



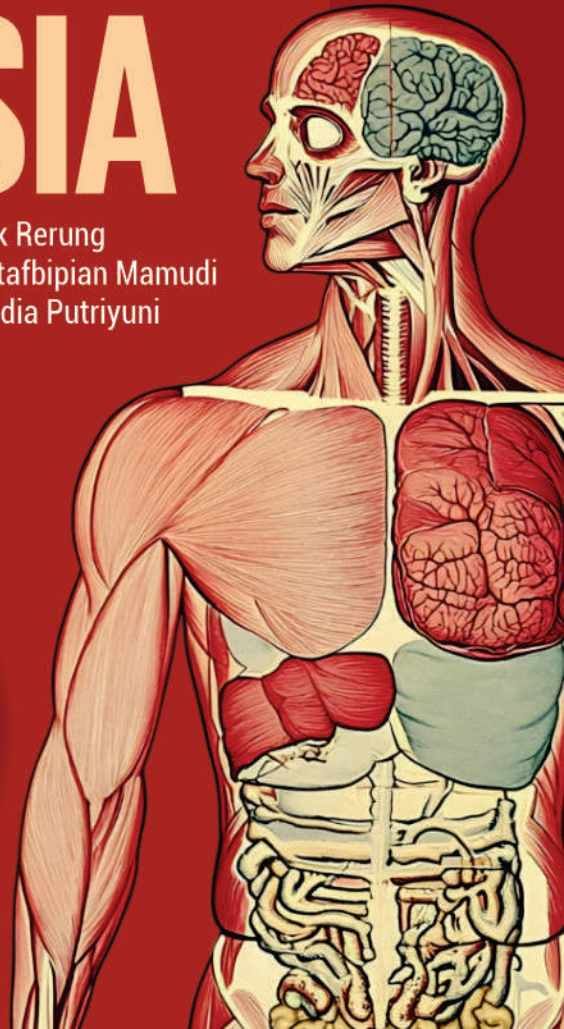
EDITOR:

Dr. dr. Amiruddin, M.Kes.

apt. Yuri Pratiwi Utami, S.Farm., M.Si.

FISIOLOGI TUBUH MANUSIA

Zahira Amody | Agustawan | Lola Tulak Rerung
Risa Kusuma Anggraeni | Chrispian Oktafbipian Mamudi
Fidyatul Nazhira | Mila Citrawati | Anandia Putriyuni
Nana Liana | Nadia Purnama Dewi
Muhammad Azmi Fanany
Ayu Tiara Fitri



FISIOLOGI TUBUH MANUSIA



Buku Fisiologi Tubuh Manusia yang berada ditangan pembaca ini terdiri dari 12 Bab

Bab 1 Pengantar Fisiologi Tubuh Manusia

Bab 2 Fisiologi Keseimbangan Cairan Elektrolit, dan Asam Basa

Bab 3 Fisiologi Sistem Muskuloskeletal

Bab 4 Fisiologi Sistem Persyarafan

Bab 5 Fisiologi Sistem Pernapasan

Bab 6 Fisiologi Sistem Kardiovaskular dan Peredaran Darah

Bab 7 Fisiologi Sistem Ekskresi

Bab 8 Fisiologi Sistem Reproduksi Pria

Bab 9 Fisiologi Sistem Endokrin

Bab 10 Fisiologi Sistem Limfatik

Bab 11 Fisiologi Sistem Kekebalan Tubuh

Bab 12 Fisiologi Kehamilan dan Laktasi pada Manusia



**eureka
media aksara**
Anggota IKAPI
No. 225/JTE/2021

0858 5343 1992
eurekamediaaksara@gmail.com
Jl. Banjaran RT.20 RW.10
Bojongsari - Purbalingga 53362

ISBN 978-634-248-341-3



9

786342

483411

FISIOLOGI TUBUH MANUSIA

apt. Zahira Amody, S.Farm., M.Si.

dr. Agustiawan, M.KM., AIFO-K., FRSPH., FISQua.

Lola Tulak Rerung, M.Farm.

Risa Kusuma Anggraeni, M.Biomed.

dr. Chrispian Oktafbipian Mamudi, SpPD-KPMK., FINASIM.

Fidyatul Nazhira, S.Fis., Ftr., M.Fis.

dr. Mila Citrawati, M.Biomed., SpKKLP., Subsp., FOMC.

Dr. dr. Anandia Putriyuni, Sp.PA.

dr. Nana Liana, Sp.PA.

dr. Nadia Purnama Dewi, M.Biomed., Ph.D.

dr. Muhammad Azmi Fanany, Sp.B., FICS., FINACS.

Ayu Tiara Fitri, S.Si., M.Biomed.



eureka
media aksara

PENERBIT CV. EUREKA MEDIA AKSARA

FISIOLOGI TUBUH MANUSIA

Penulis : apt. Zahira Amody, S.Farm., M.Si. |
dr. Agustiawan, M.KM., AIFO-K., FRSPH.,
FISQua. | Lola Tulak Rerung, M.Farm. | Risa
Kusuma Anggraeni, M.Biomed. | dr. Chrispian
Oktafbipian Mamudi, SpPD-KPMK., FINASIM.
| Fidyatul Nazhira, S.Fis., Ftr., M.Fis. | dr. Mila
Citrawati, M.Biomed., SpKKLP., Subsp., FOMC.
| Dr. dr. Anandia Putriyuni, Sp.PA. | dr. Nana
Liana, Sp.PA. | dr. Nadia Purnama Dewi,
M.Biomed., Ph.D. | dr. Muhammad Azmi
Fanany, Sp.B., FICS., FINACS. | Ayu Tiara Fitri,
S.Si., M.Biomed.

Editor : Dr. dr. Amiruddin, M.Kes.
apt. Yuri Pratiwi Utami, S.Farm., M.Si.

Desain Sampul : Eri Setiawan

Tata Letak : Ernawati

ISBN : 978-634-248-341-1

Diterbitkan oleh : **EUREKA MEDIA AKSARA, AGUSTUS 2025**
ANGGOTA IKAPI JAWA TENGAH
NO. 225/JTE/2021

Redaksi:

Jalan Banjaran, Desa Banjaran RT 20 RW 10 Kecamatan Bojongsari
Kabupaten Purbalingga Telp. 0858-5343-1992

Surel : eurekamediaaksara@gmail.com

Cetakan Pertama : 2025

All right reserved

Hak Cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh
isi buku ini dalam bentuk apapun dan dengan cara apapun,
termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman
lainnya tanpa seizin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan buku ini. Penulisan buku merupakan buah karya dari pemikiran penulis yang diberi judul “Fisiologi Tubuh Manusia”. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan karya ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih pada semua pihak yang telah membantu penyusunan buku ini. Sehingga buku ini bisa hadir di hadapan pembaca.

Buku Fisiologi Tubuh Manusia yang berada ditangan pembaca ini terdiri dari 12 Bab, yaitu:

- Bab 1 Pengantar Fisiologi Tubuh Manusia
- Bab 2 Fisiologi Keseimbangan Cairan Elektrolit, dan Asam Basa
- Bab 3 Fisiologi Sistem Muskuloskeletal
- Bab 4 Fisiologi Sistem Persyarafan
- Bab 5 Fisiologi Sistem Pernapasan
- Bab 6 Fisiologi Sistem Kardiovaskular dan Peredaran Darah
- Bab 7 Fisiologi Sistem Ekskresi
- Bab 8 Fisiologi Sistem Reproduksi Pria
- Bab 9 Fisiologi Sistem Endokrin
- Bab 10 Fisiologi Sistem Limfatik
- Bab 11 Fisiologi Sistem Kekebalan Tubuh
- Bab 12 Fisiologi Kehamilan dan Laktasi pada Manusia

Akhir kata penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga buku ini akan membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI	iv
BAB 1 PENGANTAR FISILOGI TUBUH MANUSIA.....	1
A. Pendahuluan	1
B. Definisi dan Ruang Lingkup Fisiologi	3
C. Tingkat Organisasi Tubuh Manusia	7
D. Konsep Homeostatis: Kunci Keseimbangan Tubuh....	9
E. Istilah Arah dan Area Tubuh Penting	11
F. Tinjauan Umum Sistem Organ Tubuh Manusia.....	14
DAFTAR PUSTAKA.....	19
BAB 2 FISILOGI KESEIMBANGAN CAIRAN	
ELEKTROLIT, DAN ASAM BASA.....	20
A. Pendahuluan	20
B. Keseimbangan Cairan dan Elektrolit Tubuh.....	21
C. Keseimbangan Asam dan Basa	31
DAFTAR PUSTAKA.....	39
BAB 3 FISILOGI SISTEM MUSKULOSKELETAL.....	40
A. Pendahuluan	40
B. Sistem Skeletal (Rangka)	41
C. Sistem Muskular (Otot)	49
D. Soal Latihan.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....	54
BAB 4 FISILOGI SISTEM PERSYARAFAN.....	56
A. Pendahuluan	56
B. Struktur dan Fungsi Neuron, Impuls Saraf, atau Sistem Saraf Otonom	57
C. Impuls Saraf	58
D. Sistem Saraf Otonom	59
E. Sistem Saraf Motorik.....	60
F. Refleks dan Pengendalian Motorik.....	62
G. Sistem Sensorik.....	64
H. Refleks dan Pengendalian Sensorik	67
I. <i>Plasticity</i> dan Adaptasi Sistem Saraf	69
DAFTAR PUSTAKA.....	71

BAB 5	FISIOLOGI SISTEM PERNAPASAN	72
	A. Pendahuluan	72
	B. Ventilasi	77
	C. Volume Paru Statis – Kapasitas Sisa Fungsional/ <i>Functional Residual Capacity</i>	79
	D. Mekanika Pernapasan	79
	E. Distribusi Gas yang Terinspirasi	84
	F. Perfusi	87
	G. Penilaian Klinis Fungsi Paru	91
	H. Simpulan	95
	DAFTAR PUSTAKA	97
BAB 6	FISIOLOGI SISTEM KARDIOVASKULAR DAN PEREDARAN DARAH	101
	A. Pendahuluan	101
	B. Struktur Jantung	102
	C. Struktur Pembuluh Darah	104
	D. Fisiologi Jantung	107
	E. Fisiologi Pembuluh Darah	111
	F. Sistem Peredaran Darah	115
	DAFTAR PUSTAKA	118
BAB 7	FISIOLOGI SISTEM EKSRESI	120
	A. Pendahuluan	120
	B. Struktur Dasar Sistem Urinaria	120
	C. Fungsional Ginjal	122
	D. Nefron	123
	E. Ureter	125
	F. Vesika Urinaria	126
	G. Uretra	126
	H. Refleks Miksi (Berkemih)	126
	I. Peran Hormon pada Ginjal	127
	DAFTAR PUSTAKA	131
BAB 8	FISIOLOGI SISTEM REPRODUKSI PRIA	132
	A. Pengantar	132
	B. Sistem Reproduksi Pria	132
	C. Fisiologi Sistem Reproduksi Pria	137

	D. Kesimpulan	143
	DAFTAR PUSTAKA.....	144
BAB 9	FISIOLOGI SISTEM ENDOKRIN	145
	A. Pendahuluan.....	145
	B. Klasifikasi Hormon	148
	C. Reseptor Hormon.....	150
	D. Regulasi Sekresi Hormon dan Mekanisme	
	Umpan Balik	153
	DAFTAR PUSTAKA.....	155
BAB 10	FISIOLOGI SISTEM LIMFATIK.....	156
	A. Pendahuluan.....	156
	B. Anatomi Sistem Limfatik	157
	C. Fisiologi Sistem Limfatik.....	160
	D. Mekanisme Transportasi Limfa.....	163
	E. Interaksi Sistem Limfatik dengan Sistem Lain.....	164
	F. Peran Klinis dan Patologis	166
	G. Inovasi dan Teknologi dalam Studi Sistem	
	Limfatik	168
	H. Kesimpulan.....	169
	DAFTAR PUSTAKA.....	171
BAB 11	FISIOLOGI SISTEM KEKEBALAN TUBUH.....	178
	A. Pendahuluan.....	178
	B. Sistem Imunitas Bawaan (<i>Innert Immunity</i>)	180
	C. Sistem Imun Adaptif (<i>Adaptive Immunity</i>)	190
	D. Penutup	199
	DAFTAR PUSTAKA.....	201
BAB 12	FISIOLOGI KEHAMILAN DAN LAKTASI	
	PADA MANUSIA.....	206
	A. Pendahuluan.....	206
	B. Fisiologi Kehamilan Per Trimester	208
	C. Koordinasi Hormon Kehamilan.....	211
	D. Postpartum.....	213
	E. Mekanisme Produksi dan Ejeksi ASI.....	214
	DAFTAR PUSTAKA.....	216
	TENTANG PENULIS.....	220

BAB

1

PENGANTAR FISILOGI TUBUH MANUSIA

apt. Zahira Amody, S.Farm., M.Si.

A. Pendahuluan

Sejak kita lahir, bahkan sebelum itu, tubuh kita adalah sebuah sistem yang tak henti-hentinya bekerja, beradaptasi, dan berinteraksi dengan dunia di sekitarnya. Setiap tarikan napas, detak jantung, gerakan otot, bahkan setiap pemikiran yang melintas di benak kita, adalah hasil dari proses-proses biologis yang sangat terkoordinasi dan kompleks. Inilah yang kita kenal sebagai fisiologi manusia—ilmu yang mempelajari bagaimana organ, sistem organ, dan triliunan sel di dalam tubuh kita berfungsi untuk menjaga kehidupan dan mempertahankan keseimbangan yang luar biasa.

Memahami Keajaiban Fisiologi Tubuh Manusia. Tubuh manusia adalah sebuah mahakarya kompleks dan menakjubkan, sebuah sistem yang terkoordinasi sempurna di mana triliunan sel bekerja sama secara harmonis untuk menjaga kehidupan. Di balik setiap gerakan, setiap napas, setiap pikiran, terdapat jaringan proses yang rumit dan dinamis yang dikenal sebagai fisiologi. Fisiologi adalah cabang ilmu biologi yang khusus mempelajari bagaimana organ, sistem organ, dan sel-sel dalam tubuh berfungsi, baik secara individu maupun dalam interaksi satu sama lain, untuk mempertahankan homeostatis—kondisi keseimbangan internal yang esensial bagi kelangsungan hidup.

DAFTAR PUSTAKA

- Cannon, W. B. (1932). *The Wisdom of the Body*. New York: W. W. Norton & Company
- Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2016). *Textbook of Medical Physiology* (13th ed.). Philadelphia, PA: Saunders Elsevier.
- Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2021). *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology* (14th ed.). Elsevier.
- Marieb, E. N., & Hoehn, K. (2018). *Human Anatomy & Physiology* (11th ed.).
- Saladin, K. S. (2024). *Anatomy & Physiology: The Unity of Form and Function*. McGraw-Hill Education.
- Sherwood, L. (2016). *Human Physiology: From Cells to Systems* (9th ed.). Cengage Learning.
- Silverthorn, D. U. (2019). *Human Physiology: An Integrated Approach* (8th ed.). Pearson.
- Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2017). *Principles of Anatomy and Physiology* (15th ed.). John Wiley & Sons.

BAB 2

FISIOLOGI KESEIMBANGAN CAIRAN ELEKTROLIT, DAN ASAM BASA

dr. Agustawan, M.KM., AIFO-K., FRSPH., FISQua.

A. Pendahuluan

Air merupakan komponen utama yang menyusun tubuh manusia, meskipun persentasenya bervariasi tergantung pada usia, jenis kelamin, dan berat badan. Pada bayi, proporsi cairan tubuh mencapai sekitar 80–85% dari berat badan, sedangkan pada anak di atas satu tahun, proporsinya menurun menjadi 70–75%. Seiring proses penuaan, persentase tersebut terus berkurang, hingga menjadi sekitar 50–60% pada pria dewasa dan 50% pada wanita dewasa (Guyton & Hall, 2021; Sherwood, 2011).

Cairan tubuh total terbagi dalam dua kompartemen utama, yaitu cairan intraseluler (CIS) yang berada di dalam sel, dan cairan ekstraseluler (CES) yang berada di luar sel. Kompartemen ekstraseluler sendiri terdiri atas cairan intravaskular (plasma darah) dan cairan interstisial yang mengisi ruang antar sel (Sherwood, 2011; Setiati et al., 2014). Proporsi antara CIS dan CES juga dapat berubah sesuai kondisi fisiologis dan patologis.

Homeostasis cairan dan elektrolit memegang peranan vital dalam mendukung fungsi seluler dan organ tubuh. Air berperan sebagai medium utama untuk reaksi biokimia, pengaturan suhu tubuh, serta transportasi zat-zat penting. Pergerakan air dan zat terlarut antara CIS dan CES terjadi melalui mekanisme transpor pasif, seperti osmosis dan difusi,

DAFTAR PUSTAKA

- Fauci AS, Jameson JL, Kasper D, et al. Harrison's Principles of Internal Medicine 19th Edition. New York: McGraw-Hill Education; 2018.
- Finfer AJ; Myburgh JA. Resuscitation Fluids. New Engl J Med. 2013;369:1243-51.
- Guyton AC; Hall JE. Buku ajar fisiologi kedokteran. Jakarta: EGC; 2016.
- Jose G. Frank Starling Mechanism and Short Term Adjustmen of Cardiac Flow. J Exp Biol. 2017;220:4391-8.
- Loscalzo J. Harrison's Cardiovascular Medicine. Philadelphia: McGraw-Hill Education; 2012
- Miller RD; Erikson LI; Dleisher LA; et al. Miller's Anesthesia. New York: Elsevier; 2009.
- Setiati S, Alwi I, Sudoyo AW, Sumadibrata M, Setiyohadi B, Syam AF. Buku Ajar Ilmu Penyakit Dalam. 6 ed. Jakarta: Interna Publishing; 2014.
- Sharkawy AME; Sahota O; Lobo DN. Acute and chronic effects of hydration status on health. Nutr Rev. 2015;73(2):97-109.
- Sherwood L. Fisiologi Manusia: dari sel ke sistem. 6 ed. Jakarta: EGC; 2011.

BAB 3

FISIOLOGI SISTEM MUSKULOSKELETAL

Lola Tulak Rerung, M.Farm.

A. Pendahuluan

Tubuh manusia bersifat kompleks, layaknya sebuah mesin yang sangat maju dan terstruktur dengan baik. Tubuh bekerja sebagai satu kesatuan, tersusun atas berbagai bagian operasional yang bekerja saling bergantung satu sama lain. Setiap bagian memiliki fungsi tertentu yang terkadang saling berkaitan dan semuanya penting bagi kesejahteraan individu (Waugh and Grant, 2001).

Sistem muskuloskeletal berperan dalam menopang bentuk tubuh dan memungkinkan pergerakan. Komponen utama sistem ini mencakup tulang dan jaringan ikat yang menyusun sekitar 25% berat badan, serta otot yang berkontribusi sekitar 50%. Struktur sistem ini terdiri dari tulang, sendi, otot rangka, tendon, ligamen, dan jaringan khusus yang menghubungkan bagian-bagian tersebut (Khadijah *et al.*, 2020). Setiap bagian dalam sistem muskuloskeletal saling berinteraksi secara kompleks guna menunjang gerakan dan menjaga stabilitas tubuh. Sebagai ilustrasi, tulang rawan melapisi ujung-ujung tulang pada sendi untuk mengurangi gesekan (Situmorang, 2024). Secara umum sistem muskuloskeletal memiliki fungsi dalam menopang dan membentuk tubuh, memungkinkan pergerakan, melindungi organ vital, produksi sel darah, menyimpan mineral dan energi serta menjaga keseimbangan dan stabilitas.

DAFTAR PUSTAKA

- Handriana, I., Rahayu, A.L., Yulita, D., Rahman, I., Lalihsah, I., Pasaribu, K., Erwinsyah, Imran, S., Yolanda, S. and Suryani, A.I. (2023) *Anatomi dan Fisiologi Manusia: Dasar dan Pendekatan Multidisiplin*. Edited by I. Handriana and Rosmawati. Bandung : Keizen Media Publishing.
- Khadijah, S., Astuti, T., Widaryanti, R. and Ratnaningsih, E. (2020) *Buku Ajar Anatomi dan Fisiologi Manusia Edisi I* . Edited by S. Khadijah. Yogyakarta: Respati Press.
- Peate, I. and Nair, M. (2015) *Anatomy and physiology for nurses at a glance*. Edited by I. Peate. UK : John Wiley & Sons.
- Pujiastuti, A.T., Verawaty, L., Turchan, E.N.G., Wardhani, F.K., Mahroos, R. El, Fahira, A., Syarif, A., Retnoningsih, D., Setyawati, L.C., Wibowo, M.A., Prawiragara, F.A., Rahmadinie, A., Prajnaparamita, I., Arthanti, W.B., Durry, F.D. and Hani, S.M. (2025) *Dermatologi dan Muskuloskeletal* . Edited by R. Yuliwulandari. Gresik: Thalibul Ilmi Publishing & Education .
- Purbangkara, T. and Kurniawan, F. (2021) *Ilmu Faal Dasar (Fisiologi)*. Ponorogo: Uwais Inspirasi Indonesia.
- Ramadhani, K. and Widyaningrum, R. (2022) *Buku Ajar Dasar-Dasar Anatomi dan Fisiologi Tubuh Manusia Bagi Mahasiswa Gizi dan Kesehatan*. Edited by B. Asyhari-Afwan and I.N. Amanah. Yogyakarta: UAD Press.
- Situmorang, N. (2024) 'Peran Anatomi Dalam Pengenalan Penyakit Degeneratif Pada Sistem Muskuloskeletal', *Majalah Ilmiah Mathoda* , 14(3), pp. 431–434.
- Suratun, Heryati, Manurung, S. and Raenah, E. (2008) *Klien Gangguan Sistem Muskuloskeletal: Seri Asuhan Keperawatan* . Edited by M. Ester. Jakarta: Penerbit Buku Kedokteran EGC.
- Wahyuningsih, H.P. and Kusmiyati, Y. (2017) *Anatomi Fisiologi* . Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia .

Waugh, A. and Grant, A. (2001) *Anatomy and physiology in health and illness*. 9th edn. Edinburgh: Churchill Livingstone.

BAB

4

FISIOLOGI SISTEM PERSYARAFAN

Risa Kusuma Anggreani, M.Biomed.

A. Pendahuluan

Tubuh manusia memiliki berbagai sistem yang saling bekerja sama untuk menjaga kelangsungan hidup, salah satunya adalah sistem saraf. Sistem ini berperan penting dalam menerima, mengolah, dan merespons berbagai informasi baik dari dalam tubuh maupun dari lingkungan sekitar. Melalui jaringan yang kompleks, sistem saraf memungkinkan manusia berpikir, bergerak, merasakan, hingga mempertahankan fungsi-fungsi dasar seperti detak jantung dan pernapasan (Guyton & Hall, 2021).

Sistem saraf dibagi menjadi dua komponen utama, yakni sistem saraf pusat dan sistem saraf tepi. Otak dan sumsum tulang belakang tergolong ke dalam sistem saraf pusat, yang berfungsi sebagai pusat kendali utama. Sementara itu, sistem saraf tepi bertugas menghubungkan sistem pusat dengan organ-organ tubuh lainnya, melalui jalur sensorik dan motorik (Bear, Connors & Paradiso, 2020). Koordinasi antara keduanya memungkinkan tubuh merespons dengan cepat dan tepat terhadap berbagai perubahan.

Dalam konteks fisiologi, penting untuk memahami bagaimana sel-sel saraf (neuron) menyampaikan sinyal, bagaimana komunikasi antar neuron terjadi di sinaps, serta bagaimana sistem saraf bekerja sama dengan sistem lain seperti endokrin untuk mengatur fungsi tubuh. Gangguan pada

DAFTAR PUSTAKA

- Apkarian, A.V., Baliki, M.N. & Geha, P.Y., 2011. Towards a theory of chronic pain. *Progress in Neurobiology*, 87(2), pp.81-97.
- Bear, M.F., Connors, B.W. & Paradiso, M.A., 2020. *Neuroscience: Exploring the Brain*. 4th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer.
- Blumenfeld, H., 2021. *Neuroanatomy through Clinical Cases*. 3rd ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- Guyton, A.C. & Hall, J.E., 2021. *Textbook of Medical Physiology*. 14th ed. Philadelphia: Elsevier.
- Kandel, E.R., Schwartz, J.H., Jessell, T.M., Siegelbaum, S.A. & Hudspeth, A.J., 2013. *Principles of Neural Science*. 5th ed. New York: McGraw-Hill.
- Latash, M.L., 2012. *Fundamentals of Motor Control*. Amsterdam: Elsevier.
- Marieb, E.N. & Hoehn, K., 2019. *Human Anatomy & Physiology*. 11th ed. Boston: Pearson.
- Nolte, J., 2021. *The Human Brain: An Introduction to its Functional Anatomy*. 8th ed. Philadelphia: Elsevier.
- Purves, D., Augustine, G.J., Fitzpatrick, D., Hall, W.C., LaMantia, A.S. & White, L.E., 2018. *Neuroscience*. 6th ed. Oxford: Oxford University Press.
- Sherwood, L., 2015. *Human Physiology: From Cells to Systems*. 9th ed. Boston: Cengage Learning.
- Shumway-Cook, A. & Woollacott, M.H., 2017. *Motor Control: Translating Research into Clinical Practice*. 5th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer.

BAB 5

FISIOLOGI SISTEM PERNAPASAN

dr. Chrispian Oktafbipian Mamudi, SpPD-KPMK., FINASIM.

A. Pendahuluan

Pemeriksaan fungsi normal dan mekanisme pernapasan pasien dapat membantu menentukan penyebab disfungsi pernapasan. Respirasi seluler, di mana oksigen (O_2) dikonsumsi dan karbondioksida (CO_2) dihasilkan; cara O_2 dan CO_2 diangkut ke dalam darah; dan cara paru mengoksigenkan darah dan menghilangkan CO_2 . (Kavanagh and Hedenstierna, 2007)

1. Respirasi dalam Sel

Tekanan parsial O_2 (PaO_2) dalam darah arteri normal adalah sekitar 100 mm Hg. Di mitokondria tempat PaO_2 dikonsumsi, tekanan ini turun menjadi 4–22 mm Hg. Dengan glikolisis dalam sitoplasma, glukosa ($C_6H_{12}O_6$) diubah menjadi piruvat (CH_3COCOO^-) dan H^+ . Piruvat kemudian berdifusi ke dalam mitokondria dan membentuk substrat awal untuk siklus Krebs, yang pada gilirannya menghasilkan nikotinamida adenin dinukleotida (NADH), adenosin trifosfat (ATP), CO_2 , dan air (H_2O). Nikotinamida adenin dinukleotida adalah penderma elektron (dan H^+) utama dalam proses fosforilasi oksidatif, yang mengkonsumsi O_2 dan adenosin difosfat (ADP), dan menghasilkan ATP dan H_2O . Oleh karena itu, efek bersihnya adalah oksidasi glukosa untuk menghasilkan energi (pada akhirnya sebagai ATP), H_2O , dan CO_2 . (Kavanagh and Hedenstierna, 2007)

DAFTAR PUSTAKA

- Aguilaniu, B., Maitre, J., Glénet, S., Gegout-Petit, A., Guénard, H., 2008. European reference equations for CO and NO lung transfer. *Eur. Respir. J.* 31, 1091–1097. <https://doi.org/10.1183/09031936.00063207>
- Astrom, E., Niklason, L., Drefeldt, B., Bajc, M., Jonson, B., 2000. Partitioning of dead space - A method and reference values in the awake human. *Eur. Respir. J.* 16, 659–664. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3003.2000.16d16.x>
- Broughton, S.J., Sylvester, K.P., Page, C.M., Rafferty, G.F., Milner, A.D., Greenough, A., 2006. Problems in the measurement of functional residual capacity. *Physiol. Meas.* 27, 99–107. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/27/2/001>
- Caboot, J.B., Jawad, A.F., McDonough, J.M., Bowdre, C.Y., Arens, R., Marcus, C.L., 2012. Non-Invasive Measurements of Carboxyhemoglobin and Methemoglobin in Children with Sick Cell Disease. *Pediatr Pulmonol* 47, 808–15. <https://doi.org/10.1002/ppul.22504>
- Calverley, P.M.A., Koulouris, N.G., 2005. Flow limitation and dynamic hyperinflation: Key concepts in modern respiratory physiology. *Eur. Respir. J.* 25, 186–199. <https://doi.org/10.1183/09031936.04.00113204>
- Chawla, L.S., Zia, H., Gutierrez, G., Katz, N.M., Seneff, M.G., Shah, M., 2004. Lack of equivalence between central and mixed venous oxygen saturation. *Chest* 126, 1891–1896. <https://doi.org/10.1378/chest.126.6.1891>
- Glenny, R., 2008. Point: Counterpoint: Gravity is/is not the major factor determining the distribution of blood flow in the human lung. *J. Appl. Physiol.* 104, 1535. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01092.2007a>

- Goldin, J.G., 2002. Quantitative CT of the lung. *Radiol Clin North Am* 40, 145–62. [https://doi.org/10.1016/s0033-8389\(03\)00114-3](https://doi.org/10.1016/s0033-8389(03)00114-3)
- Hampson, N.B., Piantadosi, C.A., Thom, S.R., Weaver, L.K., 2012. Practice recommendations in the diagnosis, management, and prevention of carbon monoxide poisoning. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 186, 1095–1101. <https://doi.org/10.1164/rccm.201207-1284CI>
- Hubmayr, R.D., 2002. Perspective on lung injury and recruitment: A skeptical look at the opening and collapse story. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 165, 1647–1653. <https://doi.org/10.1164/rccm.2001080-01CP>
- Jeffery, P.K., 2004. Remodeling and inflammation of bronchi in asthma and chronic obstructive pulmonary disease. *Proc. Am. Thorac. Soc.* 1, 176–183. <https://doi.org/10.1513/pats.200402-009MS>
- Jensen, F.B., 2004. Red blood cell pH, the Bohr effect, and other oxygenation-linked phenomena in blood O₂ and CO₂ transport. *Acta Physiol. Scand.* 182, 215–227. <https://doi.org/10.1111/j.1365-201X.2004.01361.x>
- Kavanagh, B.P., Hedenstierna, G., 2007. Respiratory Physiology and Pathophysiology, in: West, J.B. (Ed.), *Pulmonary Physiology and Pathophysiology, An Integrated, Case-Based Approach*. Lippincott William & Wilkins, San Diego, pp. 444–72.
- Kerbaul, F., Bellezza, M., Guidon, C., Roussel, L., Imbert, M., Carpentier, J.P., Auffray, J.P., 2000. Effects of sevoflurane on hypoxic pulmonary vasoconstriction in anaesthetized piglets. *Br. J. Anaesth.* 85, 440–445. <https://doi.org/10.1093/bja/85.3.440>
- Kerbaul, F., Guidon, C., Stephanazzi, J., Bellezza, M., Le Dantec, P., Longeon, T., Aubert, M., 2001. Sub-MAC concentrations of desflurane do not inhibit hypoxic pulmonary

- vasoconstriction in anesthetized piglets. *Can. J. Anesth.* 48, 760–767. <https://doi.org/10.1007/BF03016691>
- Kornecki, A., Engelberts, D., McNamara, P., Jankov, R.P., McCaul, C., Ackerley, C., Post, M., Kavanagh, B.P., 2008. Vascular remodeling protects against ventilator-induced lung Injury in the in vivo rat. *Anesthesiology* 108, 1047–1054. <https://doi.org/10.1097/ALN.0b013e318173ed20>
- Milic-Emili, J., Torchio, R., D'Angelo, E., 2007. Closing volume: A reappraisal (1967-2007). *Eur. J. Appl. Physiol.* 99, 567–583. <https://doi.org/10.1007/s00421-006-0389-0>
- Moudgil, R., Michelakis, E.D., Archer, S.L., 2005. Hypoxic pulmonary vasoconstriction. *J. Appl. Physiol.* 98, 390–403. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00733.2004>
- Petersson, J., Sánchez-Crespo, A., Rohdin, M., Montmerle, S., Nyrén, S., Jacobsson, H., Larsson, S.A., Lindahl, S.G.E., Linnarsson, D., Glenny, R.W., Mure, M., 2004. Physiological evaluation of a new quantitative SPECT method measuring regional ventilation and perfusion. *J. Appl. Physiol.* 96, 1127–1136. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00092.2003>
- Prisk, G.K., 2000. Physiology of a Microgravity Environment Invited Review: Microgravity and the lung. *J. Appl. Physiol.* 89, 385–96.
- Sartori, C., Allemann, Y., Scherrer, U., 2007. Pathogenesis of pulmonary edema: learning from high-altitude pulmonary edema. *Respir Physiol Neurobiol* 159, 338–49. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2007.04.006>
- Slats, A.M., Janssen, K., Van Schadewijk, A., Van Der Plas, D.T., Schot, R., Van Den Aardweg, J.G., De Jongste, J.C., Hiemstra, P.S., Mauad, T., Rabe, K.F., Sterk, P.J., 2007. Bronchial inflammation and airway responses to deep inspiration in asthma and chronic obstructive pulmonary disease. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 176, 121–128. <https://doi.org/10.1164/rccm.200612-1814OC>

- Sylvester, J.T., Shimoda, L.A., Aaronson, P.I., Ward, J.P.T., 2012. Hypoxic pulmonary vasoconstriction. *Physiol. Rev.* 92, 367–520. <https://doi.org/10.1152/physrev.00041.2010>
- Verbandt, Y., Wantier, M., Prisk, G.K., Paiva, M., 2000. Ventilation-perfusion matching in long-term microgravity. *J Appl Physiol* 89, 2407–2412.

BAB 6

FISIOLOGI SISTEM KARDIOVASKULAR DAN PEREDARAN DARAH

Fidyatul Nazhira, S.Fis., Ftr., M.Fis.

A. Pendahuluan

Sistem kardiovaskular merupakan sistem transportasi biologis yang terspesialisasi, berfungsi mendistribusikan darah ke seluruh organ tubuh melalui jaringan pembuluh darah dengan jantung sebagai pompa pusatnya. Sistem ini menjaga kestabilan lingkungan internal (homeostasis) dengan mentranspor oksigen, karbon dioksida, nutrien, hormon, zat sisa metabolik, serta komponen imunologis. Selain itu, sistem kardiovaskular juga terlibat dalam pengaturan tekanan darah, suhu tubuh, dan pH jaringan (Firdaus, 2021).

Secara anatomis dan fungsional, sistem ini terbagi menjadi dua sirkuit atau jalur utama yaitu 1) Sirkulasi sistemik dan 2) Sirkulasi pulmonal. Sirkulasi sistemik bertugas mengantarkan darah teroksigenasi dari jantung ke jaringan tubuh, sedangkan sirkulasi pulmonal bertanggung jawab membawa darah vena ke paru-paru untuk proses oksigenasi. Jantung, sebagai organ sentral, terdiri atas empat ruang (atrium dan ventrikel kanan dan kiri) yang bekerja secara sinkron melalui siklus jantung untuk menghasilkan tekanan yang mendorong aliran darah (Firdaus, 2021).

Aktivitas jantung dikendalikan oleh sistem konduksi intrinsik yang melibatkan nodus sinoatrial, nodus atrioventrikular, berkas his, dan serabut purkinje. Regulasi aktivitas ini dipengaruhi oleh sistem saraf otonom dan hormon-

DAFTAR PUSTAKA

- Arteries and veins. (2016). In *Anatomy in Diagnostic Imaging* (pp. 94–96). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118500484.ch10>
- Fatahian, E., Kordani, N., & Fatahian, H. (2018). A REVIEW ON RHEOLOGY OF NON-NEWTONIAN PROPERTIES OF BLOOD. *IIUM Engineering Journal*, 19(1), 237–250. <https://doi.org/10.31436/iiumej.v19i1.826>
- Firdaus, D. B. (2021). SIRKULASI PULMONER. *Human Care Journal*, 6(3), 534. <https://doi.org/10.32883/hcj.v6i3.1393>
- Hardi Darmawan. (2020). Bridging Coronary Physiology Into Clinical Application of Acute Coronary Syndrome. *Conferences of Medical Sciences Dies Natalis Faculty of Medicine Universitas Sriwijaya*, 1(1). <https://doi.org/10.32539/dies.v1i1.16>
- Hidayat, R. (2023). Genetic Predisposition to Cardiac Conduction Defects in a Multi-Ethnic Population: A Case-Control Study in Palembang, Indonesia. *Sriwijaya Journal of Internal Medicine*, 1(1), 9–14. <https://doi.org/10.59345/sjim.v1i1.18>
- Irawati, L. (2015). Aktivitas Listrik pada Otot Jantung. *Jurnal Kesehatan Andalas*, 4(2). <https://doi.org/10.25077/jka.v4i2.306>
- Karwi, Q. G., Jörg, A. R., & Lopaschuk, G. D. (2019). Allosteric, transcriptional and post-translational control of mitochondrial energy metabolism. *Biochemical Journal*, 476(12), 1695–1712. <https://doi.org/10.1042/BCJ20180617>
- Kifli, Z., Haryanto, Izzah, A. N., Nurfadilah, Felisa, & Aqila, J. (2025). Pengamatan Anatomi dan Fisiologi Jantung Pada Mencit (*Mus musculus*) dan Korelasinya Terhadap Tubuh Manusia. *INHEALTH: INDONESIAN HEALTH JOURNAL*, 4(1), 8–12. <https://doi.org/10.56314/inhealth.v4i1.284>

- Mardhiah, A., Savitri, D. I., & Fonna, T. R. (2023). Congestive Heart Failure. *GALENICAL: Jurnal Kedokteran Dan Kesehatan Mahasiswa Malikussaleh*, 2(3), 104.
<https://doi.org/10.29103/jkkmm.v2i3.17770>
- Maysha Syakila, Siti Nurhafiza, & Sry Maharany. (2025). Merajut ilmu: pendekatan interdisipliner dalam pembelajaran IPA melalui studi mekanisme aliran darah. *Science Education and Development Journal Archives*, 3(1), 10–18.
<https://doi.org/10.59923/sendja.v3i1.403>
- Morad, M., & Zhang, X. (2017). Mechanisms of spontaneous pacing: sinoatrial nodal cells, neonatal cardiomyocytes, and human stem cell derived cardiomyocytes. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 95(10), 1100–1107.
<https://doi.org/10.1139/cjpp-2016-0743>
- Ramli, D., & Karani, Y. (2018). Anatomi dan Fisiologi Kompleks Mitral. *Jurnal Kesehatan Andalas*, 7, 103.
<https://doi.org/10.25077/jka.v7i0.837>
- Schram, G., Pourrier, M., Melnyk, P., & Nattel, S. (2002). Differential Distribution of Cardiac Ion Channel Expression as a Basis for Regional Specialization in Electrical Function. *Circulation Research*, 90(9), 939–950.
<https://doi.org/10.1161/01.RES.0000018627.89528.6F>
- Smith-Gabai, H., & Holm, S. (2017). *The Cardiac System* (pp. 223–251).
<https://doi.org/10.7139/2017.978-1-56900-415-9.015>
- Taylor, A. E., & Moore, T. M. (1999). Capillary fluid exchange. *Advances in Physiology Education*, 277(6), S203.
<https://doi.org/10.1152/advances.1999.277.6.S203>
- Vallance, P., & John, L. (2010). Blood vessels and the endothelium. In *Oxford Textbook of Medicine* (pp. 2594–2603). Oxford University Press.
https://doi.org/10.1093/med/9780199204854.003.160101_u_pdate_001

BAB

7

FISIOLOGI SISTEM EKSKRESI

dr. Mila Citrawati, M.Biomed., SpKKLP., Subsp., FOMC.

A. Pendahuluan

Fisiologi sistem ekskresi memiliki peran pada pemeliharaan homeostasis dengan membuang produk limbah dan mengatur komposisi cairan tubuh. Pada manusia, organ ekskresi utama adalah sepasang ginjal dan saluran kemih. Ginjal menyaring darah untuk membuang sisa metabolisme dan kemudian mengubah cairan yang dihasilkan, yang memungkinkan organ-organ ini mempertahankan homeostasis cairan, elektrolit, asam-basa, dan tekanan darah. Proses ini menghasilkan urin, cairan yang terdiri dari air, elektrolit, dan sisa metabolisme. Kemudian saluran kemih berfungsi mengangkut, menyimpan, dan akhirnya mengeluarkan urin dari tubuh (Ogobuiro and Tuma, 2023).

B. Struktur Dasar Sistem Urinaria

Produksi urin diawali dengan plasma bergerak dari pembuluh darah ke nefron (filtrasi). Tubulus akan mengubah komposisi cairan saat melewatinya dengan proses reabsorpsi dan sekresi. Filtrat (cairan dalam tubulus yang telah mengalami perubahan komposisi melalui proses reabsorpsi dan sekresi) meninggalkan ginjal melalui ureter. Ada sepasang ureter, satu mengarah dari setiap ginjal ke vesika urinaria. Vesika urinaria akan terisi dengan urin hingga dinding vesika urinaria meregang dan menimbulkan refleks ingin buang air kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Boone, M. and Deen, P.M.T. (2008) 'Physiology and pathophysiology of the vasopressin-regulated renal water reabsorption', *Pflugers Archiv European Journal of Physiology*, 456(6), pp. 1005–1024. Available at: <https://doi.org/10.1007/S00424-008-0498-1>.
- Fortenbaugh, W. et al. (2016) *Human Physiology, Theophrastus of Eresus. Sources for His Life, Writings, Thought and Influence* (2 vols). Available at: https://doi.org/10.1163/9789004326064_016.
- Khan, M., Jose, A. and Sharma, S. (2022) 'Physiology, Parathyroid Hormone', *StatPearls* [Preprint]. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK499940/> (Accessed: 12 July 2025).
- Martini (2012) *Fundamental of Anatomy and Physiology*, Pearson Education.
- Ogobuiro, I. and Tuma, F. (2023) 'Physiology, Renal', *StatPearls* [Preprint]. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538339/> (Accessed: 12 July 2025).
- Sherwood, L. (2019) *Human Physiology: From cells to systems, 9th revised ed., The Neuroscientist*.
- Silverthorn, D. (2016) *Human Physiology*.
- Tsilosani, A., Gao, C. and Zhang, W. (2022) 'Aldosterone-Regulated Sodium Transport and Blood Pressure', *Frontiers in Physiology*, 13, p. 770375. Available at: <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2022.770375/XML>.
- Xie, Q.H. and Hao, C.M. (2023) 'Regulation of kidney on potassium balance and its clinical significance', *Acta Physiologica Sinica*, 75(2), pp. 216–230. Available at: <https://doi.org/10.13294/j.aps.2023.0026>.

BAB 8

FISIOLOGI SISTEM REPRODUKSI PRIA

Dr. dr. Anandia Putriyuni, Sp.PA.

A. Pengantar

Sistem reproduksi pria terdiri atas serangkaian organ yang penting dalam proses produksi, mematangkan, dan menyalurkan sel sperma serta menghasilkan hormon seks pria. Sistem ini juga berperan dalam proses reproduksi melalui ejakulasi dan berkontribusi pada karakteristik seksual sekunder.

B. Sistem Reproduksi Pria

Sistem reproduksi pria dibagi atas organ eksternal dan internal. Organ eksternal pada sistem reproduksi pria yaitu:

1. Penis
2. Uretra
3. Skrotum

Organ internal pada sistem reproduksi pria yaitu:

1. Testis
2. Epididimis
3. Vas deferens
4. Funikulus spermaticus

Kelenjar seks tambahan:

1. Kelenjar prostat
2. Vesikula seminalis
3. Kelenjar bulbourethral (Cowper) (Gambar 8.1)

DAFTAR PUSTAKA

- Brentwaldrop, A., & Delinker, C. M. (2012). Human Physiology / The male reproductive system. *Human Physiology / The Male Reproductive System*.
- Ilacqua, A., Francomano, D., & Aversa, A. (2018). The physiology of the testis. In *Endocrinology (Switzerland)*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44675-2_17
- Paulsen, F., & Waschke, J. (2019). Organ Interna. In *Sobotta, Atlas Anatomi Manusia edisi ke-24:Elsevier* (24th ed., p. 273). EGC.
- Sherwood, L. (2011). Sistem Kemih. In *Fisiologi Manusia* (6th ed., Vol. 6, pp. 553–604). EGC.

BAB

9

FISIOLOGI SISTEM ENDOKRIN

dr. Nana Liana, Sp.PA.

A. Pendahuluan

Sistem endokrin terdiri dari sel, jaringan, dan organ yang tersebar luas di seluruh tubuh dan bekerja sama untuk mempertahankan keseimbangan metabolik tubuh, atau homeostasis. Sel-sel dalam sistem endokrin mencapai hal ini dengan mensekresikan molekul—yang sering disebut sebagai hormon—yang bekerja pada sel target yang letaknya jauh dari tempat sintesisnya (Vinay Kumar & Aster, 2015).

Sistem endokrin berperan dalam sintesis dan sekresi hormon secara langsung ke dalam kapiler darah maupun pembuluh limfatik. Kelenjar endokrin tidak memiliki duktus ekskretorius, sehingga produk sekresinya disalurkan melalui matriks ekstraseluler jaringan ikat menuju sistem vaskular. Umumnya, kelenjar endokrin tersusun atas agregat sel-sel epitelioid—yaitu sel epitel yang tidak memiliki permukaan bebas—yang tertanam dalam stroma jaringan ikat. Meskipun kelenjar endokrin bervariasi dalam hal ukuran, bentuk, dan lokasi anatomis, semuanya memiliki karakteristik struktural dan fungsional yang serupa. Karena tidak memiliki saluran ekskresi, hormon disekresikan langsung ke matriks ekstraseluler jaringan ikat, biasanya di sekitar kapiler darah atau limfatik. Selanjutnya, hormon akan berdifusi ke dalam lumen pembuluh tersebut untuk didistribusikan ke seluruh tubuh (Young & Geraldine O'Dowd, 2016).

DAFTAR PUSTAKA

- Emily G. Reisner, H. M. R. (2022). *Crowley's An Introduction to Human Disease: Pathology and Pathophysiology Correlations*, (Eleventh). Jones & Bartlett Learning.
- Eroschenko, V. P. (2008). *Di Fiore's atlas of histology with functional correlations* (11th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Leslie P. Gartner, J. H. (2014). *Color atlas and text of histology* (6th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Michael H. Ross, W. P. (2019). *Histology: a text and atlas: with correlated cell and molecular biology* (8th ed.). Wolters Kluwer Health.
- SaThierbach, K., Petrovic, S., Schilbach, S., Mayo, D. J., Perriches, T., Rundlet, E. J. E. J. E. J., Jeon, Y. E., Collins, L. N. L. N., Huber, F. M. F. M., Lin, D. D. H. D. H., Paduch, M., Koide, A., Lu, V. T., Fischer, J., Hurt, E., Koide, S., Kossiakoff, A. A., Hoelz, A., Hawryluk-gara, L. A., ... Hoelz, A. (2015). Textbook of Endocrine Physiology. In *Proceedings of the National Academy of Sciences* (6th ed., Vol. 3, Issue 1). Oxford University Press.
- Sontakke, Y. A. (2020). *Human Histology with Color Atlas, 3D Illustrations and Flowcharts* (1st ed.). CBS Publishers & Distributors Pvt. Ltd.
- Vinay Kumar, A. K. A., & Aster, J. C. (2015). *Robbins and Cotran pathologic basis of disease* (ninth). Elsevier saunder.
- Young, B., & Geraldine O'Dowd, P. W. (2016). *Wheater's functional histology: a text and colour atlas* (6th ed.). Churchill Livingstone.

BAB 10 | FISILOGI SISTEM LIMFATIK

dr. Nadia Purnama Dewi, M.Biomed., Ph.D.

A. Pendahuluan

Sistem limfatik adalah bagian penting dari sistem sirkulasi tubuh manusia dan bertanggung jawab atas homeostasis cairan jaringan, absorpsi lemak dari usus halus, dan pertahanan imun terhadap patogen. Selama ini, pemahaman mengenai sistem limfatik dalam kurikulum pendidikan kedokteran relatif kurang dibandingkan sistem vaskular darah, sehingga masih banyak konsep dasar yang belum dikuasai secara optimal oleh mahasiswa maupun praktisi klinis. (Khaja, M., et al., 2020)

Sistem ini terdiri atas pembuluh limfatik, cairan limfa, dan berbagai organ limfoid primer maupun sekunder. Pembuluh limfatik mengalirkan limfa dari ruang interstisial jaringan menuju sistem vena, membawa antigen, mediator inflamasi, dan limfosit untuk diproses di nodus limfa. Sistem limfatik ini mencegah edema dan membantu sistem kekebalan menyesuaikan diri dengan antigen asing dengan menjaga keseimbangan cairan interstisial. (Petrova, T., & Koh, 2020)

Sistem limfatik memainkan peran penting dalam proses patologis seperti metastasis sel kanker, penyebaran infeksi kronis, dan gangguan autoimun selain melakukan fungsi perlindungan. Dengan meningkatnya insiden penyakit seperti kanker, infeksi limfatik (misalnya filariasis), dan limfedema, pemahaman fisiologi sistem ini menjadi aspek krusial bagi tenaga kesehatan. (Sherk, W., et al., 2022)

DAFTAR PUSTAKA

- Adam Chaker (2016) 'Anatomy and Microanatomy of Tonsils', *Encyclopedia of Immunobiology*, 3, pp. 420-426. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374279-7.07005-3>.
- Ambler, W., Santambrogio, L., & Lu, T. (2021) 'Advances in understanding and examining lymphatic function: relevance for understanding autoimmunity.', *Current Opinion in Rheumatology*, 34, pp. 133-138. doi: <https://doi.org/10.1097/BOR.0000000000000864>.
- Banerjee, P., Roy, S., & Chakraborty, S. (2022) 'Recent advancement of imaging strategies of the lymphatic system: Answer to the decades old questions', *Microcirculation*, 29. doi: <https://doi.org/10.1111/micc.12780>.
- Bazigou, E., Wilson, J., & Moore, J. (2014) 'Primary and secondary lymphatic valve development: molecular, functional and mechanical insights', *Microvascular research*, 96, pp. 38-45. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mvr.2014.07.008>.
- Bujoreanu, I. and Gupta, V. (2020) *Anatomy, Lymph Nodes, StatPearls*.
- Currllin, S., Nick, H., Jorgensen, M., Nick, J., Brusko, M., Hakimian, H., Penaloza-Aponte, J., Rodriguez, N., Medina-Serpas, M., Yang, M., Seifert, R., Kusmartseva, I., Brusko, T., Otto, K., Posgai, A., Wasserfall, C., & Atkinson, M. (2022) 'Immune, endothelial and neuronal network map in human lymph node and spleen', *bioRxiv*. doi: <https://doi.org/10.1101/2021.10.20.465151>.
- Hamazaki, Y., Sekai, M., & Minato, N. (2016) 'Medullary thymic epithelial stem cells: role in thymic epithelial cell maintenance and thymic involution', *Immunological Reviews*, 271. doi: <https://doi.org/10.1111/imr.12412>.

- Hayashi, H., Kawamura, M., & Seishima, M. (2016) 'Abstract 543: Enhancement of Rat Lymphatic Lipid Transport by Glucose Ingestion', *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 36.
- Hokkanen, K., Tirronen, A., & Ylä-Herttuala, S. (2019) 'Intestinal lymphatic vessels and their role in chylomicron absorption and lipid homeostasis', *Current Opinion in Lipidology*. doi: <https://doi.org/10.1097/MOL.0000000000000626>.
- Hu, D., Li, L., Li, S., Wu, M., Ge, N., Cui, Y., Lian, Z., Song, J., & Chen, H. (2019) 'Lymphatic system identification, pathophysiology and therapy in the cardiovascular diseases', *Journal of molecular and cellular cardiology*, 133, pp. 99–111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.yjmcc.2019.06.002>.
- Hu, Z., Zhao, X., Wu, Z., Qu, B., Yuan, M., Xing, Y., Song, Y., & Wang, Z. (2024) 'Lymphatic vessel: Origin, heterogeneity, biological functions and therapeutic targets', *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9. doi: <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01723-x>.
- Iwakiri, Y. (2016) 'The lymphatic system: A new frontier in hepatology.', *Hepatology*, 64. doi: <https://doi.org/10.1002/hep.28650>.
- Johnson, L. (2021) 'In Sickness and in Health: The Immunological Roles of the Lymphatic System', *International Journal of Molecular Sciences*, 22. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms22094458>.
- Jonas, F., Keša, P., Páral, P., Pankráč, J., Kalbáčová, M., Miletin, J., Sukop, A., Molitor, M., Stanek, K., Šefc, L., & Mestak, O. (2022) 'The Effect of Vascular Endothelial Growth Factor C and Adipose-Derived Stem Cells on Lymphatic Regeneration in a Rat Vascularized Lymph Node Transfer Model', *Journal of Reconstructive Microsurgery*, 39, pp. 311–319. doi: <https://doi.org/10.1055/a-1896-5471>.

- Karaman, S., & Alitalo, K. (2017) 'ORAI1 Controls the Unique Adjustment of Lymphatics to Fluid Flow', *Circulation research*, 120(9), pp. 1373–1375. doi: <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.117.310917>.
- Khaja, M., Kokabi, N., Downing, T., Majdalany, B., Saad, W., & Goswami, A. (2020) 'Lymphatic Anatomy and Physiology', *Seminars in Interventional Radiology*, 37, pp. 227–236. doi: <https://doi.org/10.1055/s-0040-1713440>.
- Klimontov, V., & Bulumbaeva, D. (2021) 'Lymphatic system and adipose tissue: Crosstalk in health and disease', *Obesity and metabolism*. doi: <https://doi.org/10.14341/omet12776>.
- Kumar, A., Lee, Y., Muthuchamy, M., & Chakraborty, S. (2018) 'SUBSTANCE P REGULATES INFLAMMATORY PATHWAYS IN LYMPHATIC MUSCLE.', *The FASEB Journal*, 32. doi: https://doi.org/10.1096/fasebj.2018.32.1_supplement.576.6.
- Li, Z., Yang, E., & Long, X (2021) 'Function of the Lymphatic System', *Peripheral Lymphedema*. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3484-0_4.
- Lobov, G. (2023) 'Immune Function of the Lymphatic System', *Advances in Physiological Sciences*. doi: <https://doi.org/10.31857/s0301179823030049>.
- Lobov, G., & Nepiyushchikh, Z. (2020) 'Structure and physiology of the lymphatic vasculature.', *Regional blood circulation and microcirculation*. doi: <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2020-19-3-5-18>.
- Lucignani, G., & Rescigno, M. (2005) 'The role of molecular imaging in the development of dendritic cell-based cancer vaccines', *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 32, pp. 725–730. doi: <https://doi.org/10.1007/s00259-005-1858-0>.

- Mazny, A. (2020) 'Lymphoma as Blood Malignancies', *Journal of carcinogenesis & mutagenesis*, 1(1). doi: <https://doi.org/10.35248/2157-2518.20.S15.002>.
- Michalik, B., Engels, S., Otterbach, M., Maurer, M., Wawroschek, F., & Winter, A. (2025) 'Bimodal inguinal sentinel lymph node imaging using a radiation-free fluorescent magnetic hybrid tracer in penile cancer patients', *Frontiers in Oncology*, 15. doi: <https://doi.org/10.3389/fonc.2025.1523038>.
- Mohamed Elshikh, Ahmed W Moawad, Usama Salem, Sergio P Klimkowski, Talaat Hassan, Brinda Rao Korivi, Corey T Jensen, S. J. and K. M. E. (2021) 'Oncologic Imaging of the Lymphatic System: Current Perspective with Multi-Modality Imaging and New Horizon', *Cancers*, 13(4554). doi: <https://doi.org/10.3390/cancers13184554>.
- Molavi, D. (2018) 'Lymph Node and Spleen', in *The Practice of Surgical Pathology*. Springer, Cham, pp. 222-238. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-59211-4_21.
- Morais, M., Campello, M., Xavier, C., Heemskerk, J., Correia, J., Lahoutte, T., Cavelliers, V., Hernot, S., & Santos, I. (2014) 'Radiolabeled mannosylated dextran derivatives bearing an NIR-fluorophore for sentinel lymph node imaging', *Bioconjugate chemistry*, 25(11), pp. 1963-1970. doi: <https://doi.org/10.1021/bc500336a>.
- Mukherjee, A., Hooks, J., & Dixon, J. (2018) 'Physiology: Lymph Flow', in (eds) *Limfedema*. Springer, Cham, pp. 91-111. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-52423-8_8.
- Pan, W. (2017) 'Components of the Lymphatic System', in *In: Atlas of Lymphatic Anatomy in the Head, Neck, Chest and Limbs*. Springer, Singapore, pp. 1-9. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-10-3749-8_1.
- Petrova, T., & Koh, G. (2020) 'Biological functions of lymphatic vessels', *Science*, 369. doi: <https://doi.org/10.1126/science.aax4063>.

- Possenti, L., Casagrande, G., Di Gregorio, S., Zunino, P., & Costantino, M. (2019) 'Numerical simulations of the microvascular fluid balance with a non-linear model of the lymphatic system', *Microvascular research*, 122, pp. 101–110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mvr.2018.11.003>.
- Rasquinha, M., Sur, M., Lasrado, N., & Reddy, J. (2021) 'IL-10 as a Th2 Cytokine: Differences Between Mice and Humans', *The Journal of Immunology*, 207, pp. 2205–2215. doi: <https://doi.org/10.4049/jimmunol.2100565>.
- Rouhani, S., Eccles, J., Riccardi, P., Peske, J., Tewalt, E., Cohen, J., Liblau, R., Mäkinen, T., & Engelhard, V. (2015) 'Roles of lymphatic endothelial cells expressing peripheral tissue antigens in CD4 T-cell tolerance induction', *Nature Communications*, 6. doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms7771>.
- Salah, H., Biegus, J., Ponikowski, P., & Fudim, M. (2023) 'Role of Lymphatics in Heart Failure', *Journal of the Society for Cardiovascular Angiography & Interventions*, 2. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jscai.2023.101204>.
- Santambrogio, L. (2018) 'Lymph Formation and Composition', in *Lymphedema*. Springer, Cham, pp. 139–152. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-52423-8_11.
- Schwartz, N. *et al.* (2019) 'Lymphatic function in autoimmune diseases', *Frontiers in Immunology*. doi: 10.3389/fimmu.2019.00519.
- Sherk, W., Lee, E., Masch, W., Agarwal, P., Biko, D., & Ladino-Torres, M. (2022) 'Understanding Lymphatic Anatomy and Abnormalities at Imaging.', *Radiographics: a review publication of the Radiological Society of North America, Inc*, 210104. doi: <https://doi.org/10.1148/rg.210104>.

- Shew, T., Wolins, N., & Cifarelli, V. (2018) 'VEGFR-3 Signaling Regulates Triglyceride Retention and Absorption in the Intestine.', *Frontiers in Physiology*, 9. doi: <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01783>.
- Srebnik, H. . (2002) 'Introduction to the Lymphatic System', in *Concepts in Anatomy*. Boston: Springer nature link, pp. 113–120. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0857-1_17.
- Subileau, M., & Vittet, D. (2021) 'Lymphatics in Eye Fluid Homeostasis: Minor Contributors or Significant Actors?', *Biology*, 10. doi: <https://doi.org/10.3390/biology10070582>.
- Sun, Z., Torphy, R., Miller, E., Darehshouri, A., Vigil, I., Terai, T., Eleanor, E., Sun, Y., Guo, Y., Yee, E., Hu, J., Kedl, R., Lasda, E., Hesselberth, J., Paul, M., Bruce, K., Randolph, G., Schulick, R., & Zhu, Y. (2025) 'GPR182 is a lipoprotein receptor for dietary fat absorption', *bioRxiv*. doi: <https://doi.org/10.1101/2025.02.03.634329>.
- Tavares, G., & Louveau, A. (2021) 'Meningeal Lymphatics: An Immune Gateway for the Central Nervous System', *Cells*, 10. doi: <https://doi.org/10.3390/cells10123385>.
- Thomas B. Nutman (2016) 'Immunology of Lymphatic Filariasis', *Encyclopedia of Immunobiology*, 4, pp. 142–149. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374279-7.13014-0>.
- Thomas, J., Jacob, L., & Boisserand, L. (2019) 'Lymphatic system in central nervous system', *Medecine sciences*, 35(1), pp. 55–61. doi: <https://doi.org/10.1051/medsci/2018309>.
- Thompson, G. (1984) 'Fat absorption and metabolism', *Gastroenterologia Japonica*, 19, pp. 251–259. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02779177>.
- Tian, W., Jiang, X., Kim, J., Begaye, A., Nicolls, M., & Rockson, S. (2014) 'Lymphedema and Lymphatic-dependent Immune Dysfunction', *Journal of clinical & cellular immunology*, 5, pp. 1–5. doi: <https://doi.org/10.4172/2155-9899.1000249>.

- Wang, L., Saito, K., Toda, M., Hori, T., Torii, M., , N., Katayama, N., Shiku, H., Kuribayashi, K., & Kato, T. (2010) 'UV irradiation after immunization induces type 1 regulatory T cells that suppress Th2-type immune responses via secretion of IL-10.', *Immunobiology*, 215(2), pp. 124–32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.imbio.2009.01.013>.
- Zaghloul, D., AbdErahim, E., El_Raheem, B., & Mohamed, M. (2022) 'Anatomical and histological study on thymus development in the embryo and adult mice', *SVU-International Journal of Medical Sciences*. doi: <https://doi.org/10.21608/svuijm.2022.163413.1409>.
- Zhang, L., Ye, C., Li, P., Li, C., Shu, W., Zhao, Y., & Wang, X. (2022) 'ADSCs stimulated by VEGF-C alleviate intestinal inflammation via dual mechanisms of enhancing lymphatic drainage by a VEGF-C/VEGFR-3-dependent mechanism and inhibiting the NF- κ B pathway by the secretome', *Stem Cell Research & Therapy*, 13. doi: <https://doi.org/10.1186/s13287-022-03132-3>.

BAB

11

FISIOLOGI SISTEM KEKEBALAN TUBUH

dr. Muhammad Azmi Fanany, Sp.B., FICS., FINACS.

A. Pendahuluan

Kelangsungan hidup seseorang bergantung pada kemampuan tubuh untuk melindungi diri dari berbagai mikroorganisme—termasuk virus, bakteri, jamur, dan protozoa—yang selalu ada di sekitar kita. Tubuh juga perlu dilindungi dari bahaya seperti bahan kimia beracun, radiasi, dan bahkan alergen seperti serbuk sari. Namun, beberapa ancaman berasal dari dalam tubuh, bukan dari luar. Misalnya, sel abnormal sering berkembang dalam kehidupan sehari-hari. Jika tidak diatasi, sel-sel ini akan terus tumbuh dan membelah, mengakibatkan tumor. Secara sederhana, tubuh memiliki tiga lini pertahanan untuk melawan setiap ancaman baik dari dalam atau luar tubuh tersebut (Apurba Sankar & Sandhya, 2018; Erin, 2023).

Tabel 11.1 Tiga Tingkat Sistem Pertahanan Tubuh

Tingkat Pertahanan	Jenis Pertahanan	Klasifikasi Kekebalan
Lini Pertama	Penghalang Eksternal yang menahan sebagian besar patogen untuk masuk. Contohnya: • Kulit • Membran Mukosa	Lini pertama dan kedua adalah bagian dari sistem kekebalan bawaan (<i>innert immunity</i>). Jenis kekebalan ini:

DAFTAR PUSTAKA

- Apurba Sankar, S., & Sandhya, B. K. (2018). *Review of microbiology and immunology* (6th ed.). Jaypee Brothers Medical Publishers.
- Birkle, T., & Brown, G. C. (2021). I'm Infected, Eat Me! Innate Immunity Mediated by Live, Infected Cells Signaling to Be Phagocytosed. *Infection and Immunity*, 89(5). <https://doi.org/10.1128/iai.00476-20>
- Chen, S., Lai, S. W. T., Brown, C. E., & Feng, M. (2021). Harnessing and Enhancing Macrophage Phagocytosis for Cancer Therapy. *Frontiers in Immunology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.635173>
- Chin-Hong, P., Joyce, E. A., Karandikar, M., Matloubian, M., Rubio, L. A., Schwartz, B. S., & Levinson, W. (2024). Overview of Immunity. In *Levinson's Review of Medical Microbiology & Immunology, A Guide to Clinical Infectious Diseases, 18th Edition*. McGraw Hill. accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?aid=1206188349
- Coffelt, S. B., Wellenstein, M. D., & Visser, K. E. d. (2016). Neutrophils in Cancer: Neutral No More. *Nature Reviews Cancer*, 16(7), 431–446. <https://doi.org/10.1038/nrc.2016.52>
- Emelda, E., Nugraeni, R., & Damayanti, K. (2023). Review: Exploration of Indonesian Herbal Plants for Anti Inflammatory. *Inpharmmed Journal (Indonesian Pharmacy and Natural Medicine Journal)*, 6(2), 58. <https://doi.org/10.21927/inpharmmed.v6i2.1938>
- Erin, O. (2023). *Anatomy & Physiology All-in-One For Dummies* (1st ed.). Wiley.
- Feldman, M. B., Vyas, J. M., & Mansour, M. K. (2019). It Takes a Village: Phagocytes Play a Central Role in Fungal Immunity. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, 89, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2018.04.008>

- Gordon, S. (2016). Phagocytosis: An Immunobiologic Process. *Immunity*, 44(3), 463–475. <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2016.02.026>
- Han, Y., Gao, H., Xu, J., Luo, J., Han, B., Bao, J., Pan, G., Li, T., & Zhou, Z. (2020). Innate and Adaptive Immune Responses Against Microsporidia Infection in Mammals. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01468>
- Handfield, C., Kwock, J., & MacLeod, A. S. (2018). Innate Antiviral Immunity in the Skin. *Trends in Immunology*, 39(4), 328–340. <https://doi.org/10.1016/j.it.2018.02.003>
- Haynes, B. F., Cuttle, K. A., & Fauci, A. S. (2026). Introduction to the Immune System. In D. Longo, A. Fauci, D. Kasper, S. Hauser, J. L. Jameson, J. Loscalzo, S. Holland, & C. Langford (Eds.), *Harrison's Principles of Internal Medicine, 22nd Edition*. McGraw Hill. accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?aid=1215133364
- Killick, J., Morisse, G., Sieger, D., & Astier, A. (2017). Complement as a Regulator of Adaptive Immunity. *Seminars in Immunopathology*, 40(1), 37–48. <https://doi.org/10.1007/s00281-017-0644-y>
- Kishiyama, J. L., Chang, J. J., & Donovan, S. M. (2019). Disorders of the Immune System. In G. D. Hammer & S. J. McPhee (Eds.), *Pathophysiology of Disease: An Introduction to Clinical Medicine, 8e*. McGraw-Hill Education. accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?aid=1156655889
- Kolev, M., & Kemper, C. (2017). Keeping It All Going – Complement Meets Metabolism. *Frontiers in Immunology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.00001>
- Kolev, M., & Markiewski, M. M. (2018). Targeting Complement-Mediated Immunoregulation for Cancer Immunotherapy. *Seminars in Immunology*, 37, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.smim.2018.02.003>

- Kormelink, T. G., Mol, S., Jong, E. C. d., & Wauben, M. H. M. (2018). The Role of Extracellular Vesicles When Innate Meets Adaptive. *Seminars in Immunopathology*, 40(5), 439–452. <https://doi.org/10.1007/s00281-018-0681-1>
- Lee, H.-J., Woo, Y., Hahn, T., Jung, Y. M., & Jung, Y. (2020). Formation and Maturation of the Phagosome: A Key Mechanism in Innate Immunity Against Intracellular Bacterial Infection. *Microorganisms*, 8(9), 1298. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8091298>
- Lestari, E. D., Nur, F. T., & Salimo, H. (2016). Hubungan Kadar C-Reactive Proteindan Kadar Feritin Serum Pada Gizi Kurang Usia 7-9 Tahun. *Sari Pediatri*, 13(4), 275. <https://doi.org/10.14238/sp13.4.2011.275-79>
- Macedo, A. C. L., & Isaac, L. (2016). Systemic Lupus Erythematosus and Deficiencies of Early Components of the Complement Classical Pathway. *Frontiers in Immunology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2016.00055>
- Mishra, A. (2023). *Harnessing Phagocytosis for Cancer Treatment*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110619>
- Netea, M. G., Joosten, L. A. B., Latz, E., Mills, K. H. G., Natoli, G., Stunnenberg, H. G., O'Neill, L., & Xavier, R. J. (2016). Trained Immunity: A Program of Innate Immune Memory in Health and Disease. *Science*, 352(6284). <https://doi.org/10.1126/science.aaf1098>
- Nugroho, A., Suwarman, S., & Nawawi, A. M. (2013). Hubungan Antara Rasio Neutrofil-Limfosit Dan Skor Sequential Organ Failure Assesment Pada Pasien Yang Dirawat Di Ruang Intensive Care Unit. *Jurnal Anestesi Perioperatif*, 1(3), 189–196. <https://doi.org/10.15851/jap.v1n3.198>
- Patgaonkar, M., Henson, R. M., & Shiao, S. L. (2019). Targeting Innate Immunity to Enhance the Efficacy of Radiation Therapy. *Frontiers in Immunology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.03077>

- Pilla-Moffett, D. M., Barber, M. F., Taylor, G. A., & Coers, J. (2016). Interferon-Inducible GTPases in Host Resistance, Inflammation and Disease. *Journal of Molecular Biology*, 428(17), 3495–3513. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2016.04.032>
- Pradnyasuari, N. M. S., & Putra, A. A. G. R. Y. (2023). Potensi Tanaman Jeruju (*Acanthus Illicifolius* L.) Sebagai Antiinflamasi. *Prosiding Workshop Dan Seminar Nasional Farmasi*, 2, 218–230. <https://doi.org/10.24843/wsnnf.2022.v02.p18>
- Riedel, S., Hobden, J. A., Miller, S., Morse, S. A., Mietzner, T. A., Detrick, B., Mitchell, T. G., Sakanari, J. A., Hotez, P., & Mejia, R. (2019). Immunology. In *Jawetz, Melnick, & Adelberg's Medical Microbiology*, 28e. McGraw-Hill Education. accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?aid=1163278992
- Romo, M. R., Pérez-Martínez, D., & Ferrer, C. C. (2016). Innate Immunity in Vertebrates: An Overview. *Immunology*, 148(2), 125–139. <https://doi.org/10.1111/imm.12597>
- Saahene, R. O., Barnes, P., & Nuvor, S. V. (2022). *The Interactive Role of Macrophages in Innate Immunity*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.103924>
- Sari, A. P. P., Amin, M., & Lukiati, B. (2017). Review: Penyebab Gangguan Autis Melalui Jalur Neuroinflamasi. *Bioeksperimen Jurnal Penelitian Biologi*, 3(2), 1. <https://doi.org/10.23917/bioeksperimen.v3i2.5177>
- Selders, G. S., Fetz, A. E., Radic, M., & Bowlin, G. L. (2017). An Overview of the Role of Neutrophils in Innate Immunity, Inflammation and Host-Biomaterial Integration. *Regenerative Biomaterials*, 4(1), 55–68. <https://doi.org/10.1093/rb/rbw041>

- Singh, H., Koury, J., & Kaul, M. (2021). Innate Immune Sensing of Viruses and Its Consequences for the Central Nervous System. *Viruses*, 13(2), 170. <https://doi.org/10.3390/v13020170>
- Sun, L., Wang, X., Saredy, J., Yuan, Z., Yang, X., & Wang, H. (2020). Innate-Adaptive Immunity Interplay and Redox Regulation in Immune Response. *Redox Biology*, 37, 101759. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101759>
- Tay, M. Z., Wiehe, K., & Pollara, J. (2019). Antibody-Dependent Cellular Phagocytosis in Antiviral Immune Responses. *Frontiers in Immunology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.00332>
- Uribe-Querol, E., & Rosales, C. (2017). Control of Phagocytosis by Microbial Pathogens. *Frontiers in Immunology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.01368>
- Vargas, M. C. F. (2021). *Innate Immunity and Autoimmune Diseases*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91366>
- Verschoor, A., Karsten, C. M., Broadley, S. P., Laumonnier, Y., & Köhl, J. (2016). Old Dogs – new Tricks: Immunoregulatory Properties of C3 and C5 Cleavage Fragments. *Immunological Reviews*, 274(1), 112–126. <https://doi.org/10.1111/imr.12473>
- Wikimedia Commons contributors. (2025). *Immune System*. Wikimedia Commons .
- Xu, Q., Tang, Y., & Huang, G. (2020). Innate Immune Responses in RNA Viral Infection. *Frontiers of Medicine*, 15(3), 333–346. <https://doi.org/10.1007/s11684-020-0776-7>
- Żelechowska, P., Agier, J., & Brzezińska-Błaszczyk, E. (2016). Endogenous Antimicrobial Factors in the Treatment of Infectious Diseases. *Central European Journal of Immunology*, 4, 419–425. <https://doi.org/10.5114/ceji.2016.65141>

BAB 12

FISIOLOGI KEHAMILAN DAN LAKTASI PADA MANUSIA

Ayu Tiara Fitri, S.Si., M.Biomed.

A. Pendahuluan

Proses kehamilan merupakan suatu proses yang terkoordinasi secara tepat yang melibatkan beberapa perubahan baik dari segi sistemik maupun lokal yang terjadi pada ibu untuk mendukung kebutuhan nutrisi dan oksigen pada bayi sehingga akan mendukung pertumbuhan dalam kandungan dan berlanjut hingga proses laktasi (Napso *et al.*, 2018). Ketika seorang ibu mengandung maka secara fisiologi tubuhnya akan mengalami adaptasi secara terus menerus, hal ini dipengaruhi oleh hormon plasenta dan adaptasi mekanis yang mendukung perkembangan janin (Mockridge *and* MacLennan, 2019). Perubahan yang termasuk seperti sistem respirasi, kardiovaskular, imunitas, juga metabolisme, selain itu yang berhubungan erat dengan kehamilan adalah laktasi yang dimulai jauh sebelum pelekatan awal bayi yang baru lahir. Proses ini menyebabkan payudara berubah dari sisi bentuk, komposisi, dan ukuran yang penting untuk keberhasilan dalam menyusui. (Napso *et al.*, 2018; Lawrence, 2022).

Adaptasi kardiovaskular pada ibu yang hamil ditandai dengan meningkatnya curah jantung dan volume darah yang disertai dengan penurunan progresif resistensi perifer seiring dengan perkembangan kehamilan. Di dalam pembuluh darah uterus terdapat aliran darah arteri uterus yang terus meningkat hal ini bertujuan agar dapat mengakomodasi peningkatan aliran darah arteri uterus (Bradshaw, 2022). Volume darah ibu

DAFTAR PUSTAKA

- Allerkamp, H.H. *et al.* (2021) 'Something old, something new: digital quantification of uterine vascular remodelling and trophoblast plugging in historical collections provides new insight into adaptation of the utero-placental circulation', *Human Reproduction*, 36(3), pp. 571–586. Available at: <https://doi.org/10.1093/humrep/deaa303>.
- Bouariu, A., Panaitescu, A.M. and Nicolaidis, K.H. (2022) 'First Trimester Prediction of Adverse Pregnancy Outcomes—Identifying Pregnancies at Risk from as Early as 11–13 Weeks', *Medicina*, 58(3), p. 332. Available at: <https://doi.org/10.3390/medicina58030332>.
- Bradshaw, J.L. (2022) 'Advancement toward predicting maternal vascular adaptations to pregnancy', *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 323(1), pp. H69–H71. Available at: <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00227.2022>.
- Burton, G.J. and Jauniaux, E. (2023) 'The human placenta: new perspectives on its formation and function during early pregnancy', *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 290(1997), p. 20230191. Available at: <https://doi.org/10.1098/rspb.2023.0191>.
- Chandra, M. and Paray, A.A. (2024) 'Natural Physiological Changes During Pregnancy', *The Yale Journal of Biology and Medicine*, 97(1), pp. 85–92. Available at: <https://doi.org/10.59249/JTIV4138>.
- Chen, M. *et al.* (2020) 'Changes in physiology and immune system during pregnancy and coronavirus infection: A review', *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*, 255, pp. 124–128. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ejogrb.2020.10.035>.

- Gangakhedkar, G.R. (2022) 'Physiological Changes in Pregnancy', *Indian Journal of Critical Care Medicine*, 25(S3), pp. S189–S192. Available at: <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10071-24039>.
- Geddes, D.T. *et al.* (2021) '25 Years of Research in Human Lactation: From Discovery to Translation', *Nutrients*, 13(9), p. 3071. Available at: <https://doi.org/10.3390/nu13093071>.
- Gephart, S.M. and Weller, M. (2014) 'Colostrum as Oral Immune Therapy to Promote Neonatal Health', *Advances in Neonatal Care*, 14(1), pp. 44–51. Available at: <https://doi.org/10.1097/anc.0000000000000052>.
- Irene Pascual Mathey, L. (2021) 'Neuroendocrinology of Pregnancy: Participation of Sex Hormones', in C. Marsh (ed.) *Reproductive Hormones*. IntechOpen. Available at: <https://doi.org/10.5772/intechopen.95774>.
- Jin, X. *et al.* (2024) 'Causes of Low Milk Supply: The Roles of Estrogens, Progesterone, and Related External Factors', *Advances in Nutrition*, 15(1), p. 100129. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2023.10.002>.
- Jk, M., B, R. and Joseph, J. (2019) 'Oxytocin-functions: an overview', *MOJ Anatomy & Physiology*, 6(4). Available at: <https://doi.org/10.15406/mojap.2019.06.00260>.
- Kazma, J.M. *et al.* (2020) 'Anatomical and physiological alterations of pregnancy', *Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics*, 47(4), pp. 271–285. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10928-020-09677-1>.
- Larsson, G., Larsson, M., and Family Larsson-Rosenquist Foundation (eds) (2018) *Breastfeeding and breast milk - from biochemistry to impact: a multidisciplinary introduction*. Stuttgart; New York: Thieme : Family Larsson-Rosenquist Foundation.

- Lawrence, R.A. (2022) 'Physiology of Lactation', in *Breastfeeding*. Elsevier, pp. 58–92. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-68013-4.00003-1>.
- Martin, C. *et al.* (2022) 'The Physiological Changes In The Postpartum Period After Childbirth', *Asian Journal of Social and Humanities*, 1(03), pp. 105–118. Available at: <https://doi.org/10.59888/ajosh.v1i03.19>.
- Mockridge, A. and Maclellan, K. (2019) 'Physiology of pregnancy', *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 20(7), pp. 397–401. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2019.05.001>.
- Morton, A. (2021) 'Physiological Changes and Cardiovascular Investigations in Pregnancy', *Heart, Lung and Circulation*, 30(1), pp. e6–e15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.hlc.2020.10.001>.
- Morton, A. and Teasdale, S. (2022) 'Physiological changes in pregnancy and their influence on the endocrine investigation', *Clinical Endocrinology*, 96(1), pp. 3–11. Available at: <https://doi.org/10.1111/cen.14624>.
- Napso, T. *et al.* (2018) 'The Role of Placental Hormones in Mediating Maternal Adaptations to Support Pregnancy and Lactation', *Frontiers in Physiology*, 9, p. 1091. Available at: <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01091>.
- Neville, M.C. (2023) 'Lactation in the human', *Animal Frontiers*, 13(3), pp. 71–77. Available at: <https://doi.org/10.1093/af/vfad021>.
- Newbern, D. and Freemark, M. (2011) 'Placental hormones and the control of maternal metabolism and fetal growth', *Current Opinion in Endocrinology, Diabetes & Obesity*, 18(6), pp. 409–416. Available at: <https://doi.org/10.1097/MED.0b013e32834c800d>.

- Pérez-López, F.R., López-Baena, M.T. and Pérez-Roncero, G.R. (2021) 'Prolactin secretion in women: narrative review', *Gynecology and Pelvic Medicine*, 4, pp. 20–20. Available at: <https://doi.org/10.21037/gpm-21-4>.
- Prater, M. *et al.* (2021) 'RNA-Seq reveals changes in human placental metabolism, transport and endocrinology across the first-second trimester transition', *Biology Open*, 10(6), p. bio058222. Available at: <https://doi.org/10.1242/bio.058222>.
- Sadovnikova, A., Wysolmerski, J.J. and Hovey, R.C. (2020) 'The Onset and Maintenance of Human Lactation and its Endocrine Regulation', in *Maternal-Fetal and Neonatal Endocrinology*. Elsevier, pp. 189–205. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814823-5.00014-3>.
- Shagana, J.A. *et al.* (2018) 'Physiological changes in pregnancy', *Drug Invention Today*, 10(8).
- Troiano, N.H. (2018) 'Physiologic and Hemodynamic Changes During Pregnancy', *AACN Advanced Critical Care*, 29(3), pp. 273–283. Available at: <https://doi.org/10.4037/aacnacc2018911>.
- Truchet, S. and Honvo-Houéto, E. (2017) 'Physiology of milk secretion', *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*, 31(4), pp. 367–384. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.beem.2017.10.008>.
- Uvnäs-Moberg, K. *et al.* (2020) 'Maternal plasma levels of oxytocin during breastfeeding – A systematic review', *PLOS ONE*. Edited by J.P. Van Wouwe, 15(8), p. e0235806. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235806>.
- Wu, X. and Jin, R. (2025) 'Effects of postpartum hormonal changes on the immune system and their role in recovery', *Acta Biochimica Polonica*, 72, p. 14241. Available at: <https://doi.org/10.3389/abp.2025.14241>.

TENTANG PENULIS



apt. Zahira Amody., S.Farm., M.Si. lahir di Ujungpandang, pada 18 Agustus 1988. Ia tercatat sebagai lulusan Fakultas Farmasi Universitas Muslim Indonesia (S1 Farmasi). Melanjutkan Profesi Apoteker di Fakultas Farmasi Universitas Hasanuddin. Selanjutnya untuk Magister Sains juga di Fakultas Farmasi Universitas Hasanuddin. Wanita yang kerap disapa Zahira. Zahira Amody., seorang akademisi/ dosen di bidang farmasi yang sekarang ini sebagai dosen yang bertugas di Program Studi Farmasi di Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan (STIKES) Maluku Husada.



dr. Agustiawan, MKM, AIFO-K, FRSPH, FISQua, lahir di Bangka pada tanggal 2 Agustus. Penulis merupakan Dokter di Rumah Sakit Islam (RSI) Ibnu Sina Pekanbaru dan Rumah Sakit Umum Daerah (RSUD) Arifin Achmad Pekanbaru, Riau. Penulis juga sebagai Dosen Tetap FK Institut Kesehatan Helvetia Medan. Penulis menyelesaikan pendidikan di Fakultas Kedokteran Universitas Malikussaleh pada tahun 2018 dan Promosi Kesehatan Ilmu Perilaku dalam pendidikan S2 Magister Kesehatan Masyarakat di Institut Kesehatan Helvetia Medan pada tahun 2022. Penulis juga menjalani Pendidikan Ilmu Hukum di Universitas Terbuka dan Magister Manajemen di Universitas Islam Syekh Yusuf, Tangerang. Penulis tergabung dalam organisasi Ikatan Ahli Kesehatan Masyarakat Indonesia (IAKMI), Perkumpulan Promotor dan Pendidik Kesehatan Masyarakat Indonesia (PPPKMI), Ikatan Dokter Indonesia (IDI), Persatuan Ahli Kesehatan dan Keselamatan Kerja Indonesia (PAKKI), dan mendirikan Perkumpulan *Health Education and Promotion* (HEP) Indonesia. Menyelesaikan program kursus Ahli Ilmu Faal Olahraga Klinis (AIFO-K) dan mendapatkan sertifikasi tersebut dari BNSP RI. Penulis aktif menulis beberapa

jurnal dengan bahasan yang fokus pada Ilmu Kesehatan Masyarakat dan Kedokteran. Agustiawan juga merupakan *Fellow* dari *Royal Society for Public Health* (FRSPH) yang berpusat di London, UK dan *Fellowship in International Society for Quality in Health Care* (FISQua). Agustiawan juga menyelesaikan Diploma dalam *Sustainable Management* dari IBMI Berlin.



Lola Tulak Rerung, M.Farm Lahir di Tana Toraja, pada 27 Desember 1996. Penulis lulusan Universitas Setia Budi Solo pada Program Studi S2 Farmasi tahun 2021. Memulai karir dosen di Politeknik Tiara Bunda pada tahun 2021-2023 dan sekarang sebagai dosen di Universitas Khairun. Penulis aktif dalam publikasi artikel dan menulis buku.

Email: lolatulakrerung@unkhair.ac.id



Risa Kusuma Anggraeni, SST, M.Biomed lahir di Salatiga, pada 17 November 1992. Ia tercatat sebagai lulusan Universitas Indonesia. Wanita yang kerap disapa Risa ini merupakan dosen di Fakultas Ilmu Kesehatan di UPN Veteran. Email :risakusuma@upnvj.ac.id



dr. Chrispian Oktafbipian Mamudi, SpPD-KPMK, FINASIM lahir di Jakarta, pada 6 September 1975. Ia tercatat sebagai lulusan Fakultas Kedokteran Universitas Atma Jaya Jakarta, mengambil Spesialisasi di bidang Ilmu Penyakit Dalam di Fakultas Kedokteran Sam

Ratulangi Manado, mengambil subspecialis Konsultan Pulmonologi dan Medik Kritis di Universitas Indonesia Jakarta dan saat ini sedang mengambil program S3 di bidang Kedokteran di Fakultas Kedokteran Universitas Padjadjaran Bandung. Pria yang

kerap disapa Chipi ini adalah anak dari pasangan Drs. Harry O. Mamudi, Apt, MM (ayah) dan Dra. Sylvia N. Utama, Apt, MM (ibu). Ia mempunyai istri dr. Grace Walandouw, SpKFR, AIFO-K dan dua orang putri, Daveena Ophelia Mamudi dan Filia Quelene Mamudi. Saat ini **Chrispian** aktif di organisasi IDI Jakarta Utara, PAPDI Jaya dan PERPARI, dan juga aktif sebagai Ketua Koalisi Organisasi Profesi Indonesia untuk Penanggulangan TBC (KOPI TB) Jakarta Utara. Email: chrispian.oktafbipian@ukrida.ac.id



Fidyatul Nazhira, S.Fis., Ftr., M.Fis lahir di Malang, pada 10 Januari 1995. Ia tercatat sebagai lulusan Magister Fisiologi Keolahragaan Universitas Udayana dan merupakan praktisi fisioterapi. Wanita yang kerap disapa Fidyah ini adalah istri dari Agil Mugi Sentoso, S.Fis., Ftr serta anak dari pasangan Prof. Dr. Aunurrahman (ayah) dan Dra. Fitri Maryanti (ibu). **Fidyatul Nazhira** bekerja sebagai dosen fisioterapi di Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta dan beberapa artikel penelitian dan pengabdian kepada masyarakatnya dapat dilihat pada Google Scholar miliknya. Email : fidyatul@upnvj.ac.id



dr. Mila Citrawati, MBIomed., SpKKLP Subsp. FOMC lahir di Jambi, pada 2 Maret 1971. Ia tercatat sebagai lulusan Universitas YARSI dan Universitas Indonesia. Wanita yang kerap disapa Mila ini adalah anak dari pasangan alm. Asiyanto (ayah) dan alm. Dwi Kustini (ibu). Mila Citrawati bukanlah orang baru di dunia pendidikan khususnya prodi Kedokteran Umum. Saat ini ia tercatat sebagai staf pengajar di Departemen Fisiologi Fakultas Kedokteran UPN Veteran Jakarta. Email : milacitrawati@upnvj.ac.id



Dr. dr. Anandia Putriyuni, Sp.PA lahir di Padang, tanggal 27 Juni 1977. Ia tercatat sebagai lulusan S3 Biomedik dan Spesialis Patologi Anatomik Fakultas Kedokteran Universitas Andalas. Wanita yang kerap disapa Anandia ini adalah istri dari Dr. dr. Yevri Zulfiqar, Sp.B, Sp.U(K), M.Kes. Saat ini Anandia bertugas di RSUD dr. Rasidin Padang dan Dosen di Fakultas Kedokteran Universitas Baiturrahmah Padang, Sumatera Barat.



dr. Nana Liana, Sp.PA lahir di Padang, tanggal 11 April 1985. Ia tercatat sebagai lulusan Spesialis Patologi Anatomik Fakultas Kedokteran Universitas Andalas. Wanita yang kerap disapa Nana ini adalah istri dari Eri Mardinal, SE. Saat ini Nana bertugas di RSI Siti Rahmah Padang dan Dosen di Fakultas Kedokteran Universitas Baiturrahmah Padang, Sumatera Barat.



dr. Nadia Purnama Dewi, M.Biomed, PhD lahir di Padang, pada 1 Agustus 1974. Ia tercatat sebagai lulusan Universitas Andalas, Universitas Indonesia dan Lincoln University College. Wanita yang kerap disapa Nadia ini adalah dosen di Fakultas Kedokteran Universitas Baiturrahmah Bagian Anatomi. Ibu dari 1 anak ini sudah menghasilkan 2 karya buku dan menerima penghargaan sebagai Best Presenter pada acara konferensi internasional ICETMTSHS 2025 yang diselenggarakan di Malaysia
Email: nadiapurnamadewi@fk.unbrah.ac.id



dr. Muhammad Azmi Fanany, Sp.B., FICS., FINACS. lahir di Medan, Tanggal 10 September 1989 dan menempuh pendidikan kedokteran di Fakultas Kedokteran Universitas Sumatera Utara, tempat ia meraih gelar Dokter Umum. Setelah itu, ia melanjutkan pendidikan spesialis dan menyelesaikan Program Pendidikan Dokter Spesialis Bedah di Universitas Syiah

Kuala.

Saat ini, dr. Azmy aktif sebagai dosen di Fakultas Kedokteran Universitas Batam, sekaligus menjalani praktik klinis sebagai dokter spesialis bedah. Keterlibatannya dalam dunia akademik dan pelayanan klinis menjadikan dirinya sebagai penghubung antara teori medis dan praktik lapangan yang nyata.

Selain mengajar dan melayani pasien, ia juga aktif menulis artikel ilmiah serta terlibat sebagai pembicara dalam seminar dan pelatihan kedokteran, khususnya di bidang ilmu bedah dan kegawatdaruratan bedah. Komitmennya terhadap pendidikan kedokteran dan peningkatan kualitas layanan kesehatan tercermin dari konsistensinya membina mahasiswa dan tenaga kesehatan di berbagai daerah.

Email: azmi_fanany@yahoo.co.id



Ayu Tiara Fitri, S.Si., M.Biomed lahir di Kalianda, Pada 16 November 1998. Merupakan anak ke-3 dari pasangan Mawardi (ayah) dan Faridlotul Ulfah (ibu). Menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Dan melanjutkan Pendidikan hingga meraih gelar magister di Program Studi Magister Ilmu

Biomedik, Fakultas Kedokteran, Kesehatan Masyarakat, dan Keperawatan, Universitas Gadjah Mada. Email: Ayutiarafitri@fk.unila.ac.id