



FISIOLOGI OLAHRAGA TERAPAN

INTEGRASI TEORI DAN KLINIS UNTUK TENAGA KESEHATAN

FISIOLOGI OLAHRAGA TERAPAN

**INTEGRASI TEORI DAN KLINIS UNTUK TENAGA
KESEHATAN**

FISIOLOGI OLAHRAGA TERAPAN

INTEGRASI TEORI DAN KLINIS UNTUK TENAGA KESEHATAN

Penulis

Yanasta Yudo Pratama



Binarmedia
Berkarya Tanpa Batas

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

1. **Setiap Orang** yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan, atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. **Setiap Orang** yang dengan tanpa hak dan, atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan, atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan, atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. **Setiap Orang** yang dengan tanpa hak dan, atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan, atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan, atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. **Setiap Orang** yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan, atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

**FISIOLOGI OLAHRAGA TERAPAN
INTEGRASI TEORI DAN KLINIS UNTUK TENAGA KESEHATAN**

Nama Penulis :

Yanasta Yudo Pratama

Editor :

-

Desain Cover :

Gilang Taruna Pratama

Sumber :

www.binarmedia.id

Tata Letak :

Saddam Musa Al-Ghaazi

Proofreader :

Yanasta Yudo Pratama

Ukuran :

Unesco 15x23cm, vi + 258 halaman

ISBN :

978-634-7534-25-5

Cetakan Pertama :

Februari 2026

Hak Cipta 2026, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2026 by Binar Media Pratama

All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PENERBIT BINAR MEDIA PRATAMA

Tlahab Kidul RT 03 RW 02, Kecamatan Karangreja,
Kabupaten Purbalingga, Provinsi Jawa Tengah

Telp: 0877-9021-5352

Website: binarmedia.id.

E-mail: binarmediapratama@gmail.com

PRAKATA

Buku ajar "Fisiologi Olahraga Terapan: Integrasi Teori dan Klinis untuk Tenaga Kesehatan" ini disusun sebagai respons terhadap kebutuhan mendesak akan sumber daya pendidikan yang menjembatani ilmu fisiologi olahraga fundamental dengan aplikasi praktisnya di lingkungan klinis. Perkembangan ilmu kesehatan menuntut para praktisi, termasuk dokter, fisioterapis, perawat, dan ahli gizi, untuk tidak hanya memahami patofisiologi penyakit, tetapi juga menguasai mekanisme respons tubuh terhadap intervensi nonfarmakologis seperti latihan fisik. Latihan fisik telah diakui sebagai salah satu pilar utama dalam pencegahan, terapi, dan rehabilitasi berbagai kondisi kronis. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai adaptasi fisiologis yang terjadi akibat aktivitas fisik menjadi sebuah kompetensi esensial. Tujuan utama dari penulisan buku ini adalah untuk menyediakan panduan yang komprehensif, berbasis bukti, dan terstruktur bagi mahasiswa serta tenaga kesehatan profesional. Materi yang disajikan dirancang untuk mengubah cara pandang terhadap latihan, dari sekadar aktivitas rekreasi menjadi sebuah modalitas terapeutik yang presisi. Dengan mengintegrasikan konsep-konsep teoretis mulai dari bioenergetika seluler hingga respons sistemik kardiovaskular dan endokrin, buku ini bertujuan membekali pembaca dengan landasan ilmiah yang kuat untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi program latihan yang aman dan efektif bagi beragam populasi pasien. Urgensi penguasaan materi ini semakin meningkat seiring dengan pergeseran paradigma kesehatan global yang lebih berfokus pada pendekatan preventif dan manajemen gaya hidup.

Februari 2026

Tim Penulis

KATA PENGANTAR

Kehadiran buku ajar ini di hadapan para pembaca, khususnya mahasiswa dan para profesional di bidang kesehatan, merupakan sebuah upaya untuk menyajikan diskursus ilmiah yang aplikatif. Harapan terbesar penulis adalah agar buku ini tidak hanya menjadi referensi akademis yang dibaca untuk memenuhi tuntutan kurikulum, melainkan menjadi percikan inspirasi yang mendorong pembaca untuk mengaplikasikan prinsip-prinsip fisiologi olahraga dalam praktik klinis sehari-hari. Semoga setiap babnya mampu membuka wawasan baru dan memperkuat keyakinan bahwa pergerakan tubuh adalah salah satu instrumen penyembuhan paling poten yang kita miliki.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyelesaian buku ini tidak akan terwujud tanpa dukungan dan kontribusi dari berbagai pihak. Ucapan terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada rekan-rekan sejawat, para ahli di bidang kedokteran olahraga, dan institusi yang telah memberikan ruang untuk riset dan pengembangan. Secara khusus, terima kasih kepada para mahasiswa yang melalui diskusi dan pertanyaan kritisnya, secara tidak langsung telah membantu menyempurnakan kedalaman dan kejelasan materi dalam buku ini. Semoga buku ajar ini memberikan manfaat yang seluas-luasnya bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan peningkatan kualitas pelayanan kesehatan di Indonesia. Kritik dan saran yang membangun senantiasa penulis harapkan untuk perbaikan di masa mendatang.

Februari 2026

Tim Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
BAB 1 PENGANTAR FISILOGI OLAHRAGA	1
Tujuan Pembelajaran.....	1
Pendahuluan	1
1.1. Definisi dan Ruang Lingkup Fisiologi Olahraga.....	4
1.2. Konsep Homeostasis dan Respon Adaptasi	10
1.3. Bioenergetika dalam Aktivitas Fisik	16
Rangkuman Bab	21
Latihan Mahasiswa.....	22
Glosarium Bab.....	26
Daftar Pustaka Bab	27
BAB 2 FISILOGI SISTEM OTOT RANGKA	30
Tujuan Pembelajaran.....	30
Pendahuluan	30
2.1. Struktur dan Mekanisme Kontraksi Otot.....	32
2.1.1. Anatomi Mikroskopis Serabut Otot (Sarkomer).....	35
2.2. Tipe Serabut Otot dan Karakteristiknya	37
2.2.3. Metode Penentuan Dominansi Serabut Otot	42
2.3. Adaptasi Otot terhadap Latihan Beban.....	43
2.3.3. Atrofi Otot dan Dampak Sedentari terhadap Kesehatan....	47
Rangkuman Bab	48
Latihan Mahasiswa.....	49
Glosarium Bab.....	53

Daftar Pustaka Bab	54
BAB 3 KONTROL NEUROMUSKULAR DALAM OLAHRAGA.....	56
Tujuan Pembelajaran.....	56
Pendahuluan	57
3.1. Organisasi Sistem Saraf Motorik.....	59
3.2. Reseptor Sensorik dan Propriosepsi	63
3.3. Adaptasi Neural terhadap Latihan	68
Rangkuman Bab	73
Latihan Mahasiswa.....	74
Glosarium Bab.....	78
Daftar Pustaka Bab	79
BAB 4 FISILOGI SISTEM KARDIOVASKULAR SAAT LATIHAN	81
Tujuan Pembelajaran.....	81
Pendahuluan	82
4.1. Respon Jantung terhadap Aktivitas Fisik	84
4.2. Hemodinamika dan Distribusi Aliran Darah	88
4.3. Adaptasi Kardiovaskular Kronis	92
Rangkuman Bab	97
Latihan Mahasiswa.....	98
Glosarium Bab.....	102
Daftar Pustaka Bab.....	103
BAB 5 FISILOGI SISTEM PERNAPASAN	105
Tujuan Pembelajaran.....	105
Pendahuluan	105
5.1. Mekanika Pernapasan dan Pertukaran Gas.....	107
5.2. Regulasi Ventilasi selama Latihan	112
5.3. Adaptasi Paru dan Kapasitas Aerobik	116
Rangkuman Bab	121
Latihan Mahasiswa.....	122
Glosarium Bab.....	125

Daftar Pustaka Bab	126
BAB 6 METABOLISME DAN PENGGUNAAN SUBSTRAT ENERGI	128
Tujuan Pembelajaran	128
Pendahuluan	129
6.1. Metabolisme Karbohidrat saat Olahraga	130
6.2. Metabolisme Lemak sebagai Sumber Energi	135
6.3. Metabolisme Protein dan Keseimbangan Nitrogen	139
Rangkuman Bab	144
Latihan Mahasiswa	145
Glosarium Bab	148
Daftar Pustaka Bab	149
BAB 7 KESEIMBANGAN CAIRAN DAN TERMOREGULASI	152
Tujuan Pembelajaran	152
Pendahuluan	152
7.1. Mekanisme Pengaturan Suhu Tubuh	154
7.2. Fisiologi Keringat dan Dehidrasi	159
7.3. Aklimatisasi terhadap Lingkungan Ekstrem	163
Rangkuman Bab	168
Latihan Mahasiswa	168
Glosarium Bab	172
Daftar Pustaka Bab	173
BAB 8 ENDOKRINOLOGI DALAM OLAHRAGA	175
Tujuan Pembelajaran	175
Pendahuluan	175
8.1. Respon Hormonal terhadap Latihan Akut	177
8.2. Hormon Anabolik dan Perbaikan Jaringan	181
8.3. Gangguan Endokrin akibat Latihan Berlebih	185
Rangkuman Bab	190
Latihan Mahasiswa	191
Glosarium Bab	194

Daftar Pustaka Bab	195
BAB 9 FISILOGI PEMULIHAN DAN KELELAHAN.....	198
Tujuan Pembelajaran	198
Pendahuluan	198
9.1. Mekanisme Kelelahan Otot (Fatigue)	200
9.2. Proses Pemulihan (Recovery).....	203
9.3. Delayed Onset Muscle Soreness (DOMS)	206
Rangkuman Bab	209
Latihan Mahasiswa.....	210
Glosarium Bab.....	214
Daftar Pustaka Bab.....	215
BAB 10 PENGUKURAN DAN EVALUASI KAPASITAS FISIK	217
.....	217
Tujuan Pembelajaran	217
Pendahuluan	218
10.1. Tes Kapasitas Aerobik (Cardiorespiratory Fitness).....	219
10.2. Pengukuran Kekuatan dan Daya Tahan Otot	224
10.3. Analisis Komposisi Tubuh	228
Rangkuman Bab	232
Latihan Mahasiswa.....	233
Glosarium Bab.....	237
Daftar Pustaka Bab.....	238
GLOSARIUM.....	240
REFERENSI	246

BAB 1

PENGANTAR FISILOGI OLAHRAGA

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menjelaskan definisi, ruang lingkup, dan peran strategis fisiologi olahraga dalam konteks ilmu kesehatan terapan.
2. Menganalisis perkembangan historis ilmu kedokteran olahraga dan hubungannya dengan disiplin ilmu lain.
3. Membedakan konsep fundamental antara homeostasis, *steady state*, dan respons adaptasi (akut vs. kronis).
4. Menguraikan mekanisme kerja sistem kontrol umpan balik biologis selama tubuh merespons latihan fisik.
5. Mengidentifikasi tiga jalur bioenergetika utama yang menyediakan energi untuk aktivitas fisik.
6. Menjelaskan kontribusi relatif dari setiap sistem energi berdasarkan intensitas dan durasi latihan.
7. Menganalisis konsep produksi laktat sebagai produk metabolisme anaerobik dan perannya dalam metabolisme energi.

Pendahuluan

Pernahkah Anda bertanya mengapa jantung seorang atlet maraton dapat berdetak jauh lebih lambat saat istirahat dibandingkan individu nonatlet, namun mampu memompa darah dengan volume luar biasa saat berkompetisi? Atau, bagaimana seorang *sprinter* mampu

menghasilkan ledakan tenaga maksimal dalam hitungan detik, sementara tubuhnya menggunakan sistem energi yang sama sekali berbeda dari pelari jarak jauh? Pertanyaan-pertanyaan ini adalah inti dari eksplorasi dalam fisiologi olahraga, sebuah disiplin ilmu yang mengkaji bagaimana tubuh manusia merespons dan beradaptasi terhadap tekanan aktivitas fisik. Ini bukan sekadar studi tentang atlet elit, melainkan sebuah penelusuran mendalam tentang kapasitas adaptif luar biasa yang dimiliki oleh tubuh manusia.

Fisiologi olahraga berfungsi sebagai jembatan yang menghubungkan antara biologi fundamental dan aplikasi klinis. Ilmu ini membedah mekanisme molekuler, seluler, dan sistemik yang mendasari performa fisik. Bagi tenaga kesehatan, pemahaman ini menjadi krusial. Latihan fisik tidak lagi dipandang sebagai anjuran umum seperti "berolahragalah secara teratur", melainkan sebagai sebuah "resep" presisi yang dosis, intensitas, dan jenisnya harus disesuaikan dengan kondisi fisiologis individu, layaknya meresepkan obat. Dengan memahami respons tubuh, tenaga kesehatan dapat merancang intervensi latihan untuk rehabilitasi cedera, manajemen penyakit kronis seperti diabetes tipe 2, atau meningkatkan kualitas hidup pasien pascaoperasi jantung (De Sire & Taskiran, 2023).

Bab ini akan menjadi fondasi bagi seluruh pembahasan dalam buku ini. Kita akan memulai dengan mendefinisikan secara tegas ruang lingkup fisiologi olahraga dan menelusuri jejak historisnya hingga menjadi pilar dalam kedokteran modern. Pemahaman ini penting untuk mengapresiasi bagaimana disiplin ini berinteraksi dengan ilmu kesehatan lainnya seperti fisioterapi, nutrisi, dan kedokteran preventif. Konsep ini menjadi dasar untuk memahami bagaimana latihan fisik dapat menjadi intervensi yang kuat untuk menjaga kesehatan dan menangani penyakit (Qiu et al., 2022).

Selanjutnya, kita akan menyelami konsep inti dari semua ilmu fisiologi, yaitu homeostasis. Konsep ini merujuk pada pemeliharaan lingkungan internal tubuh yang relatif konstan dan stabil. Latihan fisik, pada dasarnya, adalah sebuah tantangan atau stresor yang mengganggu homeostasis ini. Tubuh kemudian memberikan respons akut untuk mengatasi gangguan tersebut dan, jika tantangan ini diberikan secara berulang, tubuh akan melakukan adaptasi kronis. Adaptasi inilah yang menghasilkan peningkatan kebugaran dan kesehatan.

Kita akan membedah bagaimana tubuh mengatur responsnya melalui mekanisme kontrol umpan balik yang canggih, mirip dengan sistem termostat di sebuah gedung. Pembahasan ini akan membawa kita pada pemahaman tentang *steady state*, sebuah kondisi keseimbangan baru yang dicapai tubuh selama melakukan aktivitas dengan intensitas konstan. Membedakan antara respons sesaat dan perubahan jangka panjang adalah kunci untuk memahami bagaimana program latihan menghasilkan manfaat yang berkelanjutan.

Energi adalah mata uang dari semua aktivitas biologis, dan pergerakan tidak terkecuali. Oleh karena itu, bagian akhir dari bab pengantar ini akan didedikasikan untuk bioenergetika. Kita akan mengurai tiga sistem energi utama yang digunakan tubuh untuk menghasilkan Adenosine Triphosphate (ATP), molekul pembawa energi universal. Mulai dari sistem fosfagen yang menyediakan tenaga instan untuk lompatan atau angkatan berat, glikolisis anaerobik yang menopang aktivitas intensitas tinggi selama beberapa menit, hingga metabolisme oksidatif yang menjadi mesin utama untuk aktivitas ketahanan.

Pemahaman tentang bagaimana sistem-sistem energi ini bekerja secara simultan dan mana yang dominan berdasarkan jenis aktivitas adalah pengetahuan fundamental. Konsep ini tidak hanya relevan untuk atlet, tetapi juga untuk merancang program rehabilitasi.

Misalnya, seorang pasien lansia yang berlatih berdiri dari kursi akan sangat bergantung pada sistem fosfagen, sama seperti seorang atlet angkat besi.

Dengan menyelesaikan bab ini, pembaca akan memiliki kerangka konseptual yang kokoh untuk memahami topik-topik yang lebih kompleks di bab-bab berikutnya. Pengantar ini bukan hanya sekumpulan definisi, melainkan sebuah undangan untuk mengapresiasi keajaiban rekayasa biologis tubuh manusia dan bagaimana kita, sebagai tenaga kesehatan, dapat memanfaatkannya untuk meningkatkan kesehatan dan kesejahteraan.

1.1. Definisi dan Ruang Lingkup Fisiologi Olahraga

Fisiologi olahraga adalah cabang ilmu fisiologi yang secara spesifik mempelajari respons dan adaptasi fungsional tubuh manusia terhadap aktivitas fisik, baik yang bersifat akut (sesaat) maupun kronis (jangka panjang). Secara fundamental, disiplin ini berusaha menjawab pertanyaan "bagaimana" dan "mengapa" tubuh kita berubah ketika dihadapkan pada tantangan pergerakan (Draper et al., 2024). Ruang lingkungannya sangat luas, mencakup investigasi dari level molekuler, seperti ekspresi gen pada serabut otot pasca latihan, hingga level sistemik, seperti perubahan curah jantung selama lari maraton. Ini bukan lagi domain eksklusif untuk peningkatan performa atlet, tetapi telah menjadi komponen integral dari kesehatan preventif dan rehabilitasi klinis (Jones et al., 2024). Tenaga kesehatan memanfaatkan prinsip-prinsip ini untuk meresepkan latihan sebagai intervensi terapeutik dalam menangani berbagai kondisi, mulai dari penyakit metabolik hingga pemulihan pasca bedah.

Ilmu ini berakar pada pemahaman bahwa tubuh manusia adalah sistem yang sangat dinamis dan plastis, mampu beradaptasi secara luar biasa terhadap tuntutan yang diberikan kepadanya. Respons akut mengacu

pada perubahan fisiologis langsung yang terjadi selama satu sesi latihan, seperti peningkatan denyut jantung, laju pernapasan, dan suhu tubuh. Sebaliknya, adaptasi kronis adalah perubahan struktural dan fungsional jangka panjang yang terjadi sebagai hasil dari paparan latihan yang berulang dan teratur (Qiu et al., 2022). Contoh adaptasi kronis yang paling dikenal adalah hipertrofi otot sebagai respons terhadap latihan beban atau penurunan denyut jantung istirahat pada individu yang rutin melakukan latihan aerobik.

Dalam konteks klinis, ruang lingkup fisiologi olahraga meluas ke pemahaman bagaimana aktivitas fisik dapat memodulasi patofisiologi penyakit. Misalnya, bagaimana latihan aerobik dapat meningkatkan sensitivitas insulin pada pasien diabetes tipe 2, atau bagaimana latihan resistensi dapat melawan sarkopenia (kehilangan massa otot) pada populasi lansia (Izquierdo et al., 2024). Dengan demikian, fisiologi olahraga menyediakan dasar ilmiah untuk "Exercise is Medicine", sebuah inisiatif global yang mendorong tenaga kesehatan untuk mengintegrasikan peresapan aktivitas fisik ke dalam praktik klinis rutin (Goldfarb et al., 2025).

Disiplin ini juga mencakup evaluasi kapasitas fungsional, komposisi tubuh, dan parameter fisiologis lainnya untuk merancang program latihan yang personal dan terukur. Ini melibatkan penggunaan berbagai alat dan protokol pengujian, mulai dari tes VO₂ max untuk menilai kebugaran kardiorespirasi hingga analisis dinamometer untuk mengukur kekuatan otot. Pemahaman mendalam tentang fisiologi olahraga memungkinkan praktisi untuk menginterpretasikan hasil tes ini dan menerjemahkannya menjadi rekomendasi latihan yang aman, efektif, dan sesuai dengan tujuan individu, baik itu untuk mencapai podium juara maupun untuk sekadar mampu menaiki tangga tanpa sesak napas.

Peran seorang fisiolog olahraga klinis adalah menggunakan pengetahuan ini untuk mengembangkan intervensi latihan yang menargetkan sistem fisiologis spesifik. Mereka bekerja dengan beragam populasi, termasuk individu dengan penyakit jantung, penyakit paru-paru, kanker, dan kondisi kronis lainnya (Ozemek, 2023). Integrasi antara ilmu dasar dan aplikasi praktis inilah yang mendefinisikan esensi dari fisiologi olahraga terapan.

Hubungan simbiosis antara fisiologi olahraga dan praktik medis terus berkembang, didorong oleh semakin banyaknya bukti yang menunjukkan manfaat latihan fisik. Bidang ini tidak lagi hanya tentang mekanisme kerja otot dan jantung, tetapi juga mencakup interaksi kompleks dengan sistem imun, endokrin, dan saraf. Pemahaman tentang bagaimana latihan mempengaruhi penanda inflamasi sistemik, misalnya, telah membuka jalan baru dalam manajemen penyakit autoimun dan kondisi inflamasi kronis (Walzik et al., 2021).

Sebagai sebuah disiplin ilmu, fisiologi olahraga bersifat interdisipliner. Ia menarik pengetahuan dari biomekanika, biokimia, nutrisi, dan psikologi untuk memberikan pandangan holistik tentang respons manusia terhadap gerakan. Bagi tenaga kesehatan, menguasai prinsip-prinsip fisiologi olahraga berarti memiliki perangkat tambahan yang sangat kuat untuk meningkatkan hasil kesehatan pasien dan mempromosikan gaya hidup aktif sebagai landasan kesejahteraan jangka panjang.

Contoh Kasus: Seorang pasien berusia 65 tahun dengan riwayat diabetes melitus tipe 2 datang ke klinik. Alih-alih hanya menyesuaikan dosis obat, seorang tenaga kesehatan yang memahami fisiologi olahraga akan merancang program jalan cepat selama 30 menit, lima kali seminggu. Secara fisiologis, latihan ini akan meningkatkan pengambilan glukosa oleh otot melalui jalur yang tidak bergantung

pada insulin (translokasi GLUT4) dan dalam jangka panjang, meningkatkan sensitivitas insulin secara keseluruhan. Ini adalah aplikasi langsung dari prinsip fisiologi olahraga dalam manajemen penyakit kronis (Goldfarb et al., 2025).

1.1.1. Peran Fisiologi Olahraga dalam Terapi Kesehatan

Fisiologi olahraga memegang peranan sentral dalam terapi kesehatan modern dengan menyediakan dasar ilmiah untuk peresepan latihan sebagai modalitas pengobatan. Prinsip-prinsipnya memungkinkan tenaga kesehatan untuk merancang program aktivitas fisik yang spesifik guna memodulasi fungsi fisiologis dan mengatasi patofisiologi berbagai penyakit (De Sire & Taskiran, 2023). Sebagai contoh, dalam rehabilitasi jantung, pemahaman tentang adaptasi kardiovaskular terhadap latihan memungkinkan pembuatan protokol yang secara bertahap meningkatkan kapasitas fungsional jantung tanpa memberikan beban berlebih. Latihan yang terstruktur dapat meningkatkan volume sekuncup, efisiensi kontraktilitas miokardium, dan menurunkan denyut jantung istirahat, yang semuanya merupakan penanda prognosis yang lebih baik pada pasien pasca infark miokard (Pristya et al., 2025).

Lebih jauh, dalam manajemen penyakit metabolik seperti diabetes tipe 2, fisiologi olahraga menjelaskan mekanisme seluler bagaimana kontraksi otot selama latihan dapat merangsang translokasi transporter glukosa (GLUT4) ke membran sel, memfasilitasi penyerapan glukosa dari darah secara independen dari insulin (Goldfarb et al., 2025). Efek akut ini, jika dilakukan secara teratur, akan mengarah pada adaptasi kronis berupa peningkatan sensitivitas insulin, yang merupakan target terapi utama. Demikian pula, dalam konteks kesehatan muskuloskeletal, penerapan latihan resistensi untuk mencegah atau mengatasi sarkopenia pada lansia didasarkan pada pemahaman tentang mekanisme sintesis protein otot yang dirangsang oleh beban

mekanis (Izquierdo et al., 2024). Peran ini mengukuhkan posisi fisiologi olahraga sebagai ilmu esensial dalam praktik klinis yang berorientasi pada gaya hidup dan pencegahan.

1.1.2. Sejarah dan Perkembangan Ilmu Kedokteran Olahraga

Ilmu kedokteran olahraga, dengan fisiologi olahraga sebagai salah satu pilar utamanya, memiliki akar sejarah yang dapat ditelusuri kembali ke peradaban Yunani kuno, di mana dokter seperti Herodicus dan Galen mengamati efek latihan pada kesehatan dan performa para atlet Olimpiade. Namun, perkembangannya sebagai disiplin ilmiah modern dimulai pada akhir abad ke-19 dan awal abad ke-20 di Eropa dan Amerika Utara (Draper et al., 2024). Laboratorium seperti Harvard Fatigue Laboratory yang didirikan pada tahun 1927 menjadi titik penting, di mana para ilmuwan mulai secara sistematis mempelajari respons fisiologis manusia terhadap stres lingkungan dan latihan. Penelitian-penelitian awal ini meletakkan dasar bagi pemahaman kita tentang metabolisme, fungsi kardiorespirasi, dan termoregulasi selama aktivitas fisik.

Pada pertengahan abad ke-20, fokus mulai bergeser dari sekadar performa atletik ke aplikasi kesehatan yang lebih luas, sebagian didorong oleh studi epidemiologis yang menghubungkan gaya hidup sedentari dengan peningkatan risiko penyakit jantung koroner. Perkembangan teknologi, seperti elektrokardiogram (EKG) dan metode pengukuran konsumsi oksigen, memungkinkan investigasi yang lebih canggih terhadap respons tubuh saat berolahraga. Dalam beberapa dekade terakhir, kemajuan dalam biologi molekuler telah merevolusi bidang ini, memungkinkan para peneliti untuk mempelajari adaptasi pada tingkat genetik dan seluler (Qiu et al., 2022). Saat ini, fisiologi olahraga telah berkembang menjadi sebuah profesi kesehatan yang diakui di banyak negara, dengan program

sertifikasi dan regulasi profesional untuk memastikan praktik yang aman dan berbasis bukti (Jones et al., 2024).

1.1.3. Hubungan Fisiologi Olahraga dengan Ilmu Kesehatan Terapan

Fisiologi olahraga memiliki hubungan simbiosis yang erat dengan berbagai disiplin ilmu kesehatan terapan lainnya, berfungsi sebagai fondasi ilmiah yang mendasari banyak intervensi klinis. Dalam fisioterapi, misalnya, prinsip-prinsip adaptasi otot, kontrol neuromuskular, dan pemulihan jaringan yang dipelajari dalam fisiologi olahraga menjadi dasar untuk merancang program rehabilitasi cedera (Sjøgaard et al., 2021). Seorang fisioterapis menggunakan pengetahuan tentang tipe serabut otot dan mekanisme hipertrofi untuk meresepkan latihan yang paling efektif untuk mengembalikan kekuatan dan fungsi setelah imobilisasi. Demikian pula, pemahaman tentang bioenergetika dan metabolisme substrat sangat penting bagi ahli gizi olahraga dalam merancang strategi nutrisi untuk mengoptimalkan performa dan mempercepat pemulihan.

Hubungan ini juga sangat kuat dengan bidang keperawatan dan kedokteran umum, di mana promosi aktivitas fisik menjadi bagian standar dari perawatan preventif dan manajemen penyakit kronis (Cunningham & O'Sullivan, 2021). Seorang perawat yang mengedukasi pasien hipertensi tentang manfaat jalan kaki secara teratur mendasarkan rekomendasinya pada prinsip fisiologis bahwa latihan aerobik dapat menurunkan tekanan darah melalui mekanisme seperti peningkatan vasodilatasi dan penurunan aktivitas sistem saraf simpatis. Selain itu, fisiologi olahraga beririsan dengan biomekanika untuk menganalisis efisiensi gerakan dan mencegah cedera, serta dengan psikologi olahraga untuk memahami faktor-faktor seperti motivasi dan kelelahan sentral (Wang et al., 2025). Integrasi

multidisiplin ini memastikan pendekatan yang holistik dan komprehensif terhadap kesehatan dan performa manusia.

1.2. Konsep Homeostasis dan Respon Adaptasi

Konsep homeostasis adalah salah satu prinsip pemersatu dalam fisiologi, yang pertama kali diperkenalkan oleh Claude Bernard dan kemudian dinamai oleh Walter Cannon. Homeostasis merujuk pada pemeliharaan lingkungan internal tubuh yang relatif stabil dan konstan, meskipun terjadi perubahan pada lingkungan eksternal (Draper et al., 2024). Variabel fisiologis seperti suhu tubuh, pH darah, tekanan darah, dan konsentrasi glukosa dijaga dalam rentang normal yang sempit melalui serangkaian mekanisme pengaturan yang kompleks. Latihan fisik merupakan salah satu tantangan paling signifikan terhadap homeostasis. Peningkatan aktivitas metabolik selama olahraga secara drastis meningkatkan produksi panas, mengonsumsi substrat energi, menghasilkan produk sampingan metabolik seperti ion hidrogen, dan menempatkan tuntutan besar pada sistem kardiovaskular dan pernapasan.

Tubuh merespons gangguan homeostasis ini melalui dua jenis respons utama, yaitu respons akut dan adaptasi kronis. Respons akut adalah perubahan fisiologis yang terjadi secara langsung dan bersifat sementara selama satu sesi latihan. Misalnya, saat mulai berlari, denyut jantung dan laju pernapasan segera meningkat untuk mengirimkan lebih banyak oksigen ke otot yang bekerja, dan pembuluh darah di otot tersebut melebar (vasodilatasi) untuk meningkatkan aliran darah (Qiu et al., 2022). Respons-respons ini bertujuan untuk memenuhi tuntutan metabolik yang meningkat dan membatasi sejauh mana variabel fisiologis menyimpang dari nilai istirahatnya.

Jika latihan dilakukan secara teratur dalam periode waktu yang lama (minggu hingga bulan), tubuh akan mengalami adaptasi kronis. Ini adalah perubahan struktural dan fungsional yang lebih permanen yang membuat tubuh lebih mampu menangani stres dari sesi latihan berikutnya (Sjøgaard et al., 2021). Sebagai contoh, setelah beberapa bulan latihan aerobik, jantung menjadi lebih kuat dan volume plasma darah meningkat, sehingga jantung dapat memompa lebih banyak darah per detak (peningkatan volume sekuncup). Akibatnya, untuk tingkat kerja yang sama, jantung tidak perlu berdetak secepat sebelumnya, yang tercermin dalam penurunan denyut jantung saat istirahat dan saat latihan submaksimal.

Adaptasi kronis pada dasarnya adalah pergeseran dalam kapasitas sistem fisiologis, yang memungkinkan tubuh untuk mempertahankan homeostasis dengan lebih mudah selama latihan. Prinsip ini, yang dikenal sebagai prinsip *overload* atau beban berlebih, menyatakan bahwa untuk memicu adaptasi, sistem fisiologis harus ditantang melebihi tingkat yang biasa dihadapinya. Proses adaptasi ini sangat spesifik, sesuai dengan jenis latihan yang dilakukan (*principle of specificity*). Latihan ketahanan akan menghasilkan adaptasi kardiovaskular dan mitokondria, sementara latihan beban akan menghasilkan adaptasi neuromuskular dan hipertrofi otot.

Dalam konteks yang lebih luas, beberapa ilmuwan lebih memilih istilah *homeorhesis* untuk menggambarkan adaptasi jangka panjang. *Homeorhesis* merujuk pada proses koordinasi metabolisme untuk mendukung keadaan fisiologis yang dominan. Sementara homeostasis berfokus pada pemeliharaan keadaan konstan, *homeorhesis* menggambarkan perubahan prioritas fisiologis yang dinamis dan terkoordinasi dari waktu ke waktu, seperti yang terjadi selama pertumbuhan, kehamilan, atau adaptasi terhadap latihan kronis.

Konsep lain yang terkait erat adalah *steady state* atau keadaan tunak. *Steady state* adalah kondisi di mana variabel fisiologis tertentu telah mencapai tingkat baru yang konstan dan stabil untuk memenuhi tuntutan dari situasi tertentu, seperti latihan dengan intensitas submaksimal yang konstan. Misalnya, setelah beberapa menit jogging dengan kecepatan tetap, konsumsi oksigen, denyut jantung, dan produksi panas akan mencapai dataran tinggi (*plateau*) dan tetap relatif stabil selama sisa latihan (Draper et al., 2024). Penting untuk dicatat bahwa *steady state* bukanlah homeostasis, karena variabel-variabel tersebut stabil pada tingkat yang lebih tinggi dari kondisi istirahat.

Pemahaman tentang perbedaan antara homeostasis, *steady state*, respons akut, dan adaptasi kronis sangat fundamental bagi tenaga kesehatan. Hal ini memungkinkan mereka untuk membedakan antara respons normal terhadap latihan dan tanda-tanda patologis, untuk menetapkan tujuan yang realistis bagi pasien, dan untuk memahami dasar mengapa latihan teratur menghasilkan manfaat kesehatan jangka panjang. Program latihan yang efektif pada dasarnya adalah program yang secara sistematis dan progresif mengganggu homeostasis untuk merangsang adaptasi kronis yang diinginkan.

Analogi: Bayangkan homeostasis sebagai suhu ideal (misalnya 22°C) yang diatur oleh termostat di sebuah rumah. Latihan fisik adalah seperti membuka semua jendela di musim dingin; ini adalah gangguan besar yang menyebabkan suhu internal turun drastis. Respons akut adalah termostat yang segera menyalakan pemanas (peningkatan denyut jantung, metabolisme) dengan kekuatan penuh untuk melawan penurunan suhu. *Steady state* tercapai ketika pemanas bekerja pada tingkat yang stabil dan tinggi, yang cukup untuk menjaga suhu rumah tetap konstan pada tingkat yang lebih dingin (misalnya 18°C) selama jendela masih terbuka. Adaptasi kronis terjadi jika Anda melakukan ini setiap hari; Anda mungkin akan memutuskan untuk meng-upgrade

sistem pemanas Anda atau memasang insulasi yang lebih baik (jantung yang lebih kuat, lebih banyak mitokondria). Hasilnya, di lain waktu Anda membuka jendela, suhu rumah tidak akan turun sedrastis sebelumnya, dan pemanas tidak perlu bekerja sekeras itu untuk mempertahankan suhu.

1.2.1. Mekanisme Kontrol Umpan Balik Selama Latihan

Tubuh mempertahankan homeostasis melalui sistem kontrol umpan balik, yang sebagian besar beroperasi melalui umpan balik negatif (*negative feedback*). Sistem ini bekerja seperti termostat dan terdiri dari tiga komponen utama: sebuah sensor (atau reseptor) yang mendeteksi perubahan dalam variabel internal, sebuah pusat kontrol (seringkali di otak) yang membandingkan nilai yang terdeteksi dengan nilai set point, dan sebuah efektor yang menghasilkan respons untuk mengembalikan variabel tersebut ke nilai set point (Draper et al., 2024). Selama latihan, misalnya, termoreseptor di kulit dan inti tubuh (sensor) mendeteksi peningkatan suhu tubuh. Informasi ini dikirim ke hipotalamus (pusat kontrol), yang kemudian memicu respons dari kelenjar keringat (efektor) untuk memulai produksi keringat dan dari pembuluh darah kulit untuk melebar, sehingga memfasilitasi pelepasan panas dan mendinginkan tubuh.

Mekanisme umpan balik negatif ini sangat penting untuk mengatur hampir semua variabel fisiologis selama latihan, termasuk tekanan darah, konsentrasi oksigen dan karbon dioksida dalam darah, serta pH. Sebagai contoh lain, ketika latihan menyebabkan penurunan tekanan darah, baroreseptor (sensor tekanan) di arteri karotis dan aorta mengirim sinyal ke pusat kardiovaskular di medula oblongata (pusat kontrol). Pusat ini kemudian meningkatkan aktivitas saraf simpatis ke jantung dan pembuluh darah (efektor), yang menyebabkan peningkatan denyut jantung dan vasokonstriksi untuk menaikkan kembali tekanan darah (Qiu et al., 2022). Keakuratan dan kecepatan

sistem kontrol umpan balik ini menentukan kemampuan seseorang untuk mentolerir stres fisiologis akibat latihan.

1.2.2. Perbedaan Respon Akut dan Adaptasi Kronis

Perbedaan antara respons akut dan adaptasi kronis adalah inti dari fisiologi olahraga. Respons akut adalah perubahan fisiologis yang langsung terjadi selama atau segera setelah satu sesi latihan dan bersifat sementara (Sjøgaard et al., 2021). Contohnya termasuk peningkatan denyut jantung dari 70 menjadi 150 denyut per menit selama berlari, peningkatan laju pernapasan, berkeringat, dan kemerahan pada kulit akibat vasodilatasi. Respons ini adalah cara tubuh mengatasi tantangan homeostatik langsung yang ditimbulkan oleh latihan. Setelah latihan berhenti, variabel-variabel ini secara bertahap kembali ke tingkat istirahat. Respons akut pada dasarnya adalah manifestasi dari sistem kontrol umpan balik yang bekerja untuk membatasi gangguan terhadap homeostasis.

Di sisi lain, adaptasi kronis adalah perubahan struktural dan fungsional jangka panjang yang terjadi sebagai respons terhadap stres latihan yang berulang selama berminggu-minggu atau berbulan-bulan (Draper et al., 2024). Setiap sesi latihan yang memicu respons akut berfungsi sebagai stimulus yang, jika diulang, akan memicu perubahan adaptif. Contoh adaptasi kronis termasuk peningkatan ukuran dan kekuatan jantung (*athletic heart*), peningkatan jumlah kapiler yang mengelilingi serabut otot, peningkatan jumlah dan ukuran mitokondria, dan penguatan tulang dan jaringan ikat. Adaptasi ini membuat tubuh lebih efisien dalam merespons latihan di masa depan. Sebagai contoh, denyut jantung istirahat seorang atlet ketahanan bisa jauh lebih rendah (misalnya, 40 denyut per menit) dibandingkan individu yang tidak terlatih karena jantungnya yang telah beradaptasi dapat memompa lebih banyak darah per detak.

1.2.3. Konsep Steady State dalam Aktivitas Fisik

Steady state atau keadaan tunak adalah sebuah konsep penting yang menggambarkan keseimbangan fisiologis yang dicapai selama latihan dengan intensitas konstan dan submaksimal. Ini adalah kondisi di mana permintaan tubuh akan energi dipenuhi oleh proses metabolisme aerobik, dan variabel-variabel fisiologis seperti denyut jantung, konsumsi oksigen (VO₂), dan curah jantung mencapai tingkat yang stabil atau *plateau* (Draper et al., 2024). Penting untuk membedakan *steady state* dari homeostasis. Homeostasis adalah kondisi istirahat, sedangkan *steady state* adalah keseimbangan yang dicapai pada tingkat fisiologis yang lebih tinggi untuk memenuhi tuntutan aktivitas yang sedang berlangsung. Sebagai contoh, denyut jantung 130 denyut per menit mungkin merupakan *steady state* selama jogging, tetapi jelas bukan merupakan keadaan homeostasis.

Pencapaian *steady state* menunjukkan bahwa sistem kardiorespirasi mampu memasok oksigen ke otot yang bekerja pada laju yang setara dengan laju konsumsinya. Pada awal latihan, terdapat defisit oksigen karena sistem metabolisme aerobik membutuhkan waktu untuk aktif sepenuhnya, sehingga energi sebagian dipasok secara anaerobik. Setelah beberapa menit (biasanya 2-3 menit), pasokan oksigen menyamai permintaan, dan *steady state* tercapai (Qiu et al., 2022). Kemampuan untuk mencapai *steady state* dengan cepat dan mempertahankannya pada intensitas yang lebih tinggi adalah salah satu ciri individu yang memiliki kebugaran aerobik yang baik. Latihan di atas ambang laktat, di mana produksi laktat melebihi kemampuan tubuh untuk membersihkannya, mencegah pencapaian *steady state* yang sebenarnya, yang menyebabkan kelelahan yang cepat.

1.3. Bioenergetika dalam Aktivitas Fisik

Bioenergetika adalah studi tentang bagaimana energi diubah dan digunakan oleh sistem biologis. Dalam konteks fisiologi olahraga, bioenergetika berfokus pada proses konversi energi kimia dari makanan (karbohidrat, lemak, dan protein) menjadi energi mekanik (kontraksi otot). Mata uang energi universal dalam sel adalah molekul yang disebut Adenosine Triphosphate (ATP). Energi dilepaskan ketika salah satu ikatan fosfat berenergi tinggi pada ATP dipecah oleh enzim, mengubah ATP menjadi Adenosine Diphosphate (ADP) dan fosfat anorganik (Pi). Namun, simpanan ATP dalam otot sangat terbatas, hanya cukup untuk mendukung kontraksi maksimal selama beberapa detik. Oleh karena itu, agar aktivitas fisik dapat berlanjut, ATP harus terus-menerus disintesis ulang (Draper et al., 2024).

Tubuh manusia memiliki tiga sistem energi utama untuk mensintesis ulang ATP, yang bekerja secara simultan tetapi dengan kontribusi yang bervariasi tergantung pada intensitas dan durasi aktivitas. Ketiga sistem tersebut adalah: (1) Sistem Fosfagen (ATP-PC), (2) Glikolisis Anaerobik, dan (3) Metabolisme Oksidatif (Aerobik). Sistem-sistem ini dapat dilihat sebagai sebuah kontinum. Aktivitas yang sangat singkat dan eksplosif seperti lemparan atau lompatan hampir secara eksklusif ditenagai oleh sistem fosfagen. Aktivitas berintensitas tinggi yang berlangsung dari 15 detik hingga sekitar 2 menit, seperti lari cepat 400 meter, sangat bergantung pada glikolisis anaerobik. Aktivitas berdurasi lebih lama, mulai dari beberapa menit hingga berjam-jam, seperti lari jarak jauh atau bersepeda, didominasi oleh metabolisme oksidatif (Qiu et al., 2022).

Sistem fosfagen menyediakan energi paling cepat karena hanya melibatkan satu reaksi kimia dan tidak memerlukan oksigen. Sistem ini menggunakan simpanan fosfokreatin (PCr) di dalam otot untuk secara instan meregenerasi ATP dari ADP. Namun, simpanan PCr

juga sangat terbatas, sehingga sistem ini hanya dapat menopang upaya maksimal selama sekitar 10-15 detik.

Ketika aktivitas berlanjut melampaui kapasitas sistem fosfagen, glikolisis anaerobik mengambil alih sebagai pemasok ATP utama. Sistem ini memecah glukosa atau glikogen otot menjadi piruvat tanpa memerlukan oksigen. Proses ini menghasilkan ATP lebih cepat daripada metabolisme oksidatif tetapi lebih lambat dari sistem fosfagen. Produk akhir dari glikolisis anaerobik adalah piruvat, yang kemudian dapat diubah menjadi laktat. Penumpukan laktat dan ion hidrogen terkait sering dikaitkan dengan kelelahan otot selama latihan intensitas tinggi.

Sistem energi ketiga dan yang paling kompleks adalah metabolisme oksidatif. Proses ini terjadi di dalam mitokondria dan dapat menggunakan karbohidrat, lemak, dan bahkan protein sebagai bahan bakar untuk menghasilkan ATP dalam jumlah besar. Meskipun menghasilkan ATP dalam jumlah yang jauh lebih banyak dibandingkan dua sistem lainnya, proses ini relatif lambat dan sangat bergantung pada pasokan oksigen yang cukup ke otot. Metabolisme oksidatif melibatkan dua proses utama: Siklus Krebs (juga dikenal sebagai siklus asam sitrat) dan Rantai Transpor Elektron.

Interaksi antara ketiga sistem energi ini sangat penting untuk dipahami oleh tenaga kesehatan. Pemahaman ini memungkinkan perancangan program latihan yang menargetkan sistem energi spesifik untuk mencapai tujuan tertentu, baik itu peningkatan kekuatan, kecepatan, atau daya tahan. Selain itu, pengetahuan tentang metabolisme substrat (penggunaan karbohidrat vs. lemak) pada berbagai intensitas latihan menjadi dasar untuk rekomendasi nutrisi olahraga yang efektif.

Analogi: Bayangkan tiga sistem energi ini seperti cara Anda membayar untuk berbagai jenis pembelian. Sistem Fosfagen (ATP-PC) adalah seperti menggunakan uang tunai di saku Anda: sangat cepat dan langsung untuk pembelian kecil dan mendesak (seperti membeli permen), tetapi jumlahnya sangat terbatas. Glikolisis Anaerobik adalah seperti menggunakan kartu debit: cepat, dapat diakses untuk pembelian yang lebih besar (seperti belanja mingguan), tetapi pada akhirnya akan menguras saldo di rekening giro Anda. Metabolisme Oksidatif adalah seperti menggunakan kartu kredit dengan batas tinggi atau mengakses dana investasi: prosesnya sedikit lebih lambat (memerlukan persetujuan dan transaksi), tetapi dapat mendanai pengeluaran yang sangat besar dan berkelanjutan (seperti membeli mobil atau rumah) karena cadangannya hampir tidak terbatas.

1.3.1. Jalur Energi Fosfagen (ATP-PC)

Jalur energi fosfagen, juga dikenal sebagai sistem ATP-PCr (Adenosine Triphosphate-Phosphocreatine), adalah sumber energi yang paling cepat dan paling sederhana untuk meregenerasi ATP di dalam otot. Sistem ini bersifat anaerobik, artinya tidak memerlukan oksigen. Sistem ini bergantung pada reaksi tunggal yang dikatalisis oleh enzim kreatin kinase, di mana gugus fosfat dari fosfokreatin (PCr) disumbangkan ke ADP untuk membentuk ATP kembali: $PCr + ADP \leftrightarrow ATP + Kreatin$ (Draper et al., 2024). Reaksi ini terjadi hampir secara instan di sitoplasma sel otot, menyediakan energi untuk aktivitas yang sangat singkat, eksplosif, dan berintensitas maksimal, seperti lari cepat 100 meter, angkat berat, atau lompat tinggi.

Meskipun sangat cepat, kapasitas sistem fosfagen sangat terbatas. Simpanan PCr di otot hanya cukup untuk menopang upaya maksimal selama sekitar 10 hingga 15 detik. Setelah itu, simpanan PCr akan menipis secara signifikan, dan laju produksi ATP dari sistem ini akan

menurun drastis, memaksa intensitas aktivitas untuk berkurang (Qiu et al., 2022). Pemulihan simpanan PCr terjadi dengan cepat selama periode istirahat, dengan sekitar 70% dipulihkan dalam 30 detik dan pemulihan penuh terjadi dalam beberapa menit, yang menjelaskan mengapa atlet dalam olahraga kekuatan dan kecepatan dapat melakukan upaya maksimal berulang kali dengan periode istirahat singkat di antaranya.

1.3.2. Jalur Glikolisis Anaerobik dan Produksi Laktat

Ketika aktivitas berintensitas tinggi berlanjut lebih dari 10-15 detik, jalur glikolisis anaerobik menjadi sumber ATP yang dominan. Glikolisis adalah proses pemecahan glukosa (dari darah) atau glikogen (simpanan karbohidrat di otot dan hati) menjadi piruvat, yang terjadi di sitoplasma sel (Draper et al., 2024). Proses ini terdiri dari serangkaian 10 reaksi enzimatik dan menghasilkan 2 ATP bersih per molekul glukosa atau 3 ATP bersih per unit glukosa dari glikogen. Jalur ini dapat menghasilkan ATP dengan laju yang lebih cepat daripada metabolisme oksidatif, sehingga mampu mendukung aktivitas intensitas tinggi seperti lari 400 meter atau sesi latihan interval.

Ketika laju produksi piruvat melebihi kapasitas mitokondria untuk menggunakannya melalui metabolisme oksidatif (biasanya karena permintaan energi yang sangat tinggi atau pasokan oksigen yang tidak mencukupi), piruvat akan menerima ion hidrogen dan diubah menjadi laktat oleh enzim laktat dehidrogenase. Bertentangan dengan kepercayaan lama, laktat itu sendiri bukanlah penyebab langsung dari kelelahan otot atau nyeri otot pasca-latihan (DOMS). Sebaliknya, produksi laktat sebenarnya menunda kelelahan dengan meregenerasi NAD⁺, sebuah koenzim penting yang memungkinkan glikolisis untuk terus berlanjut (Qiu et al., 2022). Laktat yang diproduksi juga dapat diangkut keluar dari otot dan digunakan sebagai bahan bakar oleh

jaringan lain, seperti jantung, atau diubah kembali menjadi glukosa di hati melalui Siklus Cori.

1.3.3. Metabolisme Oksidatif dan Siklus Krebs

Metabolisme oksidatif, atau respirasi seluler aerobik, adalah jalur produksi ATP utama selama istirahat dan selama aktivitas ketahanan berintensitas rendah hingga sedang. Proses ini terjadi di dalam mitokondria dan dapat menggunakan karbohidrat, lemak, dan protein sebagai bahan bakar. Proses ini sangat efisien, menghasilkan sekitar 32-33 ATP per molekul glukosa, dan lebih banyak lagi dari satu molekul asam lemak (Draper et al., 2024). Namun, proses ini relatif lambat dan sangat bergantung pada ketersediaan oksigen sebagai akseptor elektron terakhir.

Metabolisme oksidatif terdiri dari tiga tahap utama. Tahap pertama adalah pembentukan Asetil-KoA dari piruvat (yang berasal dari glikolisis) atau dari oksidasi beta asam lemak. Tahap kedua adalah Siklus Krebs (atau siklus asam sitrat), di mana Asetil-KoA dioksidasi sepenuhnya. Siklus ini tidak menghasilkan banyak ATP secara langsung, tetapi fungsi utamanya adalah untuk menghasilkan molekul pembawa elektron berenergi tinggi (NADH dan FADH₂) (Qiu et al., 2022). Tahap ketiga adalah Rantai Transpor Elektron dan Fosforilasi Oksidatif, di mana energi dari NADH dan FADH₂ digunakan untuk memompa proton melintasi membran mitokondria dalam, menciptakan gradien elektrokimia. Energi yang tersimpan dalam gradien ini kemudian digunakan oleh ATP sintase untuk menghasilkan sejumlah besar ATP. Kemampuan tubuh untuk menghasilkan ATP melalui jalur ini merupakan penentu utama kapasitas daya tahan aerobik seseorang.

Rangkuman Bab

- Fisiologi olahraga adalah studi tentang respons akut dan adaptasi kronis tubuh terhadap latihan, dengan aplikasi klinis yang luas dalam terapi dan pencegahan penyakit.
- Homeostasis adalah pemeliharaan lingkungan internal yang stabil, yang diganggu oleh latihan. Latihan teratur memicu adaptasi kronis yang meningkatkan kemampuan tubuh untuk mempertahankan homeostasis selama stres fisik.
- *Steady state* adalah kondisi keseimbangan baru yang dicapai selama latihan submaksimal, berbeda dari homeostasis yang merupakan kondisi istirahat.
- Tubuh menggunakan sistem kontrol umpan balik negatif untuk mengatur variabel fisiologis seperti suhu dan tekanan darah selama latihan.
- Bioenergetika menjelaskan bagaimana tubuh meregenerasi ATP melalui tiga sistem utama: sistem fosfagen (ATP-PC), glikolisis anaerobik, dan metabolisme oksidatif.
- Sistem Fosfagen menyediakan energi instan untuk aktivitas eksplosif (<15 detik).
- Glikolisis Anaerobik mendominasi aktivitas intensitas tinggi yang berlangsung hingga 2 menit dan menghasilkan laktat.
- Metabolisme Oksidatif adalah sumber energi utama untuk aktivitas ketahanan jangka panjang dan menghasilkan ATP dalam jumlah terbesar dengan adanya oksigen.
- Kontribusi setiap sistem energi bervariasi tergantung pada intensitas dan durasi aktivitas fisik.

Soal Esai

1. Jelaskan perbedaan fundamental antara respons akut dan adaptasi kronis terhadap latihan aerobik. Berikan masing-masing dua contoh spesifik pada sistem kardiovaskular.
2. Gambarkan bagaimana mekanisme kontrol umpan balik negatif bekerja untuk mengatur suhu tubuh selama sesi latihan bersepeda selama 30 menit di lingkungan yang hangat. Identifikasi sensor, pusat kontrol, dan efektor yang terlibat.
3. Bandingkan dan kontraskan tiga sistem energi utama (fosfagen, glikolisis anaerobik, dan metabolisme oksidatif) dalam hal laju produksi ATP, kapasitas total produksi ATP, dan jenis aktivitas yang didominasi oleh masing-masing sistem.
4. Seorang pasien bertanya mengapa mereka merasa "kehabisan napas" dan ototnya "terbakar" selama latihan intensitas tinggi. Jelaskan konsep ambang laktat dan perannya dalam fenomena ini dari sudut pandang bioenergetika.
5. Definisikan konsep homeostasis dan *steady state*. Gunakan contoh seorang individu yang berjalan di atas *treadmill* dengan kecepatan konstan selama 20 menit untuk menjelaskan kapan individu tersebut berada dalam kondisi homeostasis dan kapan ia mencapai *steady state*.

Soal Pilihan Ganda

1. Perubahan fisiologis jangka panjang yang terjadi sebagai respons terhadap latihan yang teratur disebut...
 - A. Respons akut
 - B. Homeostasis
 - C. Adaptasi kronis -V-
 - D. Steady state

2. Sistem energi manakah yang menjadi sumber ATP utama selama aktivitas lari cepat 100 meter?
 - A. Glikolisis aerobik
 - B. Metabolisme oksidatif
 - C. Sistem fosfagen (ATP-PC) -V-
 - D. Siklus Krebs

3. Pusat kontrol utama untuk regulasi suhu tubuh terletak di...
 - A. Korteks serebral
 - B. Medula oblongata
 - C. Hipotalamus -V-
 - D. Serebelum

4. Berikut ini yang merupakan contoh dari respons akut terhadap latihan adalah...
 - A. Penurunan denyut jantung istirahat
 - B. Peningkatan ukuran jantung
 - C. Peningkatan laju pernapasan selama berlari -V-
 - D. Peningkatan kepadatan mitokondria di otot

5. Proses pemecahan glukosa menjadi piruvat tanpa kehadiran oksigen disebut...
 - A. Fosforilasi oksidatif
 - B. Glikolisis anaerobik -V-
 - C. Siklus Cori
 - D. Oksidasi beta

6. Produk akhir dari glikolisis anaerobik yang dapat terakumulasi selama latihan intensitas tinggi adalah...
 - A. Asetil-KoA
 - B. Kreatin
 - C. Laktat -V-
 - D. Oksigen

7. Proses metabolisme oksidatif untuk produksi ATP terjadi di dalam...
 - A. Nukleus
 - B. Sitoplasma
 - C. Ribosom
 - D. Mitokondria -V-

8. Seorang individu yang berjoging dengan kecepatan konstan selama 30 menit kemungkinan besar berada dalam kondisi...
 - A. Homeostasis
 - B. Steady state -V-
 - C. Defisit oksigen maksimal
 - D. Kelelahan total

9. Manakah dari berikut ini yang BUKAN merupakan komponen dari sistem kontrol umpan balik biologis?
 - A. Sensor
 - B. Pusat kontrol
 - C. Efektor
 - D. Stimulus eksternal -V-

10. Sistem energi yang memiliki kapasitas terbesar untuk menghasilkan ATP, meskipun dengan laju yang paling lambat, adalah...
 - A. Sistem fosfagen
 - B. Glikolisis cepat
 - C. Glikolisis lambat
 - D. Metabolisme oksidatif -V-

Studi Kasus atau Tugas Kontekstual

1. Seorang fisioterapis sedang merancang program rehabilitasi untuk seorang atlet bola basket yang pulih dari cedera pergelangan kaki. Program ini mencakup latihan untuk meningkatkan kemampuan melompat vertikal (untuk *rebound*) dan kemampuan untuk berlari bolak-balik di lapangan selama pertandingan. Analisislah kedua jenis aktivitas tersebut (melompat vertikal vs. berlari bolak-balik) dari segi sistem energi dominan yang digunakan. Berikan justifikasi mengapa pemahaman bioenergetika ini penting bagi fisioterapis dalam merancang interval kerja dan istirahat yang tepat untuk atlet tersebut.

Glosarium Bab

- ***Adenosine Triphosphate (ATP)***: Molekul berenergi tinggi yang berfungsi sebagai sumber energi langsung untuk hampir semua proses seluler, termasuk kontraksi otot.
- ***Adaptasi Kronis***: Perubahan struktural dan fungsional jangka panjang dalam tubuh yang terjadi sebagai respons terhadap stres latihan yang berulang.
- ***Bioenergetika***: Studi tentang transformasi energi dalam sistem kehidupan, khususnya konversi energi dari makanan menjadi energi yang dapat digunakan secara biologis.
- ***Glikolisis***: Jalur metabolik yang memecah glukosa menjadi piruvat, menghasilkan ATP. Dapat terjadi secara anaerobik (tanpa oksigen) atau menjadi langkah awal untuk metabolisme aerobik.
- ***Homeostasis***: Pemeliharaan kondisi lingkungan internal tubuh yang relatif konstan dan normal selama istirahat.
- ***Metabolisme Oksidatif***: Proses produksi ATP yang terjadi di mitokondria dengan adanya oksigen, menggunakan karbohidrat, lemak, dan protein sebagai bahan bakar.
- ***Respon Akut***: Perubahan fisiologis yang segera terjadi dan bersifat sementara selama satu sesi aktivitas fisik.
- ***Siklus Krebs***: Serangkaian reaksi kimia di dalam mitokondria yang melengkapi oksidasi Asetil-KoA, menghasilkan ATP dan molekul pembawa elektron (NADH dan FADH₂).
- ***Sistem Fosfagen (ATP-PC)***: Sistem energi anaerobik yang meregenerasi ATP secara cepat dari fosfokreatin (PCr).
- ***Steady State***: Suatu kondisi keseimbangan yang dicapai selama latihan intensitas konstan di mana variabel fisiologis stabil pada tingkat di atas nilai istirahat.

Daftar Pustaka Bab

- Cunningham, C., & O'Sullivan, R. (2021). Healthcare Professionals' Application and Integration of Physical Activity in Routine Practice with Older Adults: A Qualitative Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111222>
- De Sire, A., & Taskiran, O. (2023). Physical Exercise in Sports Sciences and Rehabilitation: Physiology, Clinical Applications and Real Practice. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app13084868>
- Draper, N., Williams, C., & Marshall, H. (2024). *Exercise Physiology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003109280>
- Goldfarb, I., Giladi, A., Barak, S., Lev, I., & Dor-Haim, H. (2025). Physical activity as clinical practice care for patients with type 2 diabetics and its implementation in routine clinical care: an expert opinion survey. *Frontiers in Endocrinology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fendo.2025.1518285>
- Izquierdo, M., De Souto Barreto, P., Arai, H., Bischoff-Ferrari, H., Cadore, E., Cesari, M., Chen, L., Coen, P., Courneya, K., Duque, G., Ferrucci, L., Fielding, R., García-Hermoso, A., Gutiérrez-Robledo, L., Harridge, S., Kirk, B., Kritchevsky, S., Landi, F., Lazarus, N., Liu-Ambrose, T., Marzetti, E., Merchant, R., Morley, J., Pitkälä, K., Ramírez-Vélez, R., Rodríguez-Mañas, L., Rolland, Y., Ruiz, J., De Asteasu, M., Villareal, D., Waters, D., Won, C., Vellas, B., & Singh, M. (2024). Global consensus on optimal exercise recommendations for enhancing healthy longevity in older adults (ICFSR). *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.jnha.2024.100401>
- Jones, H., Crozier, A., George, K., Miller, G., Whyte, G., Rycroft, J., Scott, A., Buckley, J., McGregor, G., Askew, C.,

- Jack, S., Birkett, S., Broom, D., Tolfrey, K., Campbell, A., Skelton, D., Steenkamp, L., Savage, J., & Green, D. (2024). Establishment of clinical exercise physiology as a regulated healthcare profession in the UK: a progress report. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 10. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2024-002033>
- Ozemek, C. (2023). Creating the First Professional Doctor of Clinical Exercise Physiology Program and a Call to Expand the Model. *Journal of Clinical Exercise Physiology*. <https://doi.org/10.31189/2165-6193-12.1.1>
 - Pristya, I., Nurachmah, E., & Maria, R. (2025). Efek mobilisasi dini pada peningkatan fungsi fisik pasien post coronary artery bypass graft (CABG): a systematic literature review. *Holistik Jurnal Kesehatan*. <https://doi.org/10.33024/hjk.v19i1.791>
 - Qiu, Y., Fernández-García, B., Lehmann, I., Li, G., Kroemer, G., López-Otín, C., & Xiao, J. (2022). Exercise sustains the hallmarks of health. *Journal of Sport and Health Science*, 12(3), 8-35. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2022.10.003>
 - Sjøgaard, G., Mann, S., Jensen, J., Oestergaard, A., & Dalager, T. (2021). The elixir of muscle activity and kinesiology in a health perspective: Evidence of worksite tailored exercise training alleviating muscle disorders. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 61, 102600. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2021.102600>
 - Walzik, D., Joisten, N., Zacher, J., & Zimmer, P. (2021). Transferring clinically established immune inflammation markers into exercise physiology: focus on neutrophil-to-lymphocyte ratio, platelet-to-lymphocyte ratio and systemic immune-inflammation index. *European Journal of Applied Physiology*, 121, 1803-1814. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04668-7>

- Wang, C., Zhang, P., Zhu, Y., Li, J., Yang, Y., Tan, X., Yang, L., Zeng, L., & Huang, W. (2025). A theoretical model of sports and health integration to promote active health. *BMC Public Health*, 25. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-22237-x>

BAB 2

FISIOLOGI SISTEM OTOT RANGKA

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menguraikan struktur hierarkis otot rangka dari level makroskopis (otot utuh) hingga level mikroskopis (sarkomer).
2. Menjelaskan secara rinci Teori Pergeseran Filamen (*Sliding Filament Theory*) sebagai dasar molekuler kontraksi otot.
3. Menganalisis peran krusial ion kalsium (Ca^{2+}) dan ATP dalam siklus jembatan silang (*cross-bridge*).
4. Membedakan karakteristik struktural, metabolik, dan fungsional dari berbagai tipe serabut otot (Tipe I, Tipe IIa, Tipe IIx).
5. Mengevaluasi mekanisme adaptasi otot terhadap latihan beban, termasuk perbedaan antara hipertrofi dan hiperplasia.
6. Menjelaskan proses biokimiawi yang mendasari peningkatan kekuatan dan ukuran otot.
7. Menganalisis dampak fisiologis dari gaya hidup sedentari dan proses atrofi otot terhadap kesehatan secara keseluruhan.

Pendahuluan

Pernahkah Anda merenungkan kontras yang luar biasa antara seorang atlet angkat besi yang mampu mengangkat beban ratusan kilogram dalam satu gerakan eksplosif, dengan seorang pelari maraton yang dapat mempertahankan kecepatan lari selama berjam-jam? Keduanya menunjukkan puncak performa manusia, namun kemampuan mereka berasal dari adaptasi yang sangat berbeda pada unit fungsional yang

sama, yaitu otot rangka. Sistem otot rangka adalah mesin biologis yang mengubah energi kimia menjadi gaya mekanik, memungkinkan setiap gerakan yang kita lakukan, mulai dari kedipan mata hingga lompatan vertikal. Memahami arsitektur dan mekanisme kerja mesin ini adalah fundamental bagi setiap tenaga kesehatan.

Otot bukan sekadar jaringan kontraktile. Otot adalah organ metabolik yang sangat aktif, memainkan peran sentral dalam pengaturan glukosa darah, laju metabolisme istirahat, dan kesehatan secara keseluruhan. Kegagalan fungsi otot, baik akibat cedera, penyakit, maupun penuaan, memiliki konsekuensi yang meluas, memengaruhi mobilitas, kemandirian, dan kualitas hidup. Oleh karena itu, pengetahuan mendalam tentang fisiologi otot rangka bukan hanya relevan untuk pelatih olahraga, tetapi juga esensial bagi fisioterapis yang merancang program rehabilitasi, dokter yang mengelola penyakit kronis, dan perawat yang merawat pasien lansia.

Bab ini akan membedah sistem otot rangka dari berbagai tingkatan. Kita akan memulai perjalanan dari struktur makroskopis, mengupas lapisan-lapisan jaringan ikat yang membungkus otot, hingga menyelam ke dunia mikroskopis serabut otot. Di sana, kita akan menemukan sarkomer, unit kontraktile terkecil yang menjadi panggung bagi sebuah drama molekuler yang menakjubkan, yang dijelaskan oleh Teori Pergeseran Filamen. Interaksi presisi antara protein aktin dan miosin, yang diatur oleh sinyal kalsium dan ditenagai oleh ATP, adalah inti dari setiap kontraksi otot.

Selanjutnya, kita akan menjelajahi keragaman yang ada di dalam otot itu sendiri. Tidak semua serabut otot diciptakan sama. Kita akan membedakan antara serabut otot kedutan lambat (*slow-twitch*) yang tahan lelah dan serabut otot kedutan cepat (*fast-twitch*) yang penuh tenaga. Pemahaman tentang karakteristik unik setiap tipe serabut otot ini akan menjelaskan mengapa beberapa individu secara genetik lebih

berbakat dalam olahraga ketahanan, sementara yang lain unggul dalam olahraga kecepatan dan kekuatan.

Bagian paling dinamis dari fisiologi otot adalah plastisitasnya, yaitu kemampuannya untuk beradaptasi. Latihan beban, misalnya, memicu serangkaian sinyal biokimiawi yang kompleks yang berujung pada pertumbuhan ukuran otot, sebuah proses yang dikenal sebagai hipertrofi. Kita akan mengkaji mekanisme molekuler di balik adaptasi ini dan membandingkannya dengan konsep hiperplasia yang lebih kontroversial.

Sebaliknya, kurangnya aktivitas fisik akan memicu proses yang berlawanan, yaitu atrofi atau penyusutan massa otot. Dampak dari gaya hidup sedentari jauh melampaui sekadar kelemahan fisik. Hal ini berkontribusi secara signifikan terhadap berbagai masalah kesehatan modern, termasuk obesitas, resistensi insulin, dan sindrom metabolik (Kosasih et al., 2025). Memahami mekanisme atrofi sangat penting untuk merancang strategi pencegahan dan intervensi yang efektif.

Melalui eksplorasi dalam bab ini, otot rangka akan terungkap bukan sebagai struktur statis, melainkan sebagai jaringan yang sangat responsif dan adaptif. Bagi tenaga kesehatan, menguasai fisiologi otot berarti memegang kunci untuk membuka potensi tubuh dalam penyembuhan, pemulihan, dan pemeliharaan kesehatan jangka panjang. Pengetahuan ini adalah dasar untuk meresepkan gerakan sebagai obat yang kuat dan presisi.

2.1. Struktur dan Mekanisme Kontraksi Otot

Struktur otot rangka diorganisasikan secara hierarkis, sebuah desain rekayasa yang luar biasa untuk menghasilkan gaya dan gerakan. Otot utuh yang menempel pada tulang melalui tendon dibungkus oleh lapisan jaringan ikat padat yang disebut epimisium. Di dalam otot,

serabut-serabut otot dikelompokkan menjadi bundel-bundel yang disebut fasikulus, di mana setiap fasikulus dibungkus oleh lapisan jaringan ikat lain yang disebut perimisium. Akhirnya, setiap serabut otot individual (yang merupakan sel otot tunggal) diselubungi oleh lapisan halus jaringan ikat yang disebut endomisium. Struktur berlapis ini tidak hanya menyediakan integritas struktural, tetapi juga berfungsi sebagai saluran bagi pembuluh darah dan saraf untuk mencapai setiap serabut otot (Draper et al., 2024).

Setiap serabut otot adalah sel multinukleus yang panjang dan silindris. Di dalam sitoplasmanya, yang disebut sarkoplasma, terdapat organel-organel khusus. Retikulum sarkoplasma adalah jaringan membran internal yang rumit yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan dan pelepasan ion kalsium, sebuah komponen vital untuk kontraksi. Selain itu, terdapat mioglobin untuk penyimpanan oksigen dan sejumlah besar glikogen dan mitokondria untuk memenuhi kebutuhan energi yang tinggi. Namun, komponen yang paling melimpah dan mendefinisikan serabut otot adalah miofibril. Miofibril adalah struktur seperti benang yang memanjang di sepanjang serabut otot dan tersusun atas unit-unit yang berulang disebut sarkomer (Rassier, 2022).

Sarkomer adalah unit fungsional dan struktural terkecil dari otot. Susunan sarkomer yang berulang inilah yang memberikan otot rangka penampilannya yang lurik atau bergaris di bawah mikroskop. Setiap sarkomer dibatasi oleh dua lempeng Z (*Z-line*). Di dalam sarkomer, terdapat dua jenis filamen protein utama: filamen tipis yang terutama terdiri dari protein aktin, dan filamen tebal yang terutama terdiri dari protein miosin. Filamen tipis melekat pada lempeng Z dan memanjang ke arah pusat sarkomer. Filamen tebal terletak di tengah sarkomer dan tumpang tindih dengan filamen tipis di kedua sisinya.

Pola lurik otot berasal dari susunan filamen-filamen ini. Pita A (*A-band*) yang gelap sesuai dengan panjang filamen tebal miosin, termasuk daerah di mana ia tumpang tindih dengan filamen tipis aktin. Pita I (*I-band*) yang terang adalah daerah di mana hanya terdapat filamen tipis aktin. Di tengah pita A terdapat zona H (*H-zone*), yaitu area di mana hanya terdapat filamen tebal. Mekanisme kontraksi otot pada dasarnya adalah proses pemendekan sarkomer-sarkomer ini di seluruh otot.

Kontraksi otot terjadi melalui mekanisme yang dijelaskan oleh Teori Pergeseran Filamen (*Sliding Filament Theory*). Teori ini menyatakan bahwa kontraksi otot bukanlah hasil dari pemendekan filamen protein itu sendiri, melainkan hasil dari pergeseran atau pergeseran filamen tipis (aktin) melewati filamen tebal (miosin) (Rassier, 2022). Pergeseran ini menarik lempeng Z lebih dekat satu sama lain, sehingga memperpendek sarkomer. Ketika jutaan sarkomer di dalam serabut otot memendek secara bersamaan, seluruh serabut otot berkontraksi, dan jika cukup banyak serabut otot yang berkontraksi, seluruh otot akan memendek dan menghasilkan gaya.

Proses pergeseran ini didorong oleh interaksi siklik antara kepala miosin (bagian dari filamen tebal) dan situs pengikatan pada filamen aktin. Interaksi ini, yang dikenal sebagai siklus jembatan silang (*cross-bridge cycle*), adalah proses yang sangat diatur dan membutuhkan energi dalam bentuk ATP serta sinyal pemicu dalam bentuk ion kalsium (Ca^{2+}). Tanpa kedua komponen ini, interaksi antara aktin dan miosin dicegah, dan otot tetap dalam keadaan rileks.

Proses keseluruhan, mulai dari sinyal saraf hingga kontraksi otot, dikenal sebagai *excitation-contraction coupling*. Ini adalah urutan peristiwa yang sangat cepat dan terkoordinasi yang memastikan bahwa otot hanya berkontraksi ketika diperintahkan oleh sistem saraf. Pemahaman tentang setiap langkah dalam mekanisme ini, dari struktur

sarkomer hingga peran kalsium dan ATP, sangat penting untuk memahami dasar dari semua gerakan manusia serta patofisiologi berbagai gangguan neuromuskular.

Analogi: Bayangkan proses kontraksi otot seperti sekelompok orang yang sedang melakukan tarik tambang. Tali (filamen aktin) tidak memendek. Sebaliknya, setiap orang dalam tim (kepala miosin) berulang kali meraih tali, menariknya sedikit, melepaskannya, dan kemudian meraih titik baru yang lebih jauh di tali untuk menarik lagi. Gerakan kolektif dan berulang dari semua orang yang menarik tali akan menyebabkan tali bergerak, sama seperti filamen aktin yang bergeser melewati miosin untuk memendekkan sarkomer.

2.1.1. Anatomi Mikroskopis Serabut Otot (Sarkomer)

Sarkomer, yang membentang dari satu lempeng Z ke lempeng Z berikutnya, adalah mahakarya rekayasa molekuler yang menjadi dasar kontraksi otot. Komponen utamanya adalah filamen tebal dan tipis. Filamen tebal hampir seluruhnya terdiri dari protein miosin. Setiap molekul miosin memiliki ekor panjang dan kepala globular. Kepala-kepala miosin inilah yang menonjol keluar dari filamen tebal, siap untuk berinteraksi dengan filamen tipis dan membentuk jembatan silang (Rassier, 2022). Kepala miosin juga memiliki situs pengikatan untuk ATP dan aktivitas ATPase, yang memungkinkannya memecah ATP untuk melepaskan energi yang dibutuhkan untuk kontraksi.

Filamen tipis terdiri dari tiga jenis protein. Tulang punggungnya adalah dua untai protein aktin yang terpilin menjadi heliks. Setiap molekul aktin memiliki situs pengikatan spesifik untuk kepala miosin. Dalam keadaan istirahat, situs pengikatan ini ditutupi oleh protein regulator lain yang disebut tropomiosin. Tropomiosin adalah protein berbentuk benang yang terletak di sepanjang alur heliks aktin. Protein regulator ketiga adalah troponin, sebuah kompleks yang terdiri dari tiga subunit (Troponin I, Troponin T, dan Troponin C) yang melekat pada tropomiosin. Troponin C memiliki situs pengikatan untuk ion

kalsium, dan pengikatan kalsium inilah yang memulai proses kontraksi (Cheng & Place, 2022). Selain protein kontraktil dan regulator, sarkomer juga mengandung protein struktural raksasa seperti titin, yang memberikan elastisitas pasif pada otot dan menstabilkan posisi filamen tebal.

2.1.2. Teori Pergeseran Filamen (Sliding Filament Theory)

Teori Pergeseran Filamen, yang diusulkan secara independen oleh Andrew Huxley dan Rolf Niedergerke serta oleh Hugh Huxley dan Jean Hanson pada tahun 1954, secara elegan menjelaskan bagaimana gaya dihasilkan dan sarkomer memendek. Proses ini adalah siklus empat langkah yang berulang. Siklus dimulai ketika kepala miosin, yang sudah "diaktifkan" oleh hidrolisis ATP menjadi ADP dan Pi, berada dalam posisi siap (posisi *cocked*). Ketika ion kalsium memasuki sarkoplasma dan mengikat troponin, tropomiosin bergeser, membuka situs pengikatan pada aktin (Draper et al., 2024). Pada langkah kedua, kepala miosin yang aktif segera mengikat aktin, membentuk jembatan silang.

Langkah ketiga adalah "kayuhan tenaga" (*power stroke*). Setelah mengikat aktin, kepala miosin melepaskan Pi dan ADP, yang menyebabkan perubahan konformasi pada kepala miosin. Kepala miosin berputar dan menarik filamen aktin ke arah pusat sarkomer (garis M). Gerakan inilah yang menghasilkan gaya dan pemendekan sarkomer (Rassier, 2022). Langkah terakhir adalah pelepasan. Sebuah molekul ATP baru harus mengikat kepala miosin agar ia dapat melepaskan diri dari aktin. Setelah terlepas, ATPase pada kepala miosin akan menghidrolisis ATP tersebut, mengembalikannya ke posisi *cocked*, siap untuk memulai siklus baru. Siklus ini akan terus berulang selama kadar kalsium tetap tinggi dan ada cukup ATP.

2.1.3. Peran Kalsium dan ATP dalam Jembatan Silang

Kalsium (Ca^{2+}) dan ATP memiliki peran yang berbeda namun sama-sama sangat diperlukan dalam siklus jembatan silang. Kalsium berfungsi sebagai saklar "on-off" untuk kontraksi. Dalam keadaan rileks, konsentrasi Ca^{2+} di sarkoplasma sangat rendah karena secara aktif dipompa ke dalam retikulum sarkoplasma (RS). Sinyal saraf (potensial aksi) yang tiba di persimpangan neuromuskular memicu pelepasan Ca^{2+} dari RS ke dalam sarkoplasma. Peningkatan mendadak konsentrasi Ca^{2+} inilah yang menjadi pemicu kontraksi (Cheng & Place, 2022). Ca^{2+} mengikat subunit Troponin C, yang menyebabkan perubahan bentuk pada kompleks troponin-tropomiosin. Perubahan ini menarik tropomiosin menjauhi dari situs pengikatan miosin pada aktin, sehingga "menyalakan" kontraksi dengan memungkinkan pembentukan jembatan silang.

ATP, di sisi lain, memainkan dua peran krusial. Pertama, hidrolisis ATP (pemecahan menjadi $\text{ADP} + \text{Pi}$) oleh ATPase miosin memberikan energi pada kepala miosin, menempatkannya dalam konfigurasi berenergi tinggi yang siap untuk mengikat aktin dan melakukan *power stroke*. Tanpa energi ini, tarikan tidak akan terjadi. Kedua, pengikatan molekul ATP *baru* ke kepala miosin sangat penting untuk melepaskan jembatan silang antara miosin dan aktin pada akhir *power stroke* (Draper et al., 2024). Peran kedua ini menjelaskan fenomena *rigor mortis*, yaitu kekakuan otot setelah kematian. Ketika produksi ATP berhenti, kepala miosin tetap terikat erat pada aktin, menyebabkan otot menjadi kaku dan tidak dapat rileks.

2.2. Tipe Serabut Otot dan Karakteristiknya

Otot rangka manusia bukanlah jaringan yang homogen. Sebaliknya, otot terdiri dari mosaik berbagai jenis serabut otot, yang masing-masing memiliki karakteristik biokimia dan fungsional yang unik. Perbedaan ini memungkinkan otot untuk melakukan berbagai tugas,

mulai dari mempertahankan postur tubuh dalam waktu lama hingga menghasilkan gerakan yang cepat dan kuat. Serabut otot umumnya diklasifikasikan berdasarkan dua kriteria utama: (1) kecepatan kontraksinya (cepat atau lambat), yang ditentukan oleh jenis isoenzim miosin ATPase yang diekspresikannya, dan (2) jalur metabolisme utama yang digunakannya untuk menghasilkan ATP (oksidatif atau glikolitik) (Draper et al., 2024). Berdasarkan kriteria ini, serabut otot manusia umumnya dibagi menjadi tiga tipe utama: Tipe I (kedutan lambat), Tipe IIa (kedutan cepat), dan Tipe IIx (kedutan cepat).

Serabut Tipe I, juga dikenal sebagai serabut oksidatif lambat (*slow-oxidative*), dirancang untuk aktivitas ketahanan. Serabut ini memiliki kecepatan kontraksi yang lambat tetapi sangat tahan terhadap kelelahan. Secara metabolik, serabut ini sangat bergantung pada metabolisme oksidatif aerobik. Untuk mendukung hal ini, serabut Tipe I memiliki kepadatan mitokondria yang tinggi, kandungan mioglobin yang tinggi (protein pengikat oksigen yang memberikan warna merah khas), dan dikelilingi oleh jaringan kapiler yang padat untuk memastikan pasokan oksigen yang melimpah (Plotkin et al., 2021). Otot-otot yang bertanggung jawab untuk postur, seperti otot soleus di betis, memiliki proporsi serabut Tipe I yang tinggi.

Di ujung spektrum yang berlawanan adalah serabut Tipe IIx, juga dikenal sebagai serabut glikolitik cepat (*fast-glycolytic*). Serabut ini adalah yang tercepat dan terkuat, tetapi juga yang paling cepat lelah. Kecepatan kontraksi mereka yang tinggi disebabkan oleh aktivitas miosin ATPase yang sangat cepat. Serabut ini sangat bergantung pada glikolisis anaerobik untuk produksi ATP, yang tercermin dari simpanan glikogen yang besar dan aktivitas enzim glikolitik yang tinggi. Sebaliknya, serabut Tipe IIx memiliki kepadatan mitokondria dan kapiler yang relatif rendah, membuatnya tampak lebih pucat atau "putih" (Draper et al., 2024). Serabut ini direkrut untuk aktivitas yang

mebutuhkan ledakan tenaga maksimal dalam waktu singkat, seperti lari cepat atau angkat berat.

Di antara kedua ekstrem ini terdapat serabut Tipe IIa, atau serabut oksidatif-glikolitik cepat (*fast-oxidative glycolytic*). Serabut ini memiliki karakteristik dari kedua tipe lainnya. Serabut Tipe IIa memiliki kecepatan kontraksi yang cepat (meskipun tidak secepat Tipe IIx) dan kapasitas produksi gaya yang tinggi, tetapi juga memiliki kapasitas oksidatif yang cukup baik dan lebih tahan terhadap kelelahan dibandingkan Tipe IIx (Plotkin et al., 2021). Karakteristik hibrida ini membuatnya cocok untuk aktivitas yang membutuhkan kekuatan dan daya tahan, seperti lari 800 meter atau bermain sepak bola.

Proporsi setiap tipe serabut otot dalam tubuh seseorang sebagian besar ditentukan oleh faktor genetik. Inilah sebabnya mengapa beberapa individu secara alami lebih cocok untuk olahraga ketahanan, sementara yang lain lebih cocok untuk olahraga kecepatan. Namun, komposisi serabut otot tidak sepenuhnya statis. Latihan dapat menyebabkan pergeseran pada karakteristik serabut otot. Latihan ketahanan dapat meningkatkan kapasitas oksidatif dari semua jenis serabut, sementara latihan kekuatan dapat meningkatkan ukuran (hipertrofi) terutama pada serabut tipe II. Pergeseran yang paling umum diamati adalah transisi dari serabut Tipe IIx ke Tipe IIa sebagai respons terhadap berbagai jenis latihan, yang mencerminkan adaptasi otot menjadi lebih tahan lelah (Plotkin et al., 2021).

Penentuan dominansi tipe serabut otot secara akurat memerlukan prosedur invasif yang disebut biopsi otot, di mana sampel kecil jaringan otot diambil dan dianalisis di laboratorium menggunakan teknik histokimia. Meskipun tidak praktis untuk penggunaan rutin, penelitian yang menggunakan biopsi otot telah memberikan wawasan

yang sangat berharga tentang bagaimana otot beradaptasi terhadap latihan dan penyakit.

Bagi tenaga kesehatan, pemahaman tentang tipe serabut otot ini sangat penting. Misalnya, proses penuaan dikaitkan dengan hilangnya serabut otot Tipe II secara preferensial, yang berkontribusi pada penurunan kekuatan dan peningkatan risiko jatuh pada lansia. Oleh karena itu, program latihan yang dirancang untuk populasi ini harus mencakup komponen latihan kekuatan untuk menargetkan dan mempertahankan serabut Tipe II. Demikian pula, dalam rehabilitasi cedera, jenis latihan yang diresepkan dapat disesuaikan untuk menargetkan pemulihan tipe serabut otot yang paling relevan dengan aktivitas fungsional pasien.

Contoh Kasus: Dua atlet elit, seorang pelari maraton dan seorang *sprinter* 100 meter, menjalani biopsi otot dari otot vastus lateralis (bagian dari paha depan). Hasil analisis menunjukkan bahwa otot pelari maraton terdiri dari sekitar 80% serabut Tipe I, dengan sisanya adalah Tipe IIa. Sebaliknya, otot *sprinter* menunjukkan komposisi sekitar 70% serabut Tipe II (dengan mayoritas Tipe IIx) dan hanya 30% serabut Tipe I. Perbedaan dramatis dalam komposisi serabut otot ini secara langsung mencerminkan spesialisasi fisiologis yang diperlukan untuk keberhasilan di masing-masing cabang olahraga mereka (Draper et al., 2024).

2.2.1. Serabut Kedutan Lambat (Tipe I)

Serabut kedutan lambat, atau Tipe I, adalah pekerja keras yang tak kenal lelah di dalam otot. Disebut "lambat" karena isoenzim miosin ATPase-nya menghidrolisis ATP dengan laju yang lebih lambat, yang menghasilkan kecepatan kontraksi yang lebih rendah. Namun, karakteristik ini diimbangi dengan efisiensi energi yang tinggi dan ketahanan yang luar biasa terhadap kelelahan (Plotkin et al., 2021).

Fisiologi serabut Tipe I secara sempurna disesuaikan untuk metabolisme aerobik. Serabut ini dikelilingi oleh lebih banyak kapiler per serabut dibandingkan tipe lainnya, memastikan pengiriman oksigen dan nutrisi yang konstan serta pembuangan produk sisa metabolik yang efisien.

Di dalam serabut Tipe I, terdapat banyak mitokondria berukuran besar, yang merupakan pusat tenaga sel untuk respirasi aerobik. Kandungan mioglobin yang tinggi, sebuah protein yang mirip dengan hemoglobin yang mengikat dan menyimpan oksigen di dalam sel otot, juga berkontribusi pada kapasitas oksidatifnya dan memberikan warna merah yang khas (Draper et al., 2024). Karena ketergantungannya pada metabolisme aerobik yang lambat namun stabil, serabut Tipe I sangat ideal untuk aktivitas berdurasi panjang dan berintensitas rendah hingga sedang, seperti berjalan, jogging, bersepeda jarak jauh, dan yang terpenting, mempertahankan postur tubuh sepanjang hari.

2.2.2. Serabut Kedutan Cepat (Tipe IIa dan IIx)

Serabut kedutan cepat, secara kolektif disebut serabut Tipe II, adalah spesialis untuk kecepatan dan kekuatan. Serabut Tipe IIx adalah yang paling eksplosif. Serabut ini memiliki aktivitas miosin ATPase tertinggi, yang memungkinkan siklus jembatan silang terjadi dengan sangat cepat, menghasilkan kecepatan kontraksi dan produksi gaya yang maksimal. Namun, kekuatan ini harus dibayar mahal, serabut Tipe IIx sangat bergantung pada metabolisme anaerobik (glikolisis) dan simpanan ATP-PCr, yang cepat habis, sehingga membuatnya sangat mudah lelah (Plotkin et al., 2021). Serabut ini direkrut selama aktivitas maksimal atau mendekati maksimal yang berlangsung beberapa detik, seperti pukulan dalam tinju atau lompatan tinggi. Serabut Tipe IIa sering dianggap sebagai tipe serabut perantara. Serabut ini memiliki aktivitas miosin ATPase yang cepat (meskipun lebih lambat dari Tipe IIx) sehingga dapat menghasilkan gaya yang

besar dengan cepat, tetapi juga memiliki kapasitas oksidatif yang cukup berkembang. Karakteristik hibrida ini membuatnya lebih tahan lelah daripada Tipe IIX dan sangat mudah beradaptasi (Draper et al., 2024). Melalui latihan, serabut Tipe IIA dapat meningkatkan karakteristik oksidatifnya (menyerupai Tipe I) atau karakteristik glikolitiknya (menyerupai Tipe IIX), tergantung pada jenis stimulus latihan. Serabut serbaguna ini penting untuk aktivitas yang membutuhkan ledakan tenaga berulang, seperti dalam olahraga tim.

2.2.3. Metode Penentuan Dominansi Serabut Otot

Metode standar emas untuk menentukan komposisi tipe serabut otot pada manusia adalah melalui analisis histokimia dari sampel biopsi otot. Prosedur ini melibatkan pengambilan sepotong kecil jaringan otot (biasanya dari otot seperti vastus lateralis) menggunakan jarum biopsi khusus di bawah anestesi lokal. Sampel tersebut kemudian dibekukan, diiris tipis, dan diinkubasi dengan berbagai reagen kimia. Metode yang paling umum adalah pewarnaan untuk miosin ATPase pada berbagai tingkat pH, yang memungkinkan identifikasi visual serabut Tipe I, Tipe IIA, dan Tipe IIX berdasarkan perbedaan intensitas warna (Draper et al., 2024).

Meskipun sangat akurat, biopsi otot adalah prosedur yang invasif, mahal, dan memerlukan keahlian khusus, sehingga penggunaannya terbatas pada lingkungan penelitian. Para peneliti terus mencari metode non-invasif untuk memperkirakan komposisi serabut otot. Beberapa teknik yang menjanjikan termasuk *proton magnetic resonance spectroscopy* (1H-MRS), yang dapat mendeteksi perbedaan konsentrasi karnosin (lebih tinggi pada serabut Tipe II), dan tensiomiografi (TMG), yang mengukur waktu kontraksi otot sebagai respons terhadap stimulus listrik (Plotkin et al., 2021). Namun, saat ini, metode-metode non-invasif ini belum dapat menggantikan akurasi dan detail yang diberikan oleh analisis biopsi otot secara langsung.

2.3. Adaptasi Otot terhadap Latihan Beban

Otot rangka menunjukkan plastisitas yang luar biasa, yaitu kemampuan untuk mengubah struktur dan fungsinya sebagai respons terhadap tuntutan yang diberikan padanya. Latihan beban (juga dikenal sebagai latihan resistensi) adalah stimulus kuat yang memicu serangkaian adaptasi neuromuskular yang mengarah pada peningkatan kekuatan dan ukuran otot. Peningkatan kekuatan awal yang diamati dalam beberapa minggu pertama program latihan beban sebagian besar disebabkan oleh adaptasi neural, bukan perubahan struktural pada otot itu sendiri. Sistem saraf menjadi lebih efisien dalam merekrut unit motorik, meningkatkan laju penembakan sinyal saraf, dan memperbaiki sinkronisasi antar unit motorik, yang semuanya memungkinkan otot untuk menghasilkan lebih banyak gaya (Draper et al., 2024).

Setelah periode adaptasi neural awal, peningkatan kekuatan lebih lanjut terutama didorong oleh peningkatan ukuran otot, sebuah proses yang dikenal sebagai hipertrofi. Hipertrofi otot adalah peningkatan luas penampang setiap serabut otot individu. Peningkatan ukuran ini terutama disebabkan oleh penambahan miofibril baru (aktin dan miosin) di dalam serabut otot, yang meningkatkan kapasitas serabut untuk menghasilkan gaya (Lim et al., 2022). Stres mekanik dan kerusakan mikro yang disebabkan oleh latihan beban memicu kaskade pensinyalan molekuler yang kompleks di dalam sel otot, dengan jalur pensinyalan mTOR (mammalian Target of Rapamycin) memainkan peran sentral dalam merangsang sintesis protein otot.

Mekanisme lain yang diusulkan untuk peningkatan ukuran otot adalah hiperplasia, yaitu peningkatan jumlah total serabut otot. Sementara hiperplasia telah terbukti terjadi pada beberapa model hewan sebagai respons terhadap beban berlebih yang ekstrem, buktinya pada manusia masih kontroversial dan tidak meyakinkan. Konsensus ilmiah saat ini

adalah bahwa hipertrofi adalah mekanisme yang dominan, jika bukan satu-satunya, yang bertanggung jawab atas pertumbuhan otot yang signifikan pada manusia sebagai respons terhadap latihan beban (Lim et al., 2022).

Selain perubahan ukuran, latihan beban juga menyebabkan perubahan biokimiawi lainnya di dalam otot. Ini termasuk peningkatan simpanan glikogen dan fosfokreatin di dalam otot, yang meningkatkan kapasitas untuk produksi energi anaerobik. Aktivitas enzim-enzim kunci dalam jalur glikolitik juga meningkat. Selanjutnya, latihan beban dapat meningkatkan kekuatan dan kepadatan jaringan ikat di dalam dan di sekitar otot, termasuk tendon dan ligamen, yang membantu melindungi terhadap cedera.

Sebaliknya, kurangnya stimulus mekanik, seperti yang terjadi selama gaya hidup sedentari, imobilisasi akibat cedera, atau penuaan, menyebabkan proses yang berlawanan yang disebut atrofi otot. Atrofi adalah penurunan massa dan luas penampang otot, yang disebabkan oleh ketidakseimbangan di mana laju pemecahan protein otot melebihi laju sintesisnya. Atrofi otot tidak hanya menyebabkan kelemahan dan penurunan fungsi fisik, tetapi juga memiliki konsekuensi metabolik yang merugikan. Karena otot adalah tempat utama pembuangan glukosa, hilangnya massa otot dapat berkontribusi pada resistensi insulin dan peningkatan risiko diabetes tipe 2 (Kosasih et al., 2025).

Pemahaman tentang mekanisme adaptasi dan maladaptasi otot ini sangat krusial bagi tenaga kesehatan. Pengetahuan ini menjadi dasar untuk merancang program latihan yang efektif untuk meningkatkan kekuatan pada atlet, melawan sarkopenia (kehilangan otot terkait usia) pada lansia, dan merehabilitasi pasien setelah cedera atau operasi. Intervensi yang menargetkan kesehatan otot adalah strategi kunci untuk meningkatkan kesehatan dan kesejahteraan sepanjang rentang kehidupan.

Contoh Kasus: Seorang pria berusia 45 tahun yang sebelumnya tidak aktif memulai program latihan beban tiga kali seminggu. Dalam empat minggu pertama, ia melihat peningkatan signifikan dalam jumlah beban yang bisa ia angkat (misalnya, dari 50 kg menjadi 70 kg pada latihan *bench press*), meskipun ukuran ototnya belum tampak berubah banyak. Peningkatan awal ini adalah hasil dari adaptasi neural yang cepat. Setelah tiga bulan latihan yang konsisten, ia tidak hanya menjadi lebih kuat (mengangkat 90 kg), tetapi lingkaran lengannya juga bertambah 2 cm. Peningkatan selanjutnya ini didorong oleh hipertrofi otot yang nyata, yang dimediasi oleh peningkatan sintesis protein (Lim et al., 2022).

2.3.1. Mekanisme Hipertrofi vs Hiperplasia

Hipertrofi otot adalah mekanisme utama di balik pertumbuhan otot sebagai respons terhadap latihan beban. Secara spesifik, ini merujuk pada peningkatan luas penampang melintang (*cross-sectional area*) dari serabut otot yang sudah ada. Peningkatan ini terjadi karena penambahan protein kontraktil baru, terutama aktin dan miosin, yang berkumpul menjadi miofibril baru di dalam sel otot. Proses ini dipicu oleh kombinasi dari tegangan mekanik, kerusakan otot, dan stres metabolik yang dihasilkan selama sesi latihan beban (Lim et al., 2022). Sinyal-sinyal ini mengaktifkan sel-sel satelit, yang merupakan sel punca otot, untuk berproliferasi dan menyumbangkan inti barunya ke serabut otot yang ada, sehingga meningkatkan kapasitas sintesis protein dari serabut tersebut.

Di sisi lain, hiperplasia adalah peningkatan ukuran otot akibat bertambahnya jumlah serabut otot. Teori yang mendasarinya adalah bahwa di bawah tekanan yang ekstrem, serabut otot yang lebih besar dapat terbelah menjadi dua serabut anak yang lebih kecil, yang kemudian dapat tumbuh menjadi ukuran penuh. Meskipun mekanisme ini telah ditunjukkan secara meyakinkan pada beberapa spesies

hewan, bukti langsung untuk hiperplasia yang signifikan secara fungsional pada manusia masih kurang (Draper et al., 2024). Beberapa penelitian tidak langsung menunjukkan kemungkinan terjadinya hiperplasia, tetapi kontribusinya terhadap pertumbuhan otot secara keseluruhan pada manusia dianggap minimal dibandingkan dengan hipertrofi yang sudah mapan. Oleh karena itu, dalam praktik klinis dan olahraga, fokus utama untuk meningkatkan massa otot tetap pada stimulus untuk hipertrofi.

2.3.2. Perubahan Biokimiawi dan Enzimatis pada Otot

Latihan beban tidak hanya mengubah ukuran otot tetapi juga lingkungan biokimia di dalamnya untuk lebih mendukung performa anaerobik. Salah satu adaptasi utama adalah peningkatan konsentrasi substrat energi yang siap pakai di dalam otot. Simpanan glikogen intramuskular dan fosfokreatin (PCr) meningkat, menyediakan lebih banyak bahan bakar untuk produksi ATP yang cepat melalui glikolisis dan sistem fosfagen (Draper et al., 2024). Peningkatan ini memungkinkan otot untuk mempertahankan upaya berintensitas tinggi untuk waktu yang sedikit lebih lama dan pulih lebih cepat di antara set latihan.

Selain peningkatan substrat, terjadi pula peningkatan aktivitas enzim-enzim kunci yang mengkatalisis reaksi dalam jalur energi anaerobik. Misalnya, aktivitas enzim seperti fosforilase (memecah glikogen), fosfofruktokinase (enzim pengatur laju glikolisis), dan kreatin kinase (meregenerasi ATP dari PCr) semuanya terbukti meningkat sebagai respons terhadap latihan beban (Lim et al., 2022). Adaptasi enzimatis ini secara kolektif meningkatkan kapasitas otot untuk menghasilkan ATP dengan cepat tanpa bergantung pada oksigen. Perubahan ini spesifik untuk latihan beban dan berbeda dari adaptasi yang diinduksi oleh latihan ketahanan, yang terutama meningkatkan kepadatan mitokondria dan aktivitas enzim oksidatif.

2.3.3. Atrofi Otot dan Dampak Sedentari terhadap Kesehatan

Atrofi otot adalah proses penyusutan massa otot, yang pada dasarnya merupakan kebalikan dari hipertrofi. Hal ini terjadi ketika laju degradasi (pemecahan) protein otot melebihi laju sintesis protein. Atrofi dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk kurangnya penggunaan (*disuse atrophy*), seperti saat anggota tubuh diimobilisasi dalam gips, denervasi (kehilangan sinyal saraf ke otot), dan proses penuaan alami yang disebut sarkopenia (Izquierdo et al., 2024). Gaya hidup sedentari adalah bentuk kronis dari kurangnya penggunaan yang mempercepat hilangnya massa otot di semua usia. Secara molekuler, atrofi sering dikaitkan dengan peningkatan aktivitas jalur ubiquitin-proteasome, yang merupakan sistem utama tubuh untuk menandai dan mendegradasi protein.

Dampak dari atrofi otot dan gaya hidup sedentari jauh melampaui sekadar kelemahan fisik. Otot adalah jaringan yang sangat aktif secara metabolik, menyumbang sebagian besar dari laju metabolisme basal dan menjadi tempat utama penyerapan glukosa setelah makan. Hilangnya massa otot mengurangi "wadah" untuk pembuangan glukosa, yang dapat menyebabkan intoleransi glukosa, resistensi insulin, dan pada akhirnya meningkatkan risiko pengembangan diabetes melitus tipe 2 (Kosasih et al., 2025). Selain itu, penurunan kekuatan dan massa otot, terutama pada lansia, secara langsung terkait dengan penurunan mobilitas, peningkatan risiko jatuh dan patah tulang, hilangnya kemandirian, dan penurunan kualitas hidup secara keseluruhan (Saputra et al., 2025).

Rangkuman Bab

- Otot rangka memiliki struktur hierarkis mulai dari otot utuh, fasikulus, serabut otot, miofibril, hingga sarkomer.
- Sarkomer adalah unit kontraktil dasar, terdiri dari filamen aktin (tipis) dan miosin (tebal) serta protein regulator troponin dan tropomiosin.
- Kontraksi otot dijelaskan oleh Teori Pergeseran Filamen, di mana filamen aktin bergeser melewati filamen miosin, menyebabkan pemendekan sarkomer.
- Ion kalsium (Ca^{2+}) bertindak sebagai pemicu kontraksi dengan mengikat troponin, sedangkan ATP menyediakan energi untuk *power stroke* dan pelepasan jembatan silang.
- Serabut otot diklasifikasikan menjadi Tipe I (lambat, oksidatif, tahan lelah), Tipe IIa (cepat, oksidatif-glikolitik), dan Tipe IIx (sangat cepat, glikolitik, mudah lelah).
- Komposisi serabut otot sebagian besar ditentukan secara genetik tetapi dapat dimodifikasi oleh latihan.
- Adaptasi utama terhadap latihan beban adalah hipertrofi (peningkatan ukuran serabut), yang didorong oleh peningkatan sintesis protein, sementara peran hiperplasia (peningkatan jumlah serabut) pada manusia masih belum jelas.
- Kurangnya aktivitas (gaya hidup sedentari) atau imobilisasi menyebabkan atrofi (penyusutan otot), yang berdampak negatif pada kekuatan, fungsi, dan kesehatan metabolik.

Soal Esai

1. Gambarkan urutan peristiwa yang terjadi selama *excitation-contraction coupling*, dimulai dari datangnya potensial aksi di persimpangan neuromuskular hingga terjadinya pergeseran filamen di dalam sarkomer.
2. Bandingkan dan kontraskan karakteristik serabut otot Tipe I dan Tipe IIX dalam hal kecepatan kontraksi, kapasitas metabolik (aerobik vs. anaerobik), resistensi terhadap kelelahan, dan penampilan mikroskopis.
3. Jelaskan secara rinci peran ganda ATP dalam siklus jembatan silang. Apa yang akan terjadi jika sel otot kehabisan ATP setelah kontraksi dimulai?
4. Seorang individu yang baru memulai program latihan beban mengalami peningkatan kekuatan yang cepat dalam 4 minggu pertama, diikuti oleh peningkatan kekuatan yang lebih lambat namun disertai dengan peningkatan ukuran otot yang terlihat. Jelaskan adaptasi (neural dan otot) yang mendasari kedua fase ini.
5. Definisikan atrofi otot dan diskusikan setidaknya tiga konsekuensi kesehatan negatif yang terkait dengan gaya hidup sedentari yang menyebabkan hilangnya massa otot.

Soal Pilihan Ganda

1. Unit fungsional terkecil dari otot rangka adalah...
 - A. Miofibril
 - B. Fasikulus
 - C. Serabut otot
 - D. Sarkomer -V-
2. Menurut Teori Pergeseran Filamen, apa yang terjadi selama kontraksi otot?
 - A. Filamen miosin memendek
 - B. Filamen aktin memendek
 - C. Filamen aktin bergeser melewati filamen miosin -V-
 - D. Lempeng Z memanjang
3. Protein regulator yang menutupi situs pengikatan miosin pada aktin dalam keadaan rileks adalah...
 - A. Troponin
 - B. Tropomiosin -V-
 - C. Titin
 - D. Miosin
4. Ion yang dilepaskan dari retikulum sarkoplasma untuk memulai kontraksi otot adalah...
 - A. Natrium (Na^+)
 - B. Kalium (K^+)
 - C. Kalsium (Ca^{2+}) -V-
 - D. Klorida (Cl^-)

5. Serabut otot yang paling cocok untuk lari maraton adalah...
 - A. Tipe I -V-
 - B. Tipe IIa
 - C. Tipe IIx
 - D. Tipe IIb

6. Peningkatan ukuran otot sebagai respons terhadap latihan beban terutama disebabkan oleh...
 - A. Hiperplasia
 - B. Hipertrofi -V-
 - C. Atrofi
 - D. Adaptasi neural

7. Fenomena *rigor mortis* terjadi karena...
 - A. Kelebihan produksi kalsium
 - B. Kekurangan pelepasan asetilkolin
 - C. Ketiadaan ATP untuk melepaskan jembatan silang -V-
 - D. Penumpukan asam laktat yang berlebihan

8. Seorang atlet angkat besi kemungkinan besar memiliki proporsi serabut otot yang lebih tinggi dari tipe...
 - A. Oksidatif lambat
 - B. Oksidatif-glikolitik cepat
 - C. Glikolitik cepat (Tipe IIx) -V-
 - D. Kedutan lambat

9. Proses penyusutan massa otot akibat kurangnya penggunaan atau penuaan disebut...
 - A. Hipertrofi
 - B. Atrofi -V-
 - C. Miosis
 - D. Kifosis

10. Peningkatan kekuatan yang sangat cepat pada awal program latihan resistensi disebabkan oleh...
- A. Peningkatan jumlah serabut otot
 - B. Peningkatan ukuran serabut otot
 - C. Adaptasi sistem saraf -V-
 - D. Peningkatan kepadatan mitokondria

Studi Kasus atau Tugas Kontekstual

1. Seorang pasien lansia berusia 75 tahun didiagnosis menderita sarkopenia (kehilangan massa otot terkait usia) yang signifikan, yang membuatnya berisiko tinggi untuk jatuh. Sebagai seorang tenaga kesehatan, Anda ditugaskan untuk merancang program latihan dasar untuknya. Jelaskan mengapa latihan resistensi (misalnya, latihan menggunakan beban ringan atau pita resistensi) harus menjadi komponen kunci dari program ini. Kaitkan justifikasi Anda dengan pemahaman tentang tipe serabut otot (khususnya serabut Tipe II) dan mekanisme hipertrofi.

Glosarium Bab

- **Aktin:** Protein utama penyusun filamen tipis dalam sarkomer, memiliki situs untuk pengikatan miosin.
- **Atrofi:** Penurunan ukuran atau penyusutan massa otot, biasanya disebabkan oleh kurangnya aktivitas, penuaan, atau penyakit.
- **Hiperplasia:** Peningkatan ukuran jaringan akibat peningkatan jumlah sel atau serabut. Perannya dalam pertumbuhan otot manusia masih kontroversial.
- **Hipertrofi:** Peningkatan ukuran sel atau serabut otot yang sudah ada, merupakan mekanisme utama pertumbuhan otot akibat latihan beban.
- **Miofibril:** Struktur berbentuk batang yang tersusun dari sarkomer yang berulang, merupakan elemen kontraktile utama dalam serabut otot.
- **Miosin:** Protein utama penyusun filamen tebal, memiliki kepala globular yang membentuk jembatan silang dengan aktin.
- **Retikulum Sarkoplasma:** Jaringan membran internal khusus di dalam serabut otot yang menyimpan dan melepaskan ion kalsium.
- **Sarkomer:** Unit struktural dan fungsional dasar dari miofibril, membentang dari satu lempeng Z ke lempeng Z berikutnya.
- **Teori Pergeseran Filamen (Sliding Filament Theory):** Model yang menjelaskan kontraksi otot di mana filamen tipis bergeser melewati filamen tebal tanpa mengubah panjang filamen itu sendiri.
- **Troponin & Tropomiosin:** Kompleks protein regulator pada filamen tipis yang mengontrol interaksi antara aktin dan miosin dengan cara yang bergantung pada kalsium.

Daftar Pustaka Bab

- Abdillah, M., Hartoto, S., Ningsih, Y., Ardha, M., & Fathir, L. (2025). Sport massage Sebagai Solusi Cepat dalam Mengurangi Kelelahan Otot Setelah Aktivitas Fisik Intensitas Tinggi: Studi Literatur. *Jurnal Keolahragaan*. <https://doi.org/10.25157/jkor.v11i2.21214>
- Cheng, A. J., & Place, N. (2022). The intricacies of excitation–contraction coupling and neuromuscular transmission in skeletal muscle fatigue. *Journal of Physiology*, 600(5), 1133-1147. <https://doi.org/10.1113/JP281987>
- Draper, N., Williams, C., & Marshall, H. (2024). *Exercise Physiology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003109280>
- Izquierdo, M., De Souto Barreto, P., Arai, H., Bischoff-Ferrari, H., Cadore, E., Cesari, M., ... & Singh, M. (2024). Global consensus on optimal exercise recommendations for enhancing healthy longevity in older adults (ICFSR). *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.jnha.2024.100401>
- Kosasih, R., Frisca, F., Santoso, A., Destra, E., Gunaidi, F., Jap, A., & Gracienne, G. (2025). Korelasi antara Kadar Insulin dalam Darah dengan Kekuatan Otot Tangan Kanan dan Kiri pada Kelompok Lanjut Usia. *JURNAL RISET RUMPUN ILMU KESEHATAN*. <https://doi.org/10.55606/jurrikes.v4i1.4881>
- Lim, C., Nunes, E. A., Currier, B. S., McLeod, J. C., & Phillips, S. M. (2022). An evidence-based narrative review of mechanisms of resistance exercise-induced human skeletal muscle hypertrophy. *Sports Medicine*, 52(7), 1557-1571. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01641-4>

- Nindyo, M., Roepajadi, J., Yuliastrid, D., & Fikri, M. (2025). Pengaruh Sport Massage terhadap Fleksibilitas Otot dan Ambang Nyeri Otot Hamstring pada Atlet Kabaddi Surabaya. *Mutiara Pendidikan dan Olahraga*. <https://doi.org/10.61132/mupeno.v2i3.273>
- Plotkin, D. L., Roberts, M. D., Haun, C. T., & Schoenfeld, B. J. (2021). Muscle fiber type transitions with exercise training: Shifting perspectives. *Sports*, 9(9), 127. <https://doi.org/10.3390/sports9090127>
- Rassier, D. E. (2022). The mechanics of the sarcomere: A story of molecular machines, their springs and the load they bear. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 172, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2022.02.001>
- Saputra, R., Zulfikar, Z., & Fadhail, M. (2025). Edukasi perawatan fleksibilitas dan keseimbangan tubuh pada lansia di Posyandu Lansia, Way Sulan Tanjung Bintang. *JOURNAL OF Public Health Concerns*. <https://doi.org/10.56922/phc.v4i5.540>
- Sitawati, A., Agustini, N., & Kusumaningtiyas, N. (2025). Pengaruh Latihan Static Stretching terhadap Penurunan Nyeri Otot Leher pada Petani Kakao di Desa Candikusuma Kecamatan Melaya. *JURNAL RISET RUMPUN ILMU KESEHATAN*. <https://doi.org/10.55606/jurrikes.v4i1.6145>

BAB 3

KONTROL NEUROMUSKULAR DALAM OLAHRAGA

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- Menjelaskan struktur dan fungsi dari sebuah unit motorik (*motor unit*) sebagai unit fungsional dasar kontrol gerak.
- Menganalisis Prinsip Ukuran (*Size Principle*) Henneman dalam proses rekrutmen unit motorik.
- Menguraikan peran korteks motorik dan area otak lainnya dalam perencanaan dan eksekusi gerakan volunter.
- Menjelaskan proses transmisi sinaptik yang terjadi di persimpangan neuromuskular (*neuromuscular junction*).
- Membedakan fungsi dari dua reseptor sensorik utama di otot: *muscle spindle* dan *Golgi tendon organ (GTO)*.
- Menganalisis adaptasi neural yang terjadi sebagai respons terhadap latihan kekuatan, seperti peningkatan rekrutmen dan sinkronisasi unit motorik.
- Menjelaskan mekanisme potensial dari kelelahan saraf pusat (*central fatigue*) dan perbedaannya dengan kelelahan perifer.

Pendahuluan

Bayangkan kerumitan yang terlibat dalam tindakan sederhana seperti mengambil segelas air. Otak Anda harus memperkirakan jarak, menghitung berat gelas, mengoordinasikan puluhan otot di lengan dan tangan Anda untuk bergerak dengan mulus, dan secara konstan menyesuaikan kekuatan cengkeraman agar tidak terlalu lemah hingga jatuh atau terlalu kuat hingga pecah. Proses yang terasa instan dan tanpa usaha ini sebenarnya adalah simfoni komando neural dan umpan balik sensorik yang luar biasa kompleks. Ini adalah ranah kontrol neuromuskular, sebuah bidang yang mengeksplorasi bagaimana sistem saraf memerintah dan berkomunikasi dengan sistem otot untuk menghasilkan gerakan yang terkoordinasi dan bertujuan.

Jika Bab 2 membahas otot sebagai "mesin" yang menghasilkan gaya, maka Bab 3 ini akan membahas sistem saraf sebagai "pengemudi" atau "perangkat lunak" yang mengendalikan mesin tersebut. Kekuatan otot yang besar tidak akan berguna tanpa sistem kontrol yang presisi untuk mengaktifkannya secara efektif. Peningkatan performa, baik dalam olahraga maupun dalam aktivitas sehari-hari, tidak hanya bergantung pada perubahan struktural pada otot, tetapi juga pada kemampuan sistem saraf untuk mempelajari dan mengoptimalkan pola aktivasi otot. Inilah sebabnya mengapa seorang pemula dalam latihan beban dapat menjadi lebih kuat bahkan sebelum ototnya terlihat membesar.

Perjalanan kita dalam bab ini akan dimulai dengan unit fungsional paling dasar dari kontrol gerak, yaitu unit motorik. Kita akan mempelajari bagaimana sistem saraf "merekrut" unit-unit motorik ini secara tertib melalui sebuah prinsip elegan yang dikenal sebagai Prinsip Ukuran, yang memungkinkan gradasi kekuatan yang halus, mulai dari sentuhan lembut hingga pengerahan tenaga maksimal. Kita juga akan menengok ke pusat komando di otak, yaitu korteks motorik,

untuk memahami bagaimana niat untuk bergerak diterjemahkan menjadi sinyal-sinyal listrik yang dikirim ke otot-otot spesifik.

Namun, kontrol gerak bukanlah jalan satu arah. Sistem saraf tidak hanya mengirimkan perintah, tetapi juga secara konstan menerima aliran informasi dari tubuh. Kita akan menjelajahi dunia proprioepsi, atau indra keenam tubuh, yang memungkinkan otak mengetahui posisi dan pergerakan anggota tubuh di dalam ruang. Kita akan membedah fungsi reseptor sensorik canggih di dalam otot dan tendon, seperti *muscle spindle* dan *Golgi tendon organ*, yang bertindak sebagai sistem pemantauan internal dan pelindung tubuh dari cedera.

Terakhir, kita akan mengkaji bagaimana sistem yang luar biasa ini beradaptasi terhadap latihan. Latihan bukan hanya membentuk otot, tetapi juga "melatih" sistem saraf. Peningkatan rekrutmen dan sinkronisasi unit motorik adalah contoh adaptasi neural yang mendasari peningkatan kekuatan dan efisiensi gerak. Sebaliknya, kita juga akan membahas bagaimana sistem saraf itu sendiri dapat mengalami kelelahan, sebuah konsep yang dikenal sebagai kelelahan saraf pusat, yang menyoroti bahwa batas performa tidak selalu terletak di dalam otot itu sendiri.

Bagi tenaga kesehatan, pemahaman tentang kontrol neuromuskular adalah krusial. Ini adalah dasar dari rehabilitasi stroke, pemulihan dari cedera ligamen, dan program latihan untuk meningkatkan keseimbangan pada lansia guna mencegah jatuh (Saputra et al., 2025). Dengan menguasai prinsip-prinsip dalam bab ini, Anda akan dapat melihat gerakan bukan hanya sebagai hasil kontraksi otot, tetapi sebagai dialog dinamis antara otak dan tubuh.

3.1. Organisasi Sistem Saraf Motorik

Sistem saraf motorik adalah hierarki kontrol yang canggih yang bertanggung jawab untuk memulai dan mengoordinasikan semua gerakan volunter (sadar). Di puncak hierarki ini adalah area asosiasi di korteks serebral dan ganglia basalis, yang bertanggung jawab untuk pembentukan niat dan strategi gerakan. Perintah-perintah ini kemudian disempurnakan dan dikoordinasikan oleh korteks motorik dan serebelum, yang merencanakan urutan dan waktu aktivasi otot yang tepat (Draper et al., 2024). Dari pusat-pusat yang lebih tinggi ini, sinyal-sinyal motorik turun melalui medula spinalis, di mana mereka mengaktifkan neuron motorik alfa, yang juga dikenal sebagai neuron motorik bawah.

Neuron motorik alfa inilah yang menjadi jalur keluaran akhir (*final common pathway*) dari sistem saraf pusat ke otot rangka. Setiap neuron motorik alfa memiliki akson yang keluar dari medula spinalis dan berjalan hingga ke otot targetnya. Di dalam otot, akson ini bercabang berkali-kali, di mana setiap cabang menginervasi satu serabut otot tunggal. Gabungan dari satu neuron motorik alfa dan semua serabut otot yang diinervasinya secara kolektif disebut sebagai unit motorik atau *motor unit* (Heckman & Enoka, 2012). Ini adalah unit fungsional terkecil dari kontrol motorik; ketika neuron motorik alfa menembakkan potensial aksi, semua serabut otot dalam unit motoriknya akan berkontraksi secara bersamaan, sebuah prinsip yang dikenal sebagai prinsip "semua atau tidak sama sekali" (*all-or-none*).

Ukuran unit motorik, yaitu jumlah serabut otot per neuron motorik, sangat bervariasi di seluruh tubuh dan mencerminkan tingkat presisi kontrol yang diperlukan. Otot-otot yang melakukan gerakan halus dan presisi, seperti otot-otot ekstraokular yang menggerakkan mata atau otot-otot di tangan, memiliki rasio inervasi yang kecil (misalnya, satu neuron hanya untuk 10-20 serabut otot). Sebaliknya, otot-otot besar

yang bertanggung jawab untuk gerakan kasar dan menghasilkan gaya besar, seperti otot gastrocnemius di betis, memiliki rasio inervasi yang besar (satu neuron dapat menginervasi ribuan serabut otot) (Draper et al., 2024).

Sistem saraf mengatur kekuatan kontraksi otot melalui dua mekanisme utama. Pertama adalah rekrutmen unit motorik, yaitu proses meningkatkan jumlah unit motorik yang aktif. Untuk menghasilkan gaya yang kecil, hanya beberapa unit motorik yang direkrut. Untuk menghasilkan gaya yang lebih besar, lebih banyak unit motorik direkrut. Mekanisme kedua adalah pengkodean laju (*rate coding*), di mana kekuatan kontraksi dapat ditingkatkan dengan meningkatkan frekuensi penembakan potensial aksi oleh neuron motorik yang sudah aktif. Peningkatan frekuensi ini menyebabkan kontraksi serabut otot yang berulang dan menyatu (sumasi), menghasilkan gaya yang lebih besar.

Proses rekrutmen unit motorik tidak terjadi secara acak, melainkan mengikuti urutan yang sangat dapat diprediksi yang dikenal sebagai Prinsip Ukuran (*Size Principle*) Henneman. Prinsip ini menyatakan bahwa unit motorik direkrut dalam urutan dari yang terkecil (memiliki badan sel neuron motorik terkecil dan menginervasi serabut otot Tipe I yang lebih lambat dan tahan lelah) ke yang terbesar (memiliki badan sel neuron motorik terbesar dan menginervasi serabut otot Tipe II yang lebih cepat dan kuat) (Heckman & Enoka, 2012). Urutan ini memungkinkan kontrol yang halus dan efisien, di mana unit-unit motorik yang tahan lelah digunakan untuk tugas-tugas berintensitas rendah, dan unit-unit motorik yang kuat tetapi mudah lelah hanya diaktifkan ketika benar-benar diperlukan.

Analogi: Bayangkan organisasi sistem saraf motorik seperti sebuah perusahaan. Korteks motorik adalah CEO yang menetapkan tujuan ("angkat kotak itu"). Manajer menengah (serebelum, ganglia basalis)

merencanakan strategi dan detailnya. Mereka kemudian mengirimkan perintah ke mandor-mandor di lapangan (neuron motorik alfa). Setiap mandor (neuron motorik) bertanggung jawab atas satu tim pekerja (serabut otot), membentuk sebuah "unit motorik". Untuk tugas ringan (mengangkat pensil), perusahaan hanya menugaskan satu atau dua tim kecil yang efisien (unit motorik kecil, Tipe I). Untuk tugas berat (mengangkat kotak berat), perusahaan akan memanggil semua tim kecil, menengah, dan akhirnya tim-tim terbesar yang paling kuat (unit motorik besar, Tipe IIX) untuk menyelesaikan pekerjaan. Ini adalah cerminan dari Prinsip Ukuran.

3.1.1. Struktur Motor Unit dan Prinsip Ukuran (Size Principle)

Sebuah unit motorik terdiri dari satu neuron motorik alfa dan semua serabut otot yang dipersarafinyal. Semua serabut otot dalam satu unit motorik memiliki tipe yang sama (semuanya Tipe I, Tipe IIA, atau Tipe IIX), sebuah fenomena yang dikenal sebagai homogenitas unit motorik (Draper et al., 2024). Badan sel neuron motorik alfa terletak di substansia grisea medula spinalis atau batang otak. Aksonnya, yang dilapisi mielin untuk konduksi sinyal yang cepat, membentang keluar hingga ke otot target. Di dekat otot, akson tersebut kehilangan selubung mielinnya dan bercabang menjadi banyak terminal akson, di mana masing-masing terminal membentuk sinapsis khusus dengan satu serabut otot, yang disebut persimpangan neuromuskular.

Prinsip Ukuran, yang dikemukakan oleh Elwood Henneman pada tahun 1960-an, adalah landasan pemahaman kita tentang rekrutmen otot. Prinsip ini menyatakan bahwa unit-unit motorik direkrut secara berurutan berdasarkan ukuran badan sel neuron motoriknya. Neuron motorik dengan badan sel kecil memiliki ambang eksitasi yang lebih rendah, artinya mereka hanya memerlukan input sinaptik yang lebih lemah untuk mencapai ambang batas dan menembakkan potensial aksi (Heckman & Enoka, 2012). Neuron-neuron kecil ini cenderung

menginervasi serabut otot Tipe I yang lambat. Seiring dengan meningkatnya kekuatan sinyal dari sistem saraf pusat (misalnya, ketika mencoba mengangkat beban yang lebih berat), neuron motorik yang semakin besar, dengan ambang eksitasi yang lebih tinggi, akan direkrut secara berurutan. Neuron motorik terbesar, yang menginervasi serabut otot Tipe IIX yang paling kuat, adalah yang terakhir direkrut dan yang pertama di-derecruit ketika gaya berkurang.

3.1.2. Peran Korteks Motorik dalam Koordinasi Gerak

Korteks motorik, yang terletak di lobus frontal otak, adalah pusat komando utama untuk gerakan volunter. Area ini dibagi lagi menjadi beberapa wilayah fungsional. Korteks motorik primer (M1) bertanggung jawab untuk eksekusi gerakan. Representasi tubuh di M1 diatur secara somatotopik, sering digambarkan sebagai *homunculus* motorik, di mana area kortikal yang lebih besar didedikasikan untuk bagian tubuh yang memerlukan kontrol motorik halus, seperti tangan dan wajah (Draper et al., 2024). Neuron-neuron di M1 mengkodekan parameter spesifik gerakan, seperti arah dan besarnya gaya yang akan dihasilkan.

Area motorik lainnya berperan dalam perencanaan dan persiapan gerakan. Area premotor dan area motorik suplementer (SMA) menerima input dari area asosiasi korteks dan ganglia basalis untuk merencanakan urutan gerakan yang kompleks dan mengoordinasikan gerakan bilateral (melibatkan kedua sisi tubuh). Serebelum, meskipun bukan bagian dari korteks, memainkan peran krusial sebagai pembanding. Ia menerima salinan rencana motorik dari korteks dan umpan balik sensorik dari otot dan sendi, kemudian membandingkan keduanya. Jika ada perbedaan antara gerakan yang diinginkan dan gerakan yang sebenarnya, serebelum mengirimkan sinyal koreksi kembali ke korteks motorik untuk memastikan gerakan yang mulus, akurat, dan terkoordinasi (Holdefer & Cohen, 2021).

3.1.3. Transmisi Sinaptik pada Neuromuscular Junction

Persimpangan neuromuskular (*neuromuscular junction*, NMJ) adalah sinapsis kimia khusus tempat terminal akson dari neuron motorik bertemu dengan membran sel serabut otot (sarkolema). Ketika potensial aksi dari neuron motorik tiba di terminal akson, ia memicu pembukaan kanal kalsium berpintu voltase. Masuknya ion kalsium (Ca^{2+}) ke dalam terminal akson menyebabkan vesikel-vesikel sinaptik, yang berisi neurotransmitter asetilkolin (ACh), untuk menyatu dengan membran presinaptik dan melepaskan ACh ke dalam celah sinaptik (Draper et al., 2024).

Molekul-molekul ACh kemudian berdifusi melintasi celah sinaptik dan mengikat reseptor ACh nikotinik yang terletak di area khusus sarkolema yang disebut *motor end plate*. Pengikatan ini membuka kanal ion, memungkinkan ion natrium (Na^{+}) masuk ke dalam serabut otot lebih cepat daripada ion kalium (K^{+}) keluar. Aliran masuk Na^{+} yang cepat ini menyebabkan depolarisasi lokal pada *motor end plate*, yang disebut potensial *end-plate* (EPP). Jika EPP ini cukup kuat untuk mencapai ambang batas, ia akan memicu potensial aksi yang menyebar di sepanjang sarkolema dan turun ke tubulus T, memulai proses *excitation-contraction coupling* yang dibahas di Bab 2 (Cheng & Place, 2022). Transmisi sinaptik ini adalah proses yang sangat andal; setiap potensial aksi tunggal di neuron motorik biasanya cukup untuk menghasilkan potensial aksi di serabut otot.

3.2. Reseptor Sensorik dan Proprioepsi

Kontrol gerakan yang efektif memerlukan lebih dari sekadar perintah motorik dari otak ke otot. Sistem saraf pusat harus terus menerus menerima informasi tentang keadaan sistem muskuloskeletal. Proses ini, yang dikenal sebagai umpan balik sensorik, sangat bergantung pada proprioepsi. Proprioepsi sering disebut sebagai "indra posisi" atau "indra kinestetik", yaitu kemampuan sistem saraf untuk

merasakan posisi, orientasi, dan gerakan tubuh serta bagian-bagiannya tanpa bergantung pada penglihatan (Riemann & Lephart, 2002). Indra ini dimungkinkan oleh berbagai reseptor sensorik khusus, yang disebut proprioseptor, yang terletak di otot, tendon, sendi, dan kulit.

Dua proprioseptor yang paling penting dalam otot rangka adalah *muscle spindle* (gelendong otot) dan *Golgi tendon organ* (GTO). Reseptor-reseptor ini berfungsi sebagai sensor internal yang memberikan informasi real-time kepada sistem saraf pusat. *Muscle spindle* mendeteksi perubahan panjang otot dan kecepatan perubahan panjang tersebut, sementara GTO mendeteksi perubahan tegangan atau gaya yang dihasilkan oleh otot. Informasi dari kedua reseptor ini berjalan melalui neuron sensorik aferen ke medula spinalis, di mana ia dapat memicu refleks spinal sederhana atau dikirim ke pusat-pusat yang lebih tinggi di otak, seperti serebelum dan korteks somatosensorik, untuk pemrosesan lebih lanjut (Draper et al., 2024).

Integrasi informasi proprioseptif ini sangat penting untuk berbagai fungsi. Pertama, ini memungkinkan kontrol motorik yang halus dan terkoordinasi. Otak menggunakan umpan balik proprioseptif untuk secara konstan menyesuaikan perintah motoriknya, memastikan bahwa gerakan yang dihasilkan sesuai dengan yang diinginkan. Kedua, propriosepsi memainkan peran protektif yang vital. Refleks-refleks yang dimediasi oleh *muscle spindle* dan GTO membantu mencegah otot meregang berlebihan atau menghasilkan gaya yang dapat merusak.

Ketiga, propriosepsi sangat penting untuk menjaga keseimbangan dan postur. Sistem saraf pusat mengintegrasikan input proprioseptif dari seluruh tubuh dengan informasi dari sistem vestibular (keseimbangan) di telinga dalam dan sistem visual untuk mempertahankan postur tubuh yang stabil. Ketika propriosepsi terganggu, seperti setelah

cedera ligamen pergelangan kaki, risiko ketidakstabilan dan cedera ulang meningkat secara signifikan.

Oleh karena itu, pelatihan yang secara spesifik menantang sistem proprioseptif menjadi komponen kunci dalam banyak program rehabilitasi dan pencegahan cedera. Latihan-latihan yang dilakukan pada permukaan yang tidak stabil atau dengan mata tertutup memaksa sistem saraf untuk lebih mengandalkan dan menyempurnakan penggunaan umpan balik proprioseptif untuk mengontrol gerakan (Riemann & Lephart, 2002). Meningkatkan kesadaran dan kontrol proprioseptif tidak hanya penting untuk atlet dalam melakukan keterampilan olahraga yang kompleks tetapi juga untuk populasi umum, terutama lansia, dalam melakukan aktivitas sehari-hari dengan aman.

Contoh Kasus: Seorang pemain bola basket mendarat dengan canggung setelah melompat dan mengalami keseleo pada pergelangan kakinya. Cedera ini tidak hanya merusak ligamen tetapi juga merusak banyak proprioseptor di dalam ligamen dan kapsul sendi tersebut. Akibatnya, bahkan setelah ligamen sembuh, pemain tersebut merasa pergelangan kakinya "tidak stabil" dan sering kali hampir terkilir lagi. Program fisioterapinya mencakup latihan keseimbangan di atas papan goyang (*wobble board*). Latihan ini secara sengaja menciptakan lingkungan yang tidak stabil, memaksa sistem neuromuskularnya untuk "melatih kembali" dan meningkatkan penggunaan umpan balik dari proprioseptor yang tersisa (terutama *muscle spindle* dan GTO di otot-otot sekitar pergelangan kaki) untuk menstabilkan sendi secara dinamis.

3.2.1. Fungsi Muscle Spindle dalam Refleks Regang

Muscle spindle adalah reseptor regangan yang kompleks yang terletak tersebar di antara serabut otot rangka utama (disebut serabut ekstrasusal). Setiap *spindle* terdiri dari beberapa serabut otot termodifikasi yang disebut serabut intrafusal, yang terbungkus dalam kapsul jaringan ikat. *Spindle* ini berorientasi sejajar dengan serabut ekstrasusal, sehingga ketika otot diregangkan, *spindle* juga ikut meregang (Draper et al., 2024). Peregangan ini mengaktifkan ujung saraf sensorik yang melilit bagian tengah serabut intrafusal, menyebabkan mereka mengirimkan potensial aksi ke medula spinalis.

Fungsi utama *muscle spindle* adalah untuk memulai refleks regang (*stretch reflex*). Ketika otot diregangkan secara tiba-tiba, *muscle spindle* mengirim sinyal aferen yang kuat ke medula spinalis. Di sana, neuron sensorik secara langsung bersinapsis dengan dan merangsang neuron motorik alfa yang mempersarafi otot yang sama (otot agonis), menyebabkan otot tersebut berkontraksi. Kontraksi refleksif ini melawan peregangan, berfungsi sebagai mekanisme protektif untuk mencegah otot meregang terlalu jauh dan terlalu cepat (Holdefer & Cohen, 2021). Contoh klasik dari refleks regang adalah refleks patela atau *knee-jerk reflex*, di mana ketukan pada tendon patela meregangkan otot paha depan (*quadriceps*), memicu kontraksi refleksif dari otot tersebut.

3.2.2. Peran Golgi Tendon Organ (GTO) dalam Proteksi Otot

Golgi Tendon Organ (GTO) adalah proprioseptor yang terletak di persimpangan antara otot dan tendonnya. Berbeda dengan *muscle spindle* yang terletak sejajar, GTO terletak secara seri dengan serabut otot. Posisi ini membuatnya sangat sensitif terhadap perubahan tegangan atau gaya di dalam otot, baik yang disebabkan oleh peregangan pasif maupun kontraksi aktif. Faktanya, GTO jauh lebih

sensitif terhadap tegangan yang dihasilkan oleh kontraksi otot daripada tegangan dari peregangan pasif (Draper et al., 2024).

Ketika tegangan di dalam otot meningkat secara signifikan, GTO akan teraktivasi dan mengirimkan sinyal melalui neuron sensorik aferen ke medula spinalis. Di medula spinalis, neuron sensorik ini merangsang interneuron penghambat (*inhibitory interneuron*). Interneuron ini kemudian menghambat neuron motorik alfa yang mempersarafi otot yang sedang berkontraksi (otot agonis), menyebabkan otot tersebut rileks. Proses ini disebut inhibisi autogenik. Fungsi utama GTO adalah untuk mengatur tegangan otot dan bertindak sebagai mekanisme protektif untuk mencegah otot menghasilkan gaya yang berlebihan yang dapat merusak tendon atau otot itu sendiri (Chalmers, 2017).

3.2.3. Pelatihan Proprioseptif untuk Rehabilitasi Cedera

Pelatihan proprioseptif adalah modalitas terapi yang bertujuan untuk meningkatkan kemampuan sistem neuromuskular dalam menstabilkan sendi dan mengontrol posisi anggota tubuh. Pelatihan ini menjadi sangat penting setelah cedera, terutama cedera sendi seperti keseleo pergelangan kaki atau robekan ligamen lutut (ACL), karena cedera tersebut seringkali merusak mekanoreseptor dan mengganggu jalur umpan balik proprioseptif (Riemann & Lephart, 2002). Gangguan ini dapat menyebabkan ketidakstabilan fungsional dan meningkatkan risiko cedera berulang, bahkan setelah integritas struktural sendi pulih.

Program pelatihan proprioseptif biasanya melibatkan serangkaian latihan yang secara progresif menantang kemampuan tubuh untuk menjaga keseimbangan dan kontrol sendi. Latihan ini seringkali dimulai dengan berdiri pada satu kaki di permukaan yang stabil, kemudian berlanjut ke permukaan yang tidak stabil seperti papan keseimbangan, cakram busa, atau bola BOSU. Tujuannya adalah untuk memaksa sistem saraf pusat menjadi lebih sensitif dan responsif

terhadap input proprioseptif yang tersedia, sehingga meningkatkan ko-kontraksi otot-otot di sekitar sendi untuk memberikan stabilitas dinamis (Cendrawasih et al., 2025). Pelatihan ini terbukti efektif dalam memulihkan fungsi, meningkatkan kepercayaan diri pasien, dan mengurangi tingkat cedera ulang.

3.3. Adaptasi Neural terhadap Latihan

Ketika seseorang memulai program latihan kekuatan, peningkatan kekuatan yang paling dramatis seringkali terjadi dalam beberapa minggu pertama, jauh sebelum terjadi peningkatan ukuran otot (hipertrofi) yang signifikan. Peningkatan awal ini hampir seluruhnya disebabkan oleh adaptasi dalam sistem saraf, yang dikenal sebagai adaptasi neural (Draper et al., 2024). Pada dasarnya, sistem saraf menjadi lebih baik dalam "menggunakan" otot yang sudah ada. Latihan kekuatan bertindak sebagai proses pembelajaran bagi sistem saraf motorik, mengoptimalkan cara otak dan medula spinalis merekrut dan mengontrol unit-unit motorik untuk menghasilkan gaya secara lebih efisien dan efektif.

Salah satu adaptasi neural utama adalah peningkatan kemampuan untuk merekrut unit motorik. Individu yang tidak terