman, A. P., & Elias, J. A. (2008). *Fishman's pulmonary diseases and disorders* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Levick, J. R. (2018). *An introduction to cardiovascular physiology* (6th ed.). CRC Press.
- Levitzky, M. G. (2022). *Pulmonary physiology* (10th ed.). McGraw-Hill Medical.
- Mohrman, D. E., & Heller, L. J. (2022). *Cardiovascular physiology* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Pagliaro, P., Penna, C., & Rastaldo, R. (2022). *Basic cardiovascular physiology: From molecules to translational medical science*. CRC Press.
- Pappano, A. J., & Wier, W. G. (2022). *Cardiovascular physiology* (11th ed.). Mosby Physiology Series.
- West, J. B. (2020). *West's Respiratory Physiology: The Essentials* (11th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Wilkins, R. L., Dexter, J. R., & Bradbury, C. L. (2020). *Cardiopulmonary Anatomy & Physiology: Essentials for Respiratory Care* (8th ed.). Jones & Bartlett Learning.
- Wilkins, R. L., Stoller, J. K., & Wilkins, R. J. (2021). *Egan's Fundamentals of Respiratory Care* (12th ed.). Elsevier.
- Ward, J. P. T., Ward, J., & Leach, R. M. (2016). *The Respiratory System at A Glance* (3rd ed.). Wiley-Blackwell.
- Weitz, J. I., & Fuster, V. (2022). *Hurst's The Heart* (15th ed.). McGraw-Hill Education.
- Zipes, D. P., Libby, P., Bonow, R. O., Mann, D. L., Tomaselli, G. F., & Braunwald, E. (2018). *Braunwald's Heart Disease: A Textbook Of Cardiovascular Medicine* (11th ed.). Elsevier.

BAB 4

SISTEM PENCERNAAN DAN EKSRESI: PROSES NUTRISI DAN PENGELUARAN ZAT SISA

4.1 Pendahuluan

Tubuh manusia sudah diketahui mempunyai beberapa sistem. Sistem tersebut akan bekerja secara terkoordinasi untuk mempertahankan kehidupan. Di antara sistem yang penting dan saling berkaitan adalah sistem pencernaan dan sistem eksresi. Pada sistem pencernaan akan terjadi proses pembentukan nutrisi dan sistem eksresi berperan dalam pengeluaran zat sisa metabolisme. Kedua sistem ini dibutuhkan oleh tubuh. Tanpa adanya mekanisme ini, tubuh tidak dapat memperoleh energi, membangun jaringan baru, ataupun menjaga keseimbangan internal atau homeostasis (Carola *et al.* 1990).

Sistem pencernaan terdiri atas saluran pencernaan (mulai dari mulut, faring, esophagus, lambung, usus halus, usus besar dan rectum serta anus) dan organ kelenjer (kelenjar saliva, hepar, kantong empedu dan pancreas) yang bekerja sama untuk memecah makanan menjadi molekul sederhana (Darke, *et al.* 2012). Proses pencernaan dapat berlangsung secara mekanis melalui pengunyahan dan pencampuran

makanan secara kimiawi dengan bantuan enzim-enzim pencernaan. Hasil akhir dari proses pencernaan ini berupa nutrisi sederhana seperti glukosa, asam amino, asam lemak, vitamin, dan mineral yang kemudian diserap oleh usus halus untuk diedarkan ke seluruh tubuh melalui sistem peredaran darah (Hall, 2016).

Nutrisi yang telah dimanfaatkan oleh sel-sel tubuh melalui proses metabolisme, akan menghasilkan berbagai zat sisa yang harus dikeluarkan agar tidak menumpuk dan tidak menjadi racun. Kondisi ini akan menunjukkan peran penting dari sistem ekskresi. Sistem ekskresi pada manusia melibatkan organ ginjal, kulit, paru-paru, dan hati. Organ ginjal, berfungsi menyaring darah, membuang kelebihan air, garam, serta zat sisa metabolisme seperti urea dalam bentuk urin yang dialirkan ke ureter, kantong kemih dan uretra (Moore *et al.* 2014). Kulit berperan mengeluarkan keringat, paru-paru mengeluarkan karbondioksida, hati membantu menetralkan zat beracun dan mengubah amonia menjadi urea (Hall 2016).

Berdasarkan hal di atas dapat disimpulkan bahwa sistem pencernaan, proses nutrisi, dan sistem ekskresi merupakan rangkaian mekanisme yang saling berhubungan. Pencernaan mengubah makanan menjadi nutrisi. Nutrisi ini digunakan untuk mendukung metabolisme sel. Sistem ekskresi mengeluarkan zat-zat yang bersifat racun. Pemahaman yang baik dari ketiga aspek ini sangat penting, tidak hanya dalam ilmu biologi, tetapi juga untuk menjaga kesehatan dan kualitas hidup manusia.

4.2 Bagian-Bagian Saluran dan Kelenjar Pencernaan

Sistem ini terdiri atas saluran pencernaan dan organ kelenjar pencernaan. Panjang saluran pencernaan ini berkisar antara 6 – 9 meter. Urutan dari saluran pencernaan ini adalah: 1. mulut, 2. faring, 3. esofagus, 4. gaster (lambung), 5. usus halus (intestinum tenue), 6. usus besar (intestinum crassum), 7. rectum dan anus. Organ yang termasuk kelenjar pencernaan adalah kelenjar saliva, hepar, fesika felea, pankreas

4.2.1 Mulut (Oris)

Mulut mempunyai rongga yang di tutupi oleh bibir atas (labium superius) dan bibir bawah (labium inferius). Pada labium superius ditemukan suatu lekukan kulit antara pertengahan bibir atas dengan bagian bawah sekat hidung yang dikenal dengan piltrum. Di antara labium superius dan labium inferius ditemukan celah yang disebut Rima Oris. Pertemuan antara labium superius dengan labium inferius di sisi lateral dikenal dengan Angulus Oris. Di dalam rongga mulut (cavitas oris) terdiri atas vestibulum dan kavitas oris propria.

➤ Vestibulum Oris

Vestibulum oris merupakan daerah/ruang antara lengkung gigi (arcus dentis) bagian luar dan buka. Vestibulum di luar dibatasi oleh bibir dan pipi, sebelah dalam oleh processus alveolaris dan arcus dentis Vestibulum berhubungan dengan dunia luar melewati rima oris. Vestibulum dianterior dibatasi oleh Labium yang melekat pada gingiva (gusi), disebut frenulum labial superior

(gusi atas) dan frenulum labial inferior (gusi bawah).

➤ **Kavitas Oris Propria (Cavitas Oris Propria)**

Kavitas oris propria adalah bagian yang berada dalam lengkung gigi geligi. Kavitas ini dibatasi bagian atasnya oleh palatum durum (langit-langit keras) dan palatum mole (langit-langit lunak). Bagian dinding lateral kavitas dibatasi oleh pipi dan processus alveolaris, dan dibelakang dibatasi oleh bagian dalam lengkung gigi geligi yang berhubungan dengan faring. Dasar kavitas oris dibentuk oleh m. digastricus venter anterior, m. mylohyoideus dan m. geniohyoideus. Pada kavitas oris propria ada lingua (lidah) dan gigi (dental).

a. Lingua/Lidah

Lidah adalah organ muscular, yang berfungsi untuk mengunyah, pengecapan dan pengucapan yang terletak di rongga mulut dan pharynx. Otot lidah terdiri dari otot instrinsik dan ekstrinsik. Otot instrinsik mempunyai serat lebih halus dibandingkan dengan serat otot ekstrinsik. Otot-otot intrinsik bermanfaat pada saat mengunyah dan mengucapkan kata-kata. Lidah terdiri atas **apeks, korpus, radiks dan fasies inferior lidah**.

Apeks merupakan bagian ujung dari lidah. Apeks bersama dengan **korpus**, membentuk 2/3 bagian depan dari lidah. Permukaan superior korpus lidah dikenal dengan dorsum lidah. Dorsum lidah ditandai dengan adanya linea terminalis yang berbentuk huruf V. Di puncak huruf V dari

linea terminalis terdapat foramen sekum. Pada Dorsum Linguae terdapat tonjolan (papila) sebagai alat pengecap yaitu: papila filiformis, papilla foliata, papilla fungiformis, papilla vallata. **Radiks** lingua merupakan bagian yang menempel pada dasar cavitas oris dan dilekatkan dengan os mandibula dan os hyoideus dengan perantaraan otot. **Facies inferior** lidah merupakan permukaan bawah dari lidah dan dapat dilihat sewaktu lidah diangkat. Di daerah linea mediana terdapat Frenulum Linguae yaitu lipatan mucosa yang menghubungkan facies inferior lingua dengan dasar mulut. Lateral dari frenulum terlihat Vena Profunda Lingua.

Lidah mendapat darah dari arteri lingualis (cabang dari arteri karotis eksterna) dan arteri profunda lingua. Pembuluh darah balik yaitu vena lingualis menerima darah dari Vv. dorsalis lingua. Aliran limfe ini penting diketahui, karena sebagai jalan penyebar kanker. Cairan limfe dari lidah yaitu nodus limfatisi submentalis, nodus limfatisi submandibularis, nodus limfatisi servikalis profundus. Pengaliran limfe ini mempunyai hubungan kolateral. Dua pertiga bagian depan lidah mendapat persarafan dari nervus lingualis (Cabang Nervus mandibularis /NV3), yang berfungsi untuk somatosensorik, dan nervus korda timpani (cabang nervus fasialis) untuk rasa kecap (Taste). Sepertiga bagian posterior lidah dan

valekula epiglotis mendapat persarafan dari
Ramus Lingualis nervus glosifaringeus (N IX)

b. Gigi (dentis)

Gigi adalah alat untuk memotong dan menghancurkan makanan secara gaya tekan /mekanik. Berdasarkan bentuk dan fungsinya, gigi dapat dikelompokkan atas: insisivus (gigi seri) untuk memotong, kaninus (gigi taring) untuk merobek, premolar (geraham kecil) dan molar (geraham besar) untuk mengunyah. Gigi terdiri dari bagian korona dentis, kolum dentis dan radiks dentis. Kedudukan gigi berada dalam alveolus dari prosesus alveolaris dari mandibula dan maksila

4.2.2 Faring (Pharynx)

Faring merupakan lanjutan rongga mulut ke arah belakang bawah dan dirasakan sebagai saluran menelan sesudah rongga mulut, sewaktu makan dan minum. Faring berhubungan dengan bagian belakang hidung, ruang telinga tengah dan esofagus. Faring terdiri dari tiga bagian, yaitu nasofaring, orofaring, dan laringofaring. Pada nasofaring ditemukan bagian tonsila faringea, ostium tuba auditiva. Pada orofaring ditemukan bagian tonsila palatina, uvula, tonsila lingualis dan foramen sekum.

Faring mendapat pendarahan dari cabang arteri maksilaris, arteri fasialis, arteri lingualis dan arteri tiroidea inferior. Pembuluh balik faring mengikuti nama yang sama dan bermuara ke vena yugularis interna. Pembuluh limfe faring umumnya

bermuara ke nodus limfatis servikal. Persarafan berasal dari pleksus faringeus yang dibentuk oleh nervus glossofaringeus dan nervus vagus. Faring berperan dalam proses menelan (deglutisi) dan mencegah makanan masuk ke saluran pernapasan melalui epiglottis.

4.2.3 Esofagus

Esofagus merupakan saluran pencernaan berupa otot. Panjang esofagus berkisar antara 23 – 25 cm. Esofagus terbagi atas tiga pars yaitu servikalis, torakalis dan abdominalis. Esofagus berperan dalam proses menelan (deglutisi) dengan gerakan peristaltik. Pada esofagus terdapat tiga penyempitan, yaitu dipangkal esofagus, di bagian esofagus yang dilintasi aorta, dan pada peralihan esofagus ke gaster.

Esofagus mendapat aliran darah dari arteri tiroidea inferior dan arteri gastrika sinistra. Pembuluh balik esovagus bermuara ke vena tiroidea inferior dan vena gastrika sinistra.

Vena gastrika sinistra bermuara ke vena porta. Persarafan esofagus berasal dari nervus vagus yang berjalan sepanjang permukaan anterior esofagus, dan bersatu dengan pleksus esophagea yang bersifat simpatis

4.2.4 Lambung (Ventriculus/Gaster)

Lambung merupakan organ intraperitoneal, terletak di regio epigastrium dan berbentuk seperti huruf J. Lambung terdiri atas kardia, fundus, korpus dan pilorus. Lambung memiliki dua buah kurvatura, yaitu sebelah dalam kurvatura minor dan sebelah luar

kurvatura major. Lambung memiliki dua pintu yaitu pintu orifisium kardial yang berhubungan dengan esofagus dan pintu orifisium pilori yang berhubungan dengan duodenum.

Lambung merupakan organ intraperitoneal. Bagian peritoneum yang ditemukan dilambung adalah omentum mayor dan omentum minus. Omentum minus mengikat kurvatura minor dengan hepar sedangkan omentum mayor mengikat kurvatura mayor dengan kolon transversum. Lambung pada permukaan anterior berhubungan dengan diafragma, lobus kiri dari hepar serta dinding anterior abdomen, sedangkan permukaan posterior berbatasan dengan aorta, pankreas, limpa, ginjal kiri, kelenjar supra renal serta mesokolon transversum. Lambung merupakan tempat penyimpanan sementara makanan, kira-kira 4 jam, sesudah melalui esofagus. Adanya makanan di lambung menimbulkan rasa kenyang.

Lambung mendapat pendarahan dari arteri gastrika sinistra (cabang trunkus seliakus), arteri gastrika dekstra (cabang arteri hepatika komunis) dan arteri gastroepiploika kanan.

Pembuluh balik lambung bermuara ke vena mesenterika superior, vena porta, dan vena lienalis. Pembuluh limfe yaitu nodus limfatik gastrika superior nodus limfatik gastrika inferior masuk ke nodus limfatik aortikus. Persarafan lambung berasal dari cabang nervus vagus dekstra dan sinistra.

4.2.5 Usus Halus (Intestinum Tenue)

Usus halus merupakan organ pencernaan yang berbentuk tabung, mulai dari pilorus sampai ke valvula ileokaekalis. Panjang usus halus ini lebih kurang 7 m. Usus halus terbagi atas duodenum, yeyunum dan ileum.

- **Duodenum**, disebut juga usus 12 jari, mulai dari pilorus sampai pada fleksura duodenoyeyunalis. Duodenum merupakan organ retroperitoneal. Duodenum berbentuk seperti huruf C, panjang 25 cm, terletak retroperitoneal. dan terdiri atas 4 bagian yaitu superior, desenden, inferior dan asenden. Pada pars desenden terdapat papilla duodeni major dan minor tempat muaranya duktus biliaris dan duktus pankreatikus. Pada lekukan pars desenden ini terdapat pankreas. Duodenum didarahi oleh arteri gastrika dekstra dan arteri pankreatiko duodenale superior (cabang dari arteri hepatika komunis). Pembuluh balik berjalan mengikuti arteri dan bermuara ke vena lienalis dan vena mesenterika superior. Pembuluh limfe mengikuti arteri dan bermuara ke nodus limfatis seliakus. Persarafan duodenum berasal pleksus seliakus.
- **Yeyunum dan ileum** dikenal dengan intestinum mesostenial. Kedua organ ini diliputi oleh peritoneum yang dikenal dengan mesenterium. Panjang yeyunum $\frac{2}{5}$ bagian dan ileum $\frac{3}{5}$ bagian dari panjang intestinum tenue. Pada mesenterium

terdapat pembuluh darah, saraf, dan kelenjar getah bening. Yeyunum dinding lebih tebal dan vili lebih panjang, diameternya mencapai sekitar 4 cm, dan pembuluh darah atau arcade lebih sedikit. Yeyunum sebagian besar berada di regio umbilicalis dan iliaca sinistra. Ileum mempunyai diameter lebih kecil dari yeyunum yaitu sekitar 3.75 cm, lebih tipis dan sedikit vascular dibandingkan dengan yeyunum. Pada ileum ditemukan lebih banyak arkade pembuluh darah dan nodul getah bening (patch Peyer). Ileum sebagian besar berada di regio umbilicalis, hipogastrica, iliaca dextra, dan daerah pelvis. Ileum terminal, biasanya terletak di pelvis, kemudian naik dan berakhir di fossa iliaca dekstra untuk berhubungan dengan sekum melalui valvula ileokaekalis.

Pembuluh darah Yeyunum dan ileum berasal dari cabang arteri mesenterika superior yaitu arteri yeyunalis dan arteri ilealis. Kedua pembuluh ini akan memberikan cabang-cabangnya dan membentuk pleksus atau arkade-arkade. Pembuluh balik usus halus mengikuti arteri dan bermuara ke vena mesenterika superior kemudian membentuk vena porta. Pembuluh limfe yeyunum dan ileum berjalan bersama pembuluh darah dalam mesenterium. Persarafan yeyunum dan ileum berasal dari plexus mesenterikus superior. Plexus ini berada didepan aorta dipangkal arteri mesenterika superior.

4.2.6 Usus Besar atau Kolon (Intestinum Crassum)

Mulai dari ujung akhir ileum sampai rektum (panjangnya kira-kira 1.5 meter) disebut kolon (Intestinum Crassum). Kolon berbentuk seperti huruf U terbalik dan melindungi usus halus. Kolon mempunyai bagian pelindung dari luar yaitu apediks epiploika dan lapisan otot longitudinal, yang mengelilingi kolon membentuk taenia.

Ada empat macam taenia yaitu taenia koli, libera, omentalis dan taenia koli mesokolika. Bagian luar kolon terlihat seperti tonjolan yang dikenal dengan haustra koli. Pada kolon ditemukan bagian organ yaitu sekum, kolon asenden, transversum, desenden dan kolon sigmoid.

Sekum merupakan awal dari kolon dan berupa kantong. Pada sekum ditemukan muara dari ileum (valvula ileosekal) dan apendik vermiformis (usus buntu). Sekum terletak pada intraperitoneal di fossa iliaka dekstra rongga abdomen. Kolon asenden merupakan lanjutan sekum dan terletak retroperitoneal menempel ke dinding belakang rongga abdomen yang mulai valvula ileosekal sampai pada pinggir bawah lobus dekstra hepar. Pada bagian kanan vesika felea, kolon ini membentuk lengkungan dan menyempit sehingga membentuk fleksura koli dekstra.

Kolon transversum merupakan kolon yang paling panjang dan bergerak lebih bebas dibandingkan dengan kolon lainnya, dan terletak intraperitoneal. Kolon desenden berjalan ke bawah dan terletak retroperitoneal. Kolon sigmoid, terletak pada intraperitoneal dan ditemukan mesokolon dan biasanya berada di dalam pelvis. Kolon sigmoid merupakan tempat penyimpanan sementara dari feses.

Pembuluh darah kolon berasal dari cabang arteri mesenterika superior dan arteri mesenterika inferior. Cabang dari arteri mesenterika superior adalah arteri ileokolika memberikan cabang untuk ileum, sekum dan apendiks; arteri kolika dekstra memberikan cabangnya untuk kolon asenden; dan arteri kolika media berjalan pada mesocolon transversum dan memberikan cabang untuk 2/3 proksimal kolon transversum.

Cabang dari arteri mesenterika inferior adalah arteri kolika sinistra. Arteri ini mendarahi 1/3 distal kolon transversum dan kolon desenden. Arteri sigmoidea, berjumlah 2 – 3 buah, memberi vascularisasi pada pars kaudalis kolon desenden dan kolon sigmoid.

Pembuluh balik mengikuti arteri dan bermuara ke vena porta. Pembuluh limfe bermuara ke nodus limfatisi mesenterika superior dan nodus limfatisi mesenterika inferior. Kulon mendapat persarafan dari parasimfatis dan simfatis oleh nervus vagus dan nervus pelvikus.

4.2.7 Rektum dan Canalis Anal (Anus)

Rectum merupakan lanjutan dari kolon sigmoid. Rektum mengikuti kelengkungan sakrum dan setinggi apeks. Dari prostat rektum membelok tegak lurus dan menjadi kanalis anal. Rektum mempunyai panjang 12 cm dan bagian bawah rektum akan menembus diafragma pelvis. Bagian rektum sisi depan atas dan bagian tengah atas diliputi oleh peritoneum. Sedangkan bagian bawah rectum yang melebar, dikenal dengan ampula rekti, tidak diliputi peritoneum. Ampula rekti menembus diafragma pelvis. Daerah ini disebut juga kanalis ani. Kanalis ani dikelilingi oleh muskulus sfingter ani internus yang bersifat involunter dan muskulus sfingter ani eksternus yang bersifat volunter.

Rektum mendapat darah dari cabang: 1) arteri mesenterika superior yaitu arteri rektalis superior, 2) arteri illiaka interna yaitu arteri rektalis media, dan 3) arteri pudenda interna yaitu arteri rektalis inferior, akan mendarahi kanalis anal. Pembuluh balik rektum namanya sama arteri dan mengikuti arteri dan darah akan bermuara ke vena mesenterika inferior dan vena iliaka.

4.2.8 Kelenjar Ludah (Glandula Salivatorius)

Kelenjar ludah adalah kelenjar yang menghasilkan air ludah (saliva). Kelenjar ini ada pasang yang besar dan ada beberapa kelenjar ludah yang kecil. Kelenjar ludah yang besar adalah: 1) glandula parotis: bersifat serous, berada di depan daun telinga dengan saluran yang bermuara di mukosa pipi yang berhadapan dengan gigi molar 2 (M2) maksila, 2) glandula sublingualis berada di bawah mukosa dasar mulut di bawah lidah, dan 3) glandula submandibularis yang menghasilkan sekret berupa air ludah dan bersifat seros, berada disebelah dalam angulus mandibula, ditutup oleh kulit regio submandibularis. Pada bagian permukaan atas kelenjar submandibularis dilintasi oleh arteri vena fasialis.

4.2.9 Hepar (Hati)

Hepar merupakan kelenjar pencernaan yang terbesar dan berada dalam regio hipokondrika kanan dan epigastrium. Hepar secara fungsional terbagi atas dua lobus yaitu lobus dekstra dan lobus sinistra. Kedua lobus ini dipisahkan oleh ligamentum falciforme. Pada Facies Inferior posterior terdapat beberapa alur yang berbentuk huruf H yaitu garis melintang berisi porta hepatis, garis tegak di sebelah kiri fossa sagitalis sinistra

terdapat ligamentum teres hepatis dan ligamentum venosum arantii. Lobus dekstra oleh huruf H dipisahkan menjadi lobus caudatus yang berada sebelah atas garis lintang H dan lobus quadratus sebelah bawah garis lintang.

Facies inferor posterior lobus sinister hepar ditemukan impresio yang berupa cekungan atau permukaan tempat organ abdomen lain berhubungan yaitu dengan impresio esofagus, lambung dan pars superior duodenum. Pada lobus dekstra ditemukan impresio renalis, supra renal, kolika dan pars desenden duodenum. Hepar menghasilkan empedu yang keluar dari lobus sinistra dan dekstra membentuk saluran yaitu duktus hepaticus dekstra dan sinistra. Kedua duktus ini menyatu menjadi duktus hepaticus komunis.

Pada Hepar terdapat tiga ligamentum yaitu:

- a. Ligamentum falsiforme merupakan ligamentum yang berjalan dari umbilikus ke hepar
- b. Ligamentum teres hepatis, terdapat di dalam ligamentum falsiforme hepatis yang merupakan sisa vena Umbilikalisis sinistra
- c. Ligamentum venosum Arantii merupakan sisa duktus venosus.

Pembuluh darah hepar berasal dari: 1) arteri hepatica komunis (mensuplai 30 %) adalah cabang dari trunkus seliaka. Arteri ini bercabang dua yaitu arteri hepatica propria sinistra dan dekstra, dan 2) pembuluh lain yaitu vena porta, membawa darah venosa yang kaya hasil pencernaan (mensuplai 70 %). Pembuluh baliknya adalah vena hepatica sinistra dan dekstra dan bermuara ke vena kava inferior. Pembuluh limfe adalah nn II seliaka. Persarafan diurus oleh saraf simfatis, para simfatis pleksus seliacus dan nervus vagus.

4.2.10 Fesika Felea (Kantong Empedu)

Fesika felea adalah organ kelenjar pencernaan berupa kantong seperti buah pir yang berperan sebagai tempat penyimpanan sementara empedu. Fesika felea terletak pada permukaan bawah hepar, terdiri dari fundus, korpus dan kolum. Bagian kolum dari fesika felea akan berlanjut menjadi duktus sistikus. Duktus sistikus dan duktus hepatikus komunis menyatu membentuk duktus biliaris (duktus koledokus). Empedu dari hepar dialirkan melalui saluran duktus hepatikus. Duktus hepatikus bersambung dengan duktus sistikus, dari fesika felea membentuk duktus biliaris (duktus koledokus). Empedu dari fesika felea melalui duktus biliaris mengalir ke pars desenden duodenum.

Pembuluh darah dari fesika felea adalah arteri sistika yang merupakan cabang dari arteri hepatica propria dekstra. Pembuluh balik dari fesika felea adalah vena sistikus dan pembuluh limfe adalah nn II sistika yang bermuara ke nn II seliaka. Persarafan diatur oleh cabang dari pleksus seliakus.

4.2.11 Pankreas

Pankreas merupakan kelenjar yang terletak melintang di bagian pars desenden duodenum ke arah kiri sampai ke hilus limfa dan organ ini terletak retroperitoneal. Pankreas terdiri dari bagian kaput, kolum, korpus, dan kauda pancreas. Pankreas merupakan organ kelenjar endokrin (menghasilkan enzim insulin dan glucagon) dan eksokrin (menghasilkan enzim yang dapat menghidrolisis protein, lemak, dan karbohidrat)

Pembuluh darah pancreas mendapatkan darah terutama dari arteri lienalis, dan bagian kaput pankreas

mendapat darah dari cabang arteri pankreatiko duodenalis superior (cabang dari arteri hepatica komunis) dan arteri pankreatiko duodenalis inferior (cabang arteri mesenterika superior)

Pembuluh balik pankreas mengikuti nama arteri dan nanti bermuara ke vena porta. Pembuluh limfe mengalirkan limfe ke nn II seliakus. Persarafan pankreas diurus oleh serabut saraf simpatis dan saraf parasimpatis nervus vagus.

4.3 Sistem Eksresi (Sistem Urinarius)

Sistem urinarius merupakan sistem yang berperan dalam mengatur keseimbangan (homeostasis) tubuh melalui pembuangan zat-zat sisa metabolisme berupa urin. Pada sistem urinarius organ yang terlibat adalah ginjal, ureter, vesika urinaria, dan uretra. Sistem urinarius pada laki-laki berbeda dengan wanita, khususnya di daerah rongga pelvis, karena sistem urinarius di rongga pelvis pada laki-laki berintegrasi dengan sistem genitalia.

4.3.1 Ginjal

Ginjal merupakan organ retroperitoneal yang berada di kanan dan kiri dari kolumna vertebralis. Letak ginjal kanan lebih rendah dari ginjal kiri, karena pada ginjal kanan ada lobus kanan hepar. Batas atas ginjal kanan setinggi bagian bawah iga XI, sedangkan ginjal kiri setinggi bagian atas iga XI dan batas bawah ginjal kiri dan kanan adalah vertebra lumbal III. Berat ginjal pada laki-laki: 150 – 175 gr dan perempuan: 115 – 155 gr

Ginjal mempunyai: dua fasies (yaitu anterior dan posterior); dua polus atau ujung (yaitu ekstremitas superior dan inferior), dan dua margo/pinggir (yaitu

margo lateralis dan medialis). Pada polus superior ginjal ditemukan glandula suprarenal. Glandula suprarenal menghasilkan hormon yang berperan dalam keseimbangan elektrolit dan cairan dan hormon yang berperan dalam pengaturan metabolisme.

Pinggir lateralis berbentuk cembung ke arah lateral dan belakang, dan pinggir medialis berada di antara dua polus yang cekung di bagian tengah dan di sana terdapat hilus tempat adanya arteri, vena renalis dan ureter. Posisi pembuluh dan ureter pada hilus yaitu vena di bagian depan, arteri di bagian tengah dan ureter berada di bagian belakang

Bagian luar ginjal dibungkus oleh kapsula fibrosa yang melekat di daerah korteks dari ginjal, kemudian ada kapsula adipose/perirenal yang berada di luar dari kapsula fibrosa dan pembungkus ginjal paling luar yaitu fasia renalis, yang mengelilingi kapsula adipose/perirenal yang menutupi ginjal dan glandula suprarenal.

Ginjal jika dipotong secara vertikal (melalui margo lateralis ke margo medialis) maka terlihat bagian-bagian yaitu substansia kortikalis (Eksternal). Korteks ini melengkung sepanjang basis dari piramid dan sustansia medularis. Pada substansia medularis ditemukan 8 – 16 buah piramid dan pada bagian piramid ditemukan kolumna renalis. Pada bagian puncak dari piramid terdapat saluran lanjutan dari urin yang dikenal dengan kaliks minor. Beberapa kaliks minor akan bergabung membentuk dua sampai tiga kaliks major. Kaliks mayor selanjutnya bergabung membentuk pelvis renalis, kemudian pelvis renalis berlanjut menjadi ureter.

Ginjal mendapatkan darah dari arteri renalis, yang merupakan cabang dari aorta abdominalis. Arteri renalis

sebelum masuk ke dalam masa ginjal akan bercabang dua yaitu arteri segmentalis, kemudian arteri bercabang menjadi arteri lobaris kemudian masing arteri lobaris akan memberikan 2 sampai 3 cabang arteri interlobaris. Arteri interlobaris selanjutnya berjalan di samping piramid menuju korteks. Arteri interlobaris yang berada di antara korteks dan medulla akan bercabang menjadi arteri arkuata.

Pembuluh balik ginjal yaitu vena renalis yang ke luar di hilus renalis. Vena renalis dekstra dan sinistra akan bermuara ke vena cava inferior. Pembuluh limfe dari ginjal berjalan mengikuti arteri renalis dan bermuara ke nodus aortikus lateralis. Persarafan ginjal membentuk plexus simpaticus renalis yang berjalan disekitar arteri vena renalis.

4.3.2 Ureter

Ureter merupakan saluran berupa otot dengan jumlahnya ada dua buah. Ureter berfungsi mengalirkan urin dari ginjal ke vesika urinaria atau kantong kemih. Panjang ureter berkisar 28 – 34 cm, yang kanan lebih pendek dibanding yang kiri. Ureter terbagi atas pars abdominalis ureteris dan pars pelvina ureteris. Pars abdominal ureter dimulai tempat ke luar dari hilus renalis sampai ke rongga pelvis dengan menyilang bagian akhir Arteri iliaka komunis sedangkan pars pelvina mulai dari bagian lateral kavum pelvis atau pada awal percabangan arteri iliaka komunis. Selanjutnya ureter akan menuju ke vesika urinaria dengan berjalan miring ke medial sampai ke sudut lateral vesika urinaria. Pada laki-laki ureter terdapat di depan vesikula seminalis dan disilang duktus deferens. Sedangkan pada wanita ureter terdapat di belakang fosa ovarika lateralis

serviks uteri dan bagian atas vagina dan fundus vesika urinaria.

Pada ureter ada tiga tempat yang mudah terjadi penyumbatan yaitu 1) pada ureter– pelvic junction atau tempat pertemuan antara pelvis renalis dengan ureter, 2) waktu menyilang pembuluh Iliaka, dan 3) waktu ureter masuk ke vesika urinaria.

Ureter mendapatkan darah dari cabang arteri renalis, arteri spermatica interna/ovarika, arteri hipogastrika, dan aretri vesikalis inferior. Pembuluh baliknya mengikuti arteri. Pembuluh limfe bermuara ke n II aorta lateral dan nn II iliakus. Persarafan diurus oleh saraf otonom simpatis dan parasimpatis. Sistem simpatis berasal dari segmen vertebrae torakalis 11 sampai dengan Lumbal 2, dan sistem saraf parasimpatisnya adalah nervus vagus (N X) yang mensarafi bagian atas ureter dan nervus splanchnicus pelvis mensarafi bagian inferior ureter.

4.3.3 Vesika Urinaria (Kantong Kemih)

Vesika urinaria merupakan organ seperti kantong berbentuk piramid dan berupa lapisan otot. Fungsi organ ini adalah tempat penyimpanan urine sementara. Posisi dari vesika urinaria tergantung pada penuh atau kosong. Vesika urinaria dalam keadaan penuh akan berada sampai rongga abdomen bagian bawah sedangkan sewaktu kosong berada di belakang simfisis pubis.

Vesika urinaria terdiri atas bagian fundus/basis, verteks/apex, permukaan superior dan permukaan inferior lateral. Fundus bentuknya seperti segitiga, terdapat di depan rectum dan vesikula seminalis bagian akhir ductus deferens (pada laki-laki) dan dipisahkan

dari rectum fasia rekto vesikalis. Verteks terdapat dibagian atas simfisis ossis pubis, ditemukan ligamentum umbilicalis medialis yang menuju ke umbilikus.

Permukaan inferior pada laki-laki dibagi atas bagian posterior (ditemukan prostat) dan bagian inferior (lateral), dipisahkan dari simfisis pubis oleh spatium prevesikalis (cavum retzii). Permukaan superior, waktu vesika urinaria kosong dan berkontraksi kuat maka bentuk permukaannya seperti konveks.

Vesika urinaria wanita di belakang berhubungan dengan uterus dan permukaan atas vagina dan dipisahkan dari permukaan anterior korpus uteri oleh ekskavatio vesiko uterina. Pengikat vesica urinaria yaitu ligamentum pubovesikalis, ligamentum umbilicalis medialis dan ligamentum rektovesikalis. Permukaan dalam fesika urinaria berupa lapisan mukosa yang mengerut ketika berkontraksi. Pada permukaan dalam fesika ditemukan musculus detrusor dan trigonum kesika. Muskulus detrusor merupakan otot yang akan membentuk musculus spinkter fesika. Trigonum fesikalis merupakan daerah pertemuan titik-titik orifisium uretra interna dengan kedua orifisium ureter.

Pembuluh darah vesika urinaria berasal dari arteri vesikalis superior, arteri vesikalis inferior, arteri vagina (pada wanita) dan arteri glutea inferior.

Sistem Limfe dibentuk oleh nn ll hipogastrikus dan nn ll iliaka eksterna. Persarafan vesika urinaria diurus oleh serabut simfatis dari Lumbal 1 dan Lumbal 2, berjalan ke bawah membentuk pleksus hipogastrikus dan serabut para simfatis ke luar dari nervus Splanknicus pelvikus (Sakral 2, 3 dan 4).

4.3.5 Uretra

Uretra mulai dari orifisium uretra interna (dalam vesika urinaria) sampai ke orifisium uretra eksterna (pada ujung penis pada laki-laki dan vestibulum pada perempuan). Uretra pada laki-laki berbeda dengan perempuan. Panjang uretra laki-laki adalah berkisar antara 17,5 – 20 cm, yang terbagi atas 3 bagian yaitu:

- Uretra pars prostatika adalah uretra yang terlebar, panjang 3 cm dan melewati prostat,
- Uretra pars membranosa, merupakan saluran yang paling pendek, paling dangkal dan melewati diafragma urogenital,
- Uretra pars spongiosa, merupakan uretra yang paling panjang yaitu sekitar 15 cm. Uretra ini mulai dari bulbus uretra sampai orifisium uretra eksterna dan terdapat dalam korpus spongiosus penis

Uretra wanita pendek dengan panjang 4 cm mulai dari orifisium uretra interna (dalam vesika urinaria) sampai ke orifisium uretra eksterna. Uretra perempuan mudah teregang, karena pada uretra perempuan banyak mengandung jaringan elastik dan otot polos, sehingga sewaktu pemasangan kateter/sitoskop lebih mudah dilakukan dibandingkan dengan pria. Akibat uretra perempuan pendek, maka mudah terjadi infeksi, di antaranya bakteri gram negatif gonokokus.

4.4 Proses Nutrisi

Proses nutrisi merupakan rangkaian mekanisme biologis yang kompleks, dilakukan tubuh untuk memperoleh, mengolah, menyerap, dan memanfaatkan zat gizi dari

makanan. Proses ini berlangsung melalui beberapa tahap, mulai dari masuknya makanan ke mulut (ingesti), dicerna menjadi molekul sederhana (digesti), diserap di usus, hingga akhirnya dimanfaatkan untuk menghasilkan energi dan membangun jaringan tubuh (absorbs), serta diakhiri dengan pembuangan sisa yang tidak dibutuhkan (defekasi)

4.4.1 Ingesti

Ingesti merupakan proses masuknya makanan dan minuman ke dalam tubuh melalui mulut. Dalam mulut akan terjadi aktivitas mengunyah (mastikasi) dan menelan (deglutisi).

Mastikasi adalah proses mengunyah makanan di dalam rongga mulut yang bertujuan untuk memecah makanan menjadi partikel yang lebih kecil, sehingga memudahkan proses pencernaan selanjutnya. Proses ini melibatkan koordinasi antara gigi, lidah, otot-otot pengunyah (seperti musculus masseter, musculus temporalis, musculus pterygoideus medial dan lateral), serta kelenjar ludah. Ketika makanan dikunyah, gigi akan merobek dan menghancurkannya. Lidah juga membantu memposisikan makanan agar dapat dihaluskan secara merata. Pada saat yang sama, kelenjar saliva mengeluarkan air liur yang berfungsi melunakan makanan. Saliva mengandung enzim amilase yang berfungsi untuk memulai pemecahan karbohidrat. Sekresi saliva ini dipengaruhi oleh saraf parasimpatis yang diikuti vasodilatasi pada kelenjar saliva. Hasil akhir dari mastikasi adalah terbentuknya bolus, yaitu gumpalan makanan yang halus, lembab, dan mudah ditelan.

4.4.2 Deglutasi

Deglutasi adalah proses menelan bolus dari rongga mulut menuju esofagus hingga masuk ke lambung. Proses ini terbagi dalam tiga fase yang berlangsung sangat terkoordinasi, yaitu:

- a. Fase oral (bersifat volunter). Pada fase ini bolus makanan akan didorong oleh lidah ke arah faring.
- b. Fase faringeal (bersifat involunter/refleks). Pada fase ini bolus makanan sudah mencapai faring, terjadi refleks menelan, palatum mole naik untuk menutup nasofaring, epiglotis menutup laring agar makanan tidak masuk ke saluran pernapasan, dan otot-otot faring berkontraksi mendorong bolus ke arah esofagus. Kontraksi otot lidah dan faring karena peran nervus trigeminus, nervus fasialis dan nervus hipoglossus.
- c. Fase esofageal (involunter). Bolus makanan pada fase ini telah masuk ke esofagus dan didorong ke lambung melalui gerakan peristaltik otot polos di esophagus dan juga dibantu dengan relaksasi sfingter esofagus bawah sehingga makanan bisa masuk ke dalam lambung.

Proses mastikasi dan deglutasi ini bekerja saling melengkapi, di mana mastikasi mempersiapkan makanan menjadi bolus yang sesuai, sedangkan deglutasi memastikan bolus dapat ditransfer secara aman dan efisien ke lambung tanpa masuk ke saluran pernapasan.

4.4.3 Digesti

Makanan dapat masuk ke lambung sampai 1 liter, karena permukaan dalam dinding lambung berupa lipatan-lipatan yang dikenal dengan rugae yang dapat mendatar. Keadaan ini akan menyebabkan permukaan dalam lambung akan melebar. Makanan selanjutnya dengan gerakan peristaltik dari fundus dan korpus akan menuju antrum. Gerakan peristaltic difundus dankorpus agak lambat, karena dinding dan dalamnya lebih tipis, sehingga makanan lebih bertahan di daerah tersebut dan proses pencampuran makanan belum terjadi. Makanan selanjutnya dengan gerakan peristaltik menuju ke antrum dan di sini akan terjadi pencampuran makanan (terjadi pencernaan kimiawi). Dengan adanya sekresi dari lambung, di antaranya HCl dan enzim-enzim (pepsin, pepsinogen) yang akan membentuk kimus. Adanya gerakan peristaltik dari antrum menyebabkan kimus bergerak menuju sfinkter pilori. Kontraksi kimus dipilorus terjadi lebih lama dibandingkan dengan di duodenum. Selanjutnya makanan akan masuk ke duodenum bagian dari usus halus. Kondisi ini menyebabkan terjadinya pengosongan lambung.

4.4.4 Absorbsi

Pada permukaan dalam, sepanjang usus halus, ada tonjolan yang berbentuk jari dikenal dengan mikrovili yang membentuk brush border dan berperan dalam absorpsi makanan. Pada usus halus menghasilkan musin. Kimus yang sampai di usus halus akan mengalami peristalsis, proses kontraksi segmentasi, kontraksi tonik, pencernaan dan proses absorpsi. Peristalsis kimus akan terjadi di usus halus dan kontraksi segmentasi merupakan proses yang

menyebabkan kimus mengalami gerakan yang maju mundur, untuk kontraksi tonik membutuhkan waktu yang cukup lama (sekitar 5 jam) kimus di dalam usus halus. Proses pencernaan di usus halus akan dibantu oleh enzim-enzim dan hormon yang dihasilkan oleh organ pencernaan, sehingga proses pencernaan baik berupa karbohidrat, lemak dan protein akan berjalan dengan baik. Proses absorpsi makanan berupa glukosa, asam amino, asam lemak dan mineral akan terjadi di usus halus di antaranya di duodenum dan yeyunum. Pada ileum sedikit makanan yang diserap yaitu vitamin B12 dan garam empedu. Selanjutnya zat gizi yang sudah diserap akan masuk ke dalam darah untuk diedarkan ke seluruh tubuh, sehingga dapat digunakan oleh sel tubuh untuk energi, pertumbuhan, perbaikan jaringan, dan pengaturan metabolisme.

Sisa zat-zat yang tidak dapat dicerna akan masuk ke usus besar. Pada usus besar terjadi penyerapan air, elektrolit, dan sebagian vitamin yang diproduksi bakteri usus (misalnya vitamin K). Sisa makanan yang tidak diserap kolon akan menjadi feses dan harus dikeluarkan dari tubuh. Feses ini di kolon akan didorong dengan adanya kontraksi dari haustra bagian dari kolon dan gerakan yang menyebabkan isi kolon terdorong ke bagian distal. Terakhir akan terjadi proses defekasi.

4.4.5 Defekasi

Defekasi adalah proses pengeluaran feses dari saluran akhir pencernaan melalui anus. Proses defekasi merupakan proses yang kompleks yang melibatkan organ sistem pencernaan, saraf dan sistem muskuloskeletal.

➤ **Mekanisme Defekasi**

Gerakan peristaltik massa kolon mendorong feses ke arah distal ke dalam rektum. Penumpukan feses menyebabkan peregangan dinding rektum sehingga menstimulasi reseptor regangan, dengan sinyal ke saraf parasimpatis nervus pelvikus sakral (S2 –S4). Akibat ransangan saraf ini maka rectum akan berkontraksi dan muskulus sfinkter ani internus relaksasi. Ketika defekasi belum diinginkan maka saraf simfatis yang berasal dari torakal 11 sampai lumbal 2 (T11 – L2) akan menghambat kontraksi rektum dan mukulus sfinkter internus tetap dalam kondisi tertutup, dan nervus pudendus juga akan mengatur kontraksi dari otot volunteer yaitu muskulus sfinkter ani eksterna dan muskulus puborektalis.

Ketika seseorang ingin melakukan defekasi maka kedua otot volunteer akan relaksasi. Relaksasinya muskulus puborektal menyebabkan turunnya dasar panggul dan sudut anorektal akan menjadi lurus., sehingga jalan untuk dapat keluarnya feses melalui anus terbuka. Pada waktu yang bersamaan otot-otot abdomen dan diafragma juga berkontraksi agar terjadi peningkatan tekanan intra abdomen sehingga mendorong feses cepat keluar.

4.5 Pengeluaran Zat Sisa

Pengeluaran zat sisa atau eksresi merupakan suatu proses dalam tubuh untuk mengeluarkan sisa hasil metabolisme yang tidak diperlukan dan eksresi ini akan

menjaga homeostasis tubuh atau menjaga keseimbangan cairan, elektrolit, suhu dan pH tubuh.

Organ yang terlibat dalam ekskresi adalah ginjal, hepar, paru-paru, kolon dan kulit, masing-masing organ ini memiliki mekanisme dan zat sisa yang berbeda. Ginjal berfungsi untuk ekskresi urin yang mengandung urea, kreatinin, ion-ion yang berlebih dan air, dan hepar diketahui sebagai organ mengeluarkan empedu yang mengandung bilirubin. Organ ekskresi lainnya yaitu paru-paru akan mengeluarkan sisa hasil respirasi yaitu karbondioksida (CO₂), kolon mengeluarkan sisa makanan berupa feses sedangkan kulit mengeluarkan keringat.

4.5.1 Pembentukan Urin oleh Ginjal

Pembentukan urin terjadi pada organ ginjal. Ginjal akan memproses plasma yang masuk untuk menghasilkan urin, meabsorbsi bahan-bahan tertentu serta mengeluarkan bahan-bahan yang tidak diperlukan ke dalam urin. Untuk melakukan fungsi ekskresi, ginjal mempunyai bagian fungsional yang dikenal dengan nefron nefron. Pada nefron ditemukan beberapa bagian penting, yaitu glomerulus, kapsula bowman, tubulus proksimal, lengkung henle, tubulus distal, dan duktus kolekantess.

Untuk pembentukan urin ada tiga tahap yang terjadi yaitu filtrasi di glomerulus, reabsorpsi tubulus dan sekresi tubulus.

- a. Filtrasi glomerulus merupakan tahap awal dari pembentukan urin yang terjadi di kapsula bowman. Proses penyaringan darah yang terjadi ketika arteriolen eferen masuk ke glomerulus dengan tekanan hidrostatis yang tinggi. Akibat perbedaan tekanan ini mendorong plasma darah keluar dari kapiler melewati membran yang ada pada

glomerulus. Membran ini sangat selektif, sehingga molekul-molekul kecil yang bisa dilewati seperti air, ion, glukosa, asam amino, dan urea, sedangkan protein besar dan sel darah tetap berada di dalam plasma. Laju filtrasi ini dipengaruhi oleh hormon di antaranya hormon angiotensin II dapat meningkatkan tekanan filtrasi glomerulus dan atrial natriuretic peptide (ANP) berperan meningkatkan permeabilitas membran filtrasi sehingga mempercepat ekskresi.

- b. Reabsorpsi tubulus, merupakan proses penyerapan kembali ke dalam darah bahan-bahan yang masih diperlukan seperti air, glukosa, asam amino dan ion, proses ini terjadi di sepanjang tubulus proksimal, lengkung henle, tubulus distal, hingga duktus kolektif. Zat hasil absorpsi ini akan dibawa oleh kapiler peritubulus ke vena renalis, selanjutnya akan masuk ke vena cava inferior kemudian kembali sirkulasi sistemik.
- c. Sekresi tubulus yaitu proses pembuangan zat dari darah dalam kapiler peritubular ke dalam lumen tubulus ginjal untuk dibuang bersama urin. Peningkatan sekresi tubulus akan meningkatkan eliminasi zat-zat yang tidak dibutuhkan tubuh yaitu berupa urin yang mengandung urea, kreatinin, ion berlebih, dan air. Sekresi tubular berperan dalam detoksifikasi, menjaga kadar kalium dan mempertahankan pH darah dalam keadaan normal. Urin yang sudah terbentuk menuju ke pelvis renalis, masuk ke ureter, dan disimpan sementara di vesika urinaria.

4.5.2 Mekanisme Miksi

Miksi adalah proses pengosongan kantong kemih (vesika urinaria) yang diatur oleh kerja sama antara organ, saraf, dan otot. Mekanisme miksi melalui 2 hal yaitu refleks berkemih dan mekanisme kontrol volunter.

- a. Refleks berkemih dimulai saat kantong kemih terisi urin, sehingga dindingnya meregang, kemudian reseptor regangan mengirim sinyal melalui saraf pelvis ke pusat miksi di medulla spinalis sacral 2 - 4 (S2- S4). Pada keadaan ini otot dinding kandung kemih (detrusor) tetap rileks, sementara sfingter uretra menutup agar urin tidak keluar. Saraf somatik (n. pudendus) juga menjaga sfingter luar tetap tertutup. Ketika volume sudah cukup besar dan seseorang memutuskan untuk buang air kecil, otak mengaktifkan saraf parasimpatis sehingga otot detrusor berkontraksi dan sfingter uretra interna terbuka. Pada saat yang sama, sfingter uretra eksterna dilemaskan secara sadar, lalu urin terdoorong keluar, dibantu oleh tekanan dari otot perut dan diafragma. Setelah selesai, kandung kemih kembali ke fase penyimpanan dan siklus berulang lagi.
- b. Kontrol volunter
Kontrol volunter memungkinkan seseorang mampu menahan miksi dengan meningkatkan aktivitas saraf simpatis (yang menjaga sfingter uretra internal tetap tertutup) dan saraf somatik melalui nervus pudendus (yang mempertahankan kontraksi sfingter uretra eksterna). Kalau ada keinginan untuk berkemih dilakukan dan lingkungan dianggap sesuai, lalu korteks melepaskan hambatan pada PMC (pons micturition center) sehingga sinyal parasimpatis mendominasi, sfingter relaks, dan otot detrusor

berkontraksi. Mekanisme ini dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti volume dan tekanan kandung kemih, integritas sistem saraf pusat dan perifer, kondisi psikis (cemas, stres), hormon, hingga adanya penyakit seperti pembesaran prostat, infeksi saluran kemih, atau kerusakan saraf spinal.

DAFTAR PUSTAKA

- Carola, R. ; Harley, JP and Noback CR. Human anatomy and Physiology. Mc Graw-Hill Inc. 1990
- Darke, RL; Vogl, W and Mitchel, AWM. Gray Dasar-dasar Anatomi. International ed. Philadelphia. Churchill Livingstone an imprint of Elsevier inc. 2012
- Hall, EJ. Guyton and Hall text book of medical physiology. 13th ed. Us Saunders. 2016
- Moore, KL; Dalley, AF and Agur, AMR. Moore clinically oriented anatomy. 7th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins. 2014

BAB 5

SISTEM SARAF DAN ENDOKRIN: PENGENDALIAN DAN REGULASI TUBUH

5.1 Pendahuluan

Tubuh manusia merupakan suatu kesatuan yang kompleks, di mana setiap organ dan jaringan harus bekerja secara harmonis agar dapat mempertahankan kehidupan. Proses pengendalian dan regulasi ini terutama dilakukan oleh dua sistem utama, yaitu sistem saraf dan sistem endokrin. Sistem saraf bekerja dengan cepat melalui impuls listrik untuk memberikan respon instan (Bear, Connors, & Paradiso, 2020), sedangkan sistem endokrin mengatur fungsi tubuh melalui sekresi hormon yang bekerja lebih lambat namun bertahan lebih lama (Hadley & Levine, 2007). Kolaborasi kedua sistem ini membentuk mekanisme *homeostasis*, menjaga stabilitas lingkungan internal tubuh meskipun terjadi perubahan dari luar (Guyton & Hall, 2021).

Keseimbangan yang diatur oleh sistem saraf dan endokrin mencakup berbagai aspek, seperti pengendalian metabolisme, pertumbuhan, fungsi organ vital, respon terhadap stres, serta proses reproduksi (Silverthorn, 2019; Nussey & Whitehead, 2013). Misalnya, sistem saraf pusat mampu merespon rangsangan eksternal dengan segera, sementara sistem endokrin memastikan bahwa efek fisiologis berlangsung

dalam jangka waktu tertentu (Widmaier, Raff, & Strang, 2020). Integrasi keduanya menjadikan tubuh memiliki kemampuan adaptasi tinggi, yang penting untuk kelangsungan hidup manusia (Marieb & Hoehn, 2018).

Pemahaman mendalam mengenai interaksi antara sistem saraf dan endokrin tidak hanya penting dalam bidang biologi dan kedokteran, tetapi juga menjadi dasar bagi penanganan berbagai gangguan kesehatan, mulai dari penyakit *neurodegeneratif*, gangguan hormonal, hingga kondisi stres kronis (Sherwood, 2016; Tortora & Derrickson, 2017). Oleh karena itu, mempelajari pengendalian dan regulasi tubuh melalui kedua sistem ini memberikan wawasan fundamental tentang bagaimana tubuh manusia mempertahankan keseimbangan internalnya.

5.2 Struktur dan Fungsi Sistem Saraf

Sistem Saraf Pusat (SSP)

Sistem saraf pusat terdiri atas otak dan sumsum tulang belakang, berfungsi sebagai pusat pengolah informasi.

1) Otak (*Brain*)

a. *Cerebrum* (Otak Besar)

Bagian terbesar otak, terdiri dari lobus frontal, parietal, temporal, dan oksipital. *Cerebrum* berperan dalam fungsi kognitif, motorik sadar, pengolahan sensorik, bahasa, dan memori (Bear *et al.*, 2020).

b. *Cerebellum* (Otak Kecil)

Terletak di bawah otak besar, berperan dalam koordinasi gerak, keseimbangan, dan kontrol postur tubuh (Marieb & Hoehn, 2018).

c. *Brainstem* (Batang Otak)

Brainstem terdiri atas *mesensefalon*, *pons*, dan *medula oblongata*. Bagian ini mengatur fungsi vital seperti

pernapasan, denyut jantung, tekanan darah, serta refleks dasar (Guyton & Hall, 2021).

- 2) Sumsum Tulang Belakang (*Medula Spinalis*)
 - a. Menghubungkan otak dengan seluruh tubuh melalui serabut saraf.
 - b. Berperan sebagai pusat refleks sederhana (Sherwood, 2016)
 - c. Terbagi menjadi segmen servikal, torakal, lumbal, sakral, dan koksigeal yang masing-masing memiliki pasangan saraf spinal (Tortora & Derrickson, 2017).

Sistem Saraf Tepi (SST)

SST menghubungkan SSP dengan seluruh organ tubuh.

1. Sistem saraf somatik (SNS)
 - a. Mengatur aktivitas sadar, termasuk gerakan otot rangka
 - b. Melibatkan saraf sensorik (*afferent*) dan motorik (*efferent*)
 - c. Bertanggung jawab atas refleks sadar maupun tak sadar
2. Sistem Saraf Otonom (SNA)

Mengatur fungsi involunter seperti denyut jantung, pencernaan dan sekresi kelenjar, terbagi menjadi :

 - a. Simpatis : memicu respon "*fight or flight*" (peningkatan detak jantung, pelebaran pupil, peningkatan tekanan darah).
 - b. Parasimpatis : memicu respon "*rest and digest*" (menurunkan detak jantung, meningkatkan pencernaan, merangsang sekresi kelenjar) (Silverthorn, 2019).

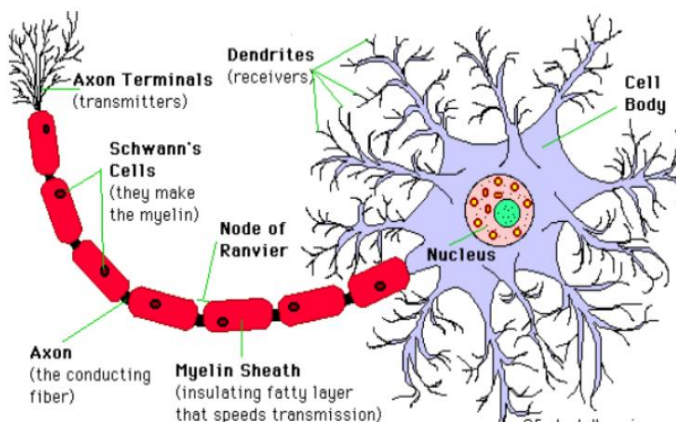
Tabel 5. 1 Perbandingan Struktur dan Fungsi Sistem Saraf

Aspek	Sistem Saraf Pusat (SSP)	Sistem Saraf Tepi (SST)
Komponen utama	Otak (<i>cerebrum, cerebellum, brainstem</i>) dan sumsum tulang belakang	Saraf kranial, saraf spinal, dan cabangnya
Letak	Terlindungi oleh tulang tengkorak & tulang belakang (<i>vertebrae</i>)	Menyebar ke seluruh tubuh, di luar SSP
Fungsi utama	Pusat pengendali, integrasi informasi, pengatur respon tubuh	Penghubung SSP dengan organ, otot, kulit, kelenjar
Jenis aktivitas	Analisis, memori, pengambilan keputusan, refleksi	Menyampaikan sinyal sensorik (<i>aferen</i>) & motorik (<i>eferen</i>)
Proteksi tambahan	Cairan serebrospinal (CSF) dan meninges	Tidak memiliki pelindung khusus, hanya jaringan pengikat
Pembagian utama	✓ Otak : lobus frontal, parietal, temporal, oksipital ✓ Sumsum tulang belakang: segmentasi servikal, torakal, lumbal, sakral	✓ Somatik : mengatur gerakan sadar & refleksi ✓ Otonom: simpatis & parasimpatik (fungsi involunter)

Aspek	Sistem Saraf Pusat (SSP)	Sistem Saraf Tepi (SST)
Contoh fungsi	Mengatur berpikir, bahasa, emosi, pernapasan, denyut jantung	Mengatur gerakan otot rangka, fungsi organ dalam, pencernaan
Jenis respon	Kompleks, lambat atau cepat tergantung jalur saraf	Cepat, langsung mengirim impuls ke organ/otot

Neuron

Neuron adalah sel khusus pada sistem saraf yang berfungsi untuk menerima, memproses, dan menghantarkan impuls listrik maupun kimia. Neuron disebut juga unit struktural dan fungsional sistem saraf karena seluruh aktivitas saraf bergantung pada kerja sel ini (Bear, Connors, & Paradiso, 2020). Neuron terdiri dari:



Gambar 5. 1 Neuron

1. Dendrit : percabangan yang menerima rangsangan dari neuron lain atau reseptor sensorik.

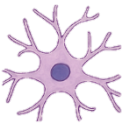
2. Badan sel (Soma/Perikarion) : mengandung inti sel, tempat berlangsungnya metabolisme neuron
3. Akson: serabut panjang yang menghantarkan impuls listrik dari badan sel menuju neuron lain atau efektor.
4. Selubung mielin (pada beberapa neuron): lapisan isolator yang mempercepat hantaran impuls; disusun oleh sel *Schwann* (SST) atau oligodendrosit (SSP).
5. Nodus Ranvier : celah kecil antar mielin yang mempercepat penghantaran impuls dengan mekanisme *saltatory conduction*.
6. Terminal akson/sinapsis : tempat neuron berkomunikasi dengan neuron lain, otot, atau kelenjar melalui neurotransmitter.

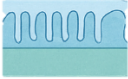
Fungsi neuron meliputi :

1. Transmisi impuls: menghantarkan sinyal listrik dengan cepat.
2. Integrasi sinyal: menerima banyak input dari dendrit dan menentukan respon.
3. Komunikasi: berhubungan dengan neuron lain melalui sinapsis dan neurotransmitter (asetilkolin, dopamin, serotonin, dll.).
4. Dasar aktivitas otak: semua proses berpikir, ingatan, dan emosi bergantung pada jaringan neuron yang saling terhubung.

Selain neuron, sistem saraf juga memiliki sel pendukung yang disebut neuroglia (*glial cells*). Sel-sel ini tidak menghantarkan impuls listrik, tetapi berfungsi melindungi, memberi nutrisi, dan menjaga lingkungan mikro bagi neuron. Berikut jenis-jenis sel pendukung:

Tabel 5. 2. Tabel Sel Pendukung Neuroglia

Jenis sel pendukung	Lokasi	Fungsi Utama
Astroosit (Astrocytes) 	Sistem Saraf Pusat (SSP)	- Menyokong struktur neuron - Mengatur ion & neurotransmitter di ruang ekstrasel - Membentuk <i>blood-brain barrier</i> (BBB) - Membantu perbaikan jaringan otak
Oligodendrosit 	SSP (otak & sumsum tulang belakang)	- Membentuk selubung <i>mielin</i> di akson SSP - Mempercepat hantaran impuls listrik
Sel Schwann 	Sistem Saraf Tepi (SST)	- Membentuk mielin di akson saraf perifer - Membantu regenerasi akson setelah cedera
Mikroglia 	SSP	- Bertindak sebagai fagosit (menelan sel mati & patogen) - Berperan dalam pertahanan imun otak

Jenis sel pendukung	Lokasi	Fungsi Utama
Ependim 	Ventrikel otak & kanalis sentralis sumsum tulang belakang	- Melapisi rongga SSP - Memproduksi & mengedarkan cairan serebrospinal (CSF)

5.3 Struktur dan Fungsi Sistem Endokrin

Sistem endokrin merupakan sistem pengaturan tubuh yang bekerja melalui sekresi hormon. Hormon adalah zat kimia yang diproduksi oleh kelenjar endokrin dan dilepaskan langsung ke dalam aliran darah untuk memengaruhi organ atau jaringan target. Berbeda dengan sistem saraf yang menggunakan impuls listrik, sistem endokrin menyampaikan pesan melalui mekanisme kimiawi sehingga efeknya biasanya lebih lambat tetapi bertahan lebih lama.

Struktur sistem endokrin terdiri atas beberapa kelenjar utama, yaitu hipotalamus, hipofisis (pituitari), tiroid, paratiroid, adrenal, pankreas, serta kelenjar kelamin yaitu ovarium pada perempuan dan testis pada laki-laki. Setiap kelenjar memiliki peran yang spesifik. Misalnya, pankreas menghasilkan insulin untuk mengatur kadar glukosa darah, tiroid menghasilkan tiroksin untuk mengatur metabolisme, sedangkan adrenal menghasilkan hormon adrenalin dan kortisol yang berperan dalam respon stres.

Fungsi sistem endokrin secara umum adalah menjaga homeostasis atau keseimbangan tubuh. Sistem ini berperan penting dalam mengatur pertumbuhan dan perkembangan, metabolisme energi, proses reproduksi, respon terhadap stres, serta keseimbangan cairan dan elektrolit. Selain itu, sistem endokrin juga bekerja erat dengan sistem saraf dalam mengoordinasikan berbagai aktivitas tubuh, sehingga

memungkinkan manusia beradaptasi terhadap perubahan lingkungan secara efektif.

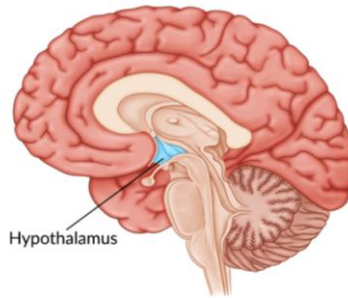
Tabel 5. 3 Kelenjar Hormon dan Fungsinya

Kelenjar	Hormon Utama	Fungsi Utama
Hipotalamus	TRH, CRH, GHRH, GnRH, Dopamin (inhibitor)	Mengatur aktivitas hormon di kelenjar hipofisis melalui sinyal <i>releasing/inhibiting</i>
Hipofisis (Pituitari)	GH, TSH, ACTH, FSH, LH, Prolaktin, ADH, Oksitosin	GH (pertumbuhan), TSH (tiroid), ACTH (adrenal), reproduksi, cairan tubuh, dan laktasi
Tiroid	T3, T4, Kalsitonin	Mengatur metabolisme, pertumbuhan, dan kadar kalsium darah
Paratiroid	PTH (Paratiroid Hormon)	Menjaga keseimbangan kalsium dan fosfat darah agar tulang dan sistem saraf sehat
Adrenal (Korteks & Medula)	Kortisol, Aldosteron, Adrenalin, Noradrenalin	Mengelola stres, tekanan darah, keseimbangan garam, serta reaksi <i>'fight or flight'</i>

Kelenjar	Hormon Utama	Fungsi Utama
Pankreas (Pulau Langerhans)	Insulin, Glukagon	Mengatur glukosa darah insulin menurunkan; glukagon meningkatkannya
Gonad (Ovarium/Testis)	Estrogen, Progesteron (wanita); Testosteron (pria)	Mengatur perkembangan seksual, karakteristik sekunder, dan fertilitas
Pineal	Melatonin	Mengatur siklus tidur dan ritme <i>sirkadian</i> (jam tubuh)
Timus	Timosin	Mendukung perkembangan sistem imun, khususnya sel T

a. Hipotalamus

Hipotalamus adalah bagian kecil dari otak yang terletak di bawah talamus dan tepat di atas kelenjar hipofisis. Meskipun ukurannya relatif kecil, hipotalamus memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga kestabilan kondisi tubuh atau homeostasis.



Gambar 5. 2 Hipotalamus

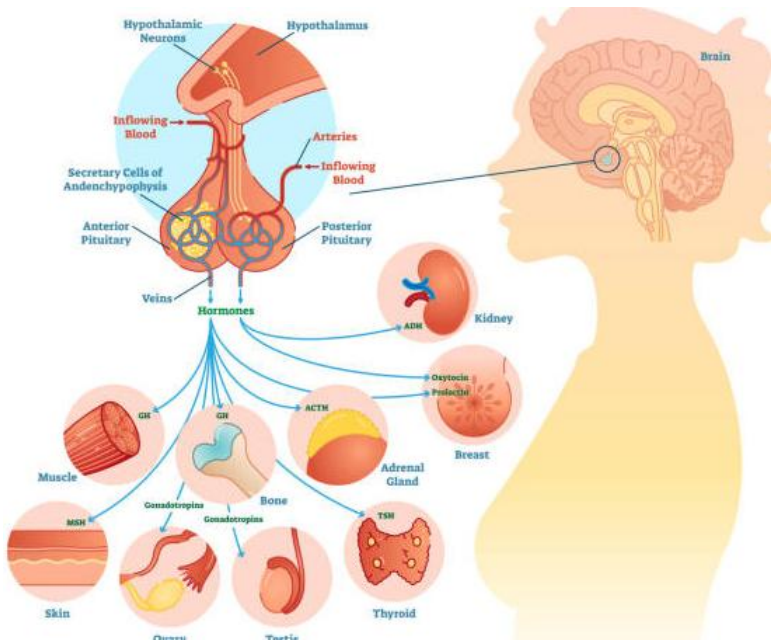
Secara struktural, hipotalamus terdiri dari beberapa nukleus saraf yang masing-masing memiliki fungsi tertentu. Hipotalamus terhubung erat dengan sistem saraf dan sistem endokrin, sehingga sering disebut sebagai pusat pengendali utama yang menghubungkan kedua sistem tersebut. Fungsi utama hipotalamus meliputi:

- 1) Mengatur aktivitas kelenjar hipofisis dengan menghasilkan hormon pelepas (*releasing hormone*) dan hormon penghambat (*inhibiting hormone*). Contohnya, TRH (Thyrotropin Releasing Hormone) merangsang pelepasan TSH dari hipofisis, sedangkan somatostatin menghambat pelepasan GH.
- 2) Mengontrol fungsi fisiologis penting seperti suhu tubuh, rasa lapar dan kenyang, rasa haus, serta siklus tidur dan bangun.
- 3) Mengatur respon emosional dan perilaku melalui hubungannya dengan sistem limbik.
- 4) Mengatur fungsi otonom seperti detak jantung, tekanan darah, dan aktivitas pencernaan.

Dengan kata lain, hipotalamus berfungsi sebagai pengendali keseimbangan internal tubuh. Melalui hubungan dengan kelenjar hipofisis, hipotalamus dapat memengaruhi hampir seluruh kelenjar endokrin lainnya, sehingga perannya sangat sentral dalam sistem endokrin.

b. Kelenjar Hipofisis (Pituitari)

Kelenjar hipofisis atau pituitari adalah kelenjar kecil seukuran kacang yang terletak di dasar otak, tepat di bawah hipotalamus, dalam struktur tulang yang disebut sella turcica. Kelenjar ini sering disebut sebagai *master gland* karena mengendalikan banyak kelenjar endokrin lain di tubuh melalui hormon-hormon yang dihasilkannya.



Gambar 5. 3 Kelenjar Hipofisis

Hipofisis terbagi menjadi dua bagian utama:

1. Hipofisis Anterior (**Adenohipofisis**) menghasilkan hormon-hormon penting untuk pertumbuhan, metabolisme, dan reproduksi.
2. Hipofisis Posterior (**Neurohipofisis**) bertugas untuk menyimpan dan melepaskan hormon yang diproduksi oleh hipotalamus.

Tabel 5. 4 Hormon Kelenjar Hipofisis dan Fungsi Utamanya

Bagian Hipofisis	Hormon	Fungsi Utama
Anterior	GH (Growth Hormone)	Merangsang pertumbuhan tulang dan otot, metabolisme protein, lemak, dan karbohidrat
	TSH (Thyroid Stimulating Hormone)	Merangsang tiroid menghasilkan T3 dan T4 untuk metabolisme
	ACTH (Adrenocorticotropic Hormone)	Merangsang korteks adrenal menghasilkan kortisol
	FSH (Follicle Stimulating Hormone)	Merangsang pematangan folikel ovarium dan produksi sperma
	LH (Luteinizing Hormone)	Memicu ovulasi dan produksi testosteron
	Prolaktin	Merangsang produksi ASI pada ibu menyusui
Posterior	ADH (Antidiuretic Hormone)	Mengatur keseimbangan cairan dengan mengurangi pengeluaran air melalui ginjal
	Oksitosin	Merangsang kontraksi rahim saat melahirkan dan pelepasan ASI

c. Kelenjar Paratiroid

Kelenjar paratiroid adalah empat kelenjar kecil yang terletak di bagian belakang kelenjar tiroid, tepatnya di

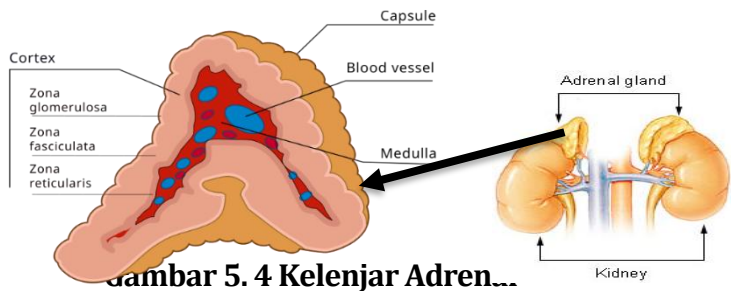
leher. Ukurannya sangat kecil, biasanya hanya sekitar 3–4 mm, sehingga sering sulit terlihat tanpa pemeriksaan khusus. Kelenjar paratiroid berperan penting dalam mengatur keseimbangan mineral, khususnya kalsium dan fosfat, di dalam darah dan tulang. Kelenjar ini menghasilkan *Parathyroid Hormone* (PTH) yang bekerja pada tulang, ginjal, dan usus.

Tabel 5. 5 Hormon Kelenjar Paratiroid dan Fungsinya

Kelenjar	Hormon	Fungsi Utama
Paratiroid	Parathyroid Hormone (PTH)	- Meningkatkan pelepasan kalsium dari tulang ke darah - Mengurangi eksresi kalsium melalui ginjal - Meningkatkan penyerapan kalsium di usus dengan mengaktifkan vitamin D

d. Kelenjar Adrenal

Kelenjar adrenal adalah sepasang kelenjar kecil yang terletak di atas masing-masing ginjal. Setiap kelenjar berbentuk segitiga dan berukuran sekitar 4–6 cm. Kelenjar adrenal dibungkus kapsul dan memiliki dua bagian utama, yaitu korteks adrenal (lapisan luar) dan Medula Adrenal (bagian dalam).

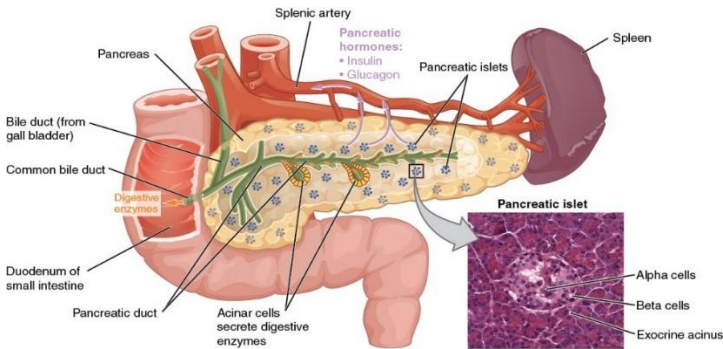


gambar 5. 4 Kelenjar Adren...

Tabel 5. 6 Hormon Kelenjar Adrenal dan Fungsinya

Bagian kelenjar adrenal	Hormone	Fungsi Utama
Korteks (Zona Glomerulosa)	Aldosteron	Mengatur keseimbangan natrium, kalium, dan air untuk menjaga tekanan darah
Korteks (Zona Fasikulata)	Kortisol	Mengatur metabolisme (protein, lemak, karbohidrat), mengendalikan stres, menekan peradangan
Korteks (Zona Retikularis)	Androgen (hormon seks kecil)	Mendukung perkembangan karakteristik seksual sekunder
Medula Adrenal	Adrenalin (Epinefrin), Noradrenalin (Norepinefrin)	Memicu respon <i>fight or flight</i> : meningkatkan detak jantung, tekanan darah, aliran darah ke otot

e. Pankreas



Gambar 5. 5 Pankreas

Pankreas adalah organ berbentuk memanjang yang terletak di belakang lambung, memanjang dari *duodenum* (usus dua belas jari) hingga ke limpa. Pankreas memiliki dua fungsi utama, yaitu fungsi eksokrin dan fungsi endokrin.

Tabel 5. 7 Hormon Pankreas dan Fungsinya

Jenis sel (pulau langerhans)	Hormon	Fungsi Utama
Sel Alfa (α)	Glukagon	Meningkatkan kadar gula darah dengan merangsang hati memecah glikogen menjadi glukosa (glikogenolisis) dan menghasilkan glukosa baru (glukoneogenesis)
Sel Beta (β)	Insulin	Menurunkan kadar gula darah dengan

Jenis sel (pulau langerhans)	Hormon	Fungsi Utama
		meningkatkan penyerapan glukosa ke dalam sel dan merangsang penyimpanan glukosa dalam bentuk glikogen.
Sel Delta (δ)	Somatostatin	Menghambat sekresi insulin, glukagon, dan hormon pertumbuhan; berperan sebagai pengatur keseimbangan hormon.
Sel PP (F)	Polipeptida Pankreas	Mengatur fungsi eksokrin pankreas dan memengaruhi nafsu makan serta metabolisme hati

f. Gonad

Kelenjar gonad adalah kelenjar kelamin yang terdiri dari ovarium pada perempuan dan testis pada laki-laki. Gonad termasuk bagian dari sistem endokrin sekaligus sistem reproduksi. Selain menghasilkan sel kelamin (ovum pada perempuan dan sperma pada laki-laki), gonad juga menghasilkan hormon yang penting untuk pertumbuhan, perkembangan, serta fungsi reproduksi.

Tabel 5. 8 Tabel Hormon Gonad dan Fungsinya

Jenis Gonad	Hormon	Fungsi Utama
Ovarium (Perempuan)	Estrogen	- Mengatur perkembangan karakteristik seksual sekunder (payudara, distribusi lemak tubuh) - Mengatur siklus menstruasi - Mendukung pertumbuhan lapisan endometrium
	Progesteron	- Mempersiapkan rahim untuk kehamilan - Menjaga kondisi rahim selama kehamilan
	Inhibin	Menghambat sekresi FSH dari hipofisis untuk mengatur siklus reproduksi
Testis (Laki-laki)	Testosteron	- Mengatur perkembangan karakteristik seksual sekunder (otot, suara berat, rambut wajah)

Jenis Gonad	Hormon	Fungsi Utama
		- Mendukung spermatogenesis
	Inhibin	Mengatur produksi sperma melalui kontrol sekresi FSH

g. Pineal

Kelenjar pineal adalah kelenjar endokrin kecil berbentuk seperti biji pinus yang terletak di dalam otak, tepatnya di antara dua belahan otak pada alur yang disebut *sulkus* antara lobus otak tengah. Ukurannya sangat kecil, sekitar 5–8 mm, dan berwarna kemerahan keabu-abuan. Meskipun ukurannya kecil, kelenjar pineal memiliki peran penting dalam mengatur ritme biologis tubuh, terutama siklus tidur dan bangun. Kelenjar ini menghasilkan hormon yang dipengaruhi oleh cahaya, sehingga kadang disebut sebagai “jam biologis” internal tubuh.

Tabel 5. 9 Hormon Kelenjar Pineal dan Fungsinya

Hormon	Fungsi Utama
Melatonin	- Mengatur siklus tidur dan bangun (<i>ritme sirkadian</i>) - Mengatur aktivitas biologis yang dipengaruhi cahaya dan kegelapan - Memengaruhi perkembangan seksual pada usia pubertas

Hormon	Fungsi Utama
Serotonin (prekursor melatonin)	- Membantu regulasi suasana hati dan perasaan tenang - Berperan sebagai bahan dasar pembentukan melatonin

h. Timus

Kelenjar timus adalah organ berbentuk dua lobus yang terletak di bagian depan rongga dada, tepat di belakang tulang dada (sternum) dan di atas jantung. Kelenjar ini relatif besar pada masa anak-anak, kemudian mengalami penyusutan (*involutasi*) setelah pubertas dan digantikan oleh jaringan lemak. Timus memiliki peran utama dalam sistem imun tubuh. Di dalam timus, sel-sel T (limfosit T) matang dan berkembang. Sel T inilah yang berfungsi melawan infeksi, mengatur respon imun, dan menjaga toleransi terhadap sel tubuh sendiri agar tidak terjadi autoimunitas.

Tabel 5. 10 Hormon Kelenjar Timus dan Fungsinya

Hormon	Fungsi Utama
Timosin	- Merangsang pematangan dan diferensiasi limfosit T - Memperkuat sistem imun adaptif
Timopoietin	- Membantu diferensiasi sel T - Berperan dalam pengaturan produksi sel imun
Timulin	- Mengatur fungsi sel T

Hormon	Fungsi Utama
	- Mendukung komunikasi antar sel imun

5.4 Integrasi Sistem Saraf dan Endokrin

Sistem saraf dan sistem endokrin bekerja dengan cara yang berbeda namun saling melengkapi. Sistem saraf mengirimkan sinyal melalui impuls listrik dan neurotransmitter, sehingga mampu menghasilkan respons yang sangat cepat, hanya dalam hitungan milidetik. Sebaliknya, sistem endokrin menggunakan hormon yang dilepaskan ke dalam aliran darah. Mekanisme ini memang lebih lambat, tetapi efeknya berlangsung lebih lama dan mencakup berbagai organ sekaligus.

Kedua sistem ini tidak berdiri sendiri, melainkan berintegrasi secara erat untuk menjaga keseimbangan tubuh atau homeostasis. Pusat utama integrasi terletak pada *hipotalamus*, bagian kecil di otak yang berperan sebagai penghubung saraf dan hormon. Hipotalamus menerima sinyal dari sistem saraf mengenai kondisi tubuh maupun lingkungan, kemudian merespons dengan mengatur pelepasan hormon dari kelenjar hipofisis (pituitari). Hipofisis ini selanjutnya akan mengendalikan berbagai kelenjar endokrin lain, seperti tiroid, adrenal, maupun gonad.

Integrasi ini terlihat jelas dalam beberapa contoh. Saat tubuh menghadapi stres, hipotalamus melepaskan CRH (*Corticotropin Releasing Hormone*) yang merangsang hipofisis anterior mengeluarkan ACTH. Hormon ini kemudian memicu kelenjar adrenal menghasilkan kortisol, hormon stres yang memengaruhi metabolisme dan memberi sinyal kembali ke otak untuk mengendalikan respons. Contoh lain adalah pengaturan suhu tubuh. Ketika suhu lingkungan menurun, hipotalamus tidak hanya mengaktifkan sistem saraf otonom

agar tubuh menggigil, tetapi juga memicu pelepasan hormon tiroid untuk meningkatkan laju metabolisme sehingga panas tubuh kembali normal.

Mekanisme umpan balik (*feedback loop*) membuat integrasi ini berjalan seimbang. Hormon-hormon yang dihasilkan kelenjar target memberi sinyal kembali ke hipotalamus dan hipofisis untuk menghentikan produksi berlebih. Dengan cara ini, tubuh mampu mengatur dirinya sendiri agar tetap stabil meskipun lingkungan sering berubah. Kolaborasi keduanya memungkinkan manusia tidak hanya bertahan hidup, tetapi juga beradaptasi dengan tantangan sehari-hari, mulai dari menghadapi stres, menjaga suhu tubuh, hingga mengatur pertumbuhan dan reproduksi.

5.5 Penerapan Klinis dan Teknologi

Sistem saraf dan endokrin bekerja sama menjaga homeostasis tubuh melalui regulasi yang cepat (impuls saraf) maupun bertahan lama (hormon). Ketidakseimbangan dalam sistem ini dapat menimbulkan berbagai gangguan kesehatan, mulai dari diabetes hingga depresi. Oleh karena itu, pemahaman integrasi keduanya menjadi dasar penting dalam praktik klinis dan pengembangan teknologi medis modern. Inovasi seperti pemantauan glukosa berkelanjutan, terapi hormon sintetis, hingga neuromodulasi menunjukkan bagaimana ilmu pengetahuan diterapkan untuk diagnosis, terapi, dan peningkatan kualitas hidup pasien. Tabel Penerapan klinis dan teknologi.

Aspek	Contoh Gangguan/ Kondisi	Mekanisme Gangguan	Pendekatan Klinis	Penerapan Teknologi
Hipotalamus –Hipofisis	Tumor hipofisis, gangguan pertumbuhan	Produksi hormon berlebih/kurang	Operasi, terapi radiasi, terapi hormon pengganti	MRI/CT untuk diagnosis; hormon sintetis

Anatomi dan Fisiologi Manusia:
Dasar-Dasar untuk Pemahaman Sistem Tubuh

Aspek	Contoh Gangguan/ Kondisi	Mekanisme Gangguan	Pendekatan Klinis	Penerapan Teknologi
Pankreas (Glukosa)	Diabetes Mellitus tipe 1 & 2	Kekurangan insulin atau resistensi insulin	Insulin suntik, obat oral, diet	Continuous Glucose Monitoring (CGM), pompa insulin otomatis
Tiroid	Hipertiroidisme, Hipotiroidisme	Hormon tiroid berlebih atau kurang	Obat antitiroid, levotiroksin, operasi	Hormon sintetis tiroksin; USG tiroid
Adrenal (HPA axis)	Sindrom Cushing, Addison	Ketidakseimbangan kortisol	Uji laboratorium hormon, terapi hormon	Tes hormon otomatis; CT/MRI adrenal
Neuroendokrin & Stres	Depresi, kecemasan, insomnia	Disregulasi HPA axis dan neurotransmitter	Psikoterapi, antidepresan, hormon terapi	Brain imaging (fMRI, PET), neuromodulasi (DBS, TMS)
Sistem Reproduksi	Infertilitas, gangguan menstruasi	Ketidakseimbangan hormon gonad	Terapi hormon, IVF	Pemantauan hormon reproduktif otomatis
Homeostasis Umum	Obesitas, gangguan metabolik	Regulasi hipotalamus terganggu	Diet, olahraga, farmakoterapi	Wearable health devices, AI prediksi metabolisme

DAFTAR PUSTAKA

- Aguilera, G. (2011). HPA axis responsiveness to stress: Implications for healthy aging. *Experimental Gerontology*, 46(2-3), 90-95.
<https://doi.org/10.1016/j.exger.2010.08.023>
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2020). *Neuroscience: Exploring the brain*. Wolters Kluwer.
- Berthoud, H. R., & Morrison, C. (2008). The brain, appetite, and obesity. *Annual Review of Psychology*, 59, 55-92.
<https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093551>
- Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2016). *Textbook of medical physiology* (13th ed.). Elsevier.
- Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2020). *Guyton and Hall textbook of medical physiology*. Elsevier.
- Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2021). *Textbook of medical physiology*. Elsevier.
- Hadley, M. E., & Levine, J. E. (2007). *Endocrinology*. Pearson.
- Herman, J. P., McKlveen, J. M., Ghosal, S., Kopp, B., Wulsin, A., Makinson, R., Scheimann, J., & Myers, B. (2016). Regulation of the hypothalamic-pituitary-adrenocortical stress response. *Comprehensive Physiology*, 6(2), 603-621.
<https://doi.org/10.1002/cphy.c150015>
- Jänig, W. (2018). *Integrative action of the autonomic nervous system: Neurobiology of homeostasis*. Cambridge University Press.
- Marieb, E. N., & Hoehn, K. (2018). *Human anatomy & physiology*. Pearson.
- McEwen, B. S. (2007). Physiology and neurobiology of stress and adaptation: Central role of the brain. *Physiological Reviews*, 87(3), 873-904.
<https://doi.org/10.1152/physrev.00041.2006>

- Melmed, S., Auchus, R. J., Goldfine, A. B., Koenig, R. J., & Rosen, C. J. (2020). *Williams textbook of endocrinology* (14th ed.). Elsevier.
- Nolte, J. (2009). *The human brain: An introduction to its functional anatomy*. Mosby.
- Nussey, S., & Whitehead, S. (2013). *Endocrinology: An integrated approach*. BIOS Scientific Publishers.
- Sherwood, L. (2016). *Human physiology: From cells to systems* (9th ed.). Cengage Learning.
- Silverthorn, D. U. (2019). *Human physiology: An integrated approach*. Pearson.
- Silverthorn, D. U. (2021). *Human physiology: An integrated approach*. Pearson.
- Sternberg, E. M. (2006). Neural regulation of innate immunity: A coordinated nonspecific host response to pathogens. *Nature Reviews Immunology*, 6(4), 318–328. <https://doi.org/10.1038/nri1810>
- Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2017). *Principles of anatomy and physiology*. Wiley.
- Ulrich-Lai, Y. M., & Herman, J. P. (2009). Neural regulation of endocrine and autonomic stress responses. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(6), 397–409. <https://doi.org/10.1038/nrn2647>
- Widmaier, E. P., Raff, H., & Strang, K. T. (2020). *Vander's human physiology: The mechanisms of body function*. McGraw-Hill.

BIODATA PENULIS



Bdn. Febriniwati Rifdi, SSiT, M. Biomed

Dosen Program Studi Sarjana Kebidanan dan Pendidikan
Profesi Bidan Universitas Fort De Kock Bukittinggi

Penulis lahir di Padang tanggal 20 Februari 1980. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Sarjana Kebidanan dan Pendidikan Profesi Bidan Universitas Fort De Kock. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan DIV Bidan Pendidik dan melanjutkan Pendidikan S2 Ilmu Biomedik. Penulis mulai menekuni bidang Menulis Sejak tahun 2018

BIODATA PENULIS



A. Fitriani Suryadi, S.Pd., M.Pd.

Dosen Program Studi Pendidikan Biologi
Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan
Institut Turatea Indonesia

Penulis lahir di Jeneponto tanggal 30 Oktober 1995. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Pendidikan Biologi Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Institut Turatea Indonesia. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Pendidikan IPA pada tahun 2017 dan melanjutkan S2 pada Jurusan Pendidikan Biologi Universitas Negeri Makassar selesai pada tahun 2019. Saat ini menjabat sebagai ketua program studi dan aktif menerbitkan jurnal penelitian dan PKM.

BIODATA PENULIS



Eva Nurul Malahayati, S.Pd., M.Pd.

Dosen Program Studi Pendidikan Biologi
Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan,
Universitas Islam Balitar Blitar

Eva Nurul Malahayati, lahir di Blitar, 04 Desember 1988. Menempuh pendidikan Sarjana dan Magister Pendidikan Biologi di Universitas Negeri Malang lulus tahun 2014. Sejak tahun 2015-sekarang bekerja sebagai Dosen Tetap di Fakultas Keguruan Dan Ilmu Pendidikan Universitas Islam Balitar (UNISBA) Blitar. Pada tahun 2017-2022 dipercaya sebagai Ketua Program Studi S1 Pendidikan Biologi FKIP UNISBA Blitar. Mulai tahun 2025 mendapat tugas sebagai Kabag Sistem Penjaminan Mutu Internal (SPMI) Universitas Islam Balitar. Penulis aktif sebagai pengelola Jurnal Edubiotik IKIP Budi Utomo Malang tahun 2020-sekarang dan Penyunting Pelaksana Jurnal Biologi dan Pembelajarannya (JB&P) Universitas Nusantara PGRI Kediri mulai tahun 2022-sekarang. Sebagai Asesor GTK tahun 2021-2024. Sebagai DPL program kampus mengajar angkatan 1, 2, dan 3 tahun 2021-2022. Karya berupa buku yang sudah diterbitkan penulis

antara lain Strategi Belajar Mengajar (2021), Ilmu dan Aplikasi Pendidikan (2022), Media Pembelajaran (2022), Teknologi Pembelajaran (2022), dan Landasan Pembelajaran (2023).

BIODATA PENULIS



Dr. Gusti Revila, M.Kes

Dosen Anatomi

Fakultas Kedokteran Universitas Andalas Padang

Penulis lahir di Lubuk Alung Kabupaten Padang Pariaman Sumatera Barat pada tanggal 13 Agustus 1960. Penulis adalah dosen Anatomi Fakultas Kedokteran Universitas Andalas sejak tahun 1987, dan memasuki purna bakti mulai September 2025. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 Program studi Biologi FMIPA Unand tahun 1986, S2 tahun 1996 program studi Ilmu Kedokteran Dasar Fakultas Pasca Sarjana Unpad, dan S3 tahun 2014 program Studi Biomedik Fakultas Pasca Sarjana Unand.

Penulis mulai mengabdikan diri di Anatomi FK Unand 1987 sampai September 2025, menekuni atau mengajar dan mengelola/membimbing praktikum bagian Anatomi. Di samping itu penulis juga mengabdikan diri di Fakultas Kedokteran Gigi Unand, program studi Kebidanan, program studi Biomedik, program Studi S2 Program Pasca Sarjana Kedokteran Unand. Penulis juga pernah mengajar di

Universitas Baitur Rahmah, UNIBA, STIKES Jambi, FK Unri.
Penulis banyak melakukan penelitian bidang anatomi dan Stemcell, pengabdian kepada masyarakat, membimbing mahasiswa S2 dan S3.

BIODATA PENULIS



Ns. Sahriana, M.Kep.

Dosen Program Studi Pendidikan Profesi Ners
Fakultas Ilmu Kesehatan Universitas Sulawesi Barat

Ns. Sahriana, M.Kep Lahir di Masago, 08 Januari 1992. Pendidikan tinggi yang telah ditempuh oleh penulis yaitu jenjang S1 dan Profesi pada Program Studi Pendidikan S1 Keperawatan dan Profesi Ners STIKES Panakkukang Makassar tahun 2015. Kemudian melanjutkan pendidikan S2 Keperawatan pada Universitas Airlangga Surabaya dan lulus tahun pada tahun 2019. Riwayat pekerjaan diawali pada tahun 2016 sebagai dosen keperawatan di STIKES Yahya Bima sampai pada tahun 2024. Saat ini penulis bekerja di Universitas Sulawesi Barat. Penulis aktif dalam berbagai kegiatan Tridharma Perguruan Tinggi yaitu sebagai penulis buku, publikasi, seminar serta pengabdian kepada masyarakat. Beberapa publikasi hasil penelitian sudah diterbitkan baik di jurnal nasional maupun internasional. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: sahriana014@gmail.com.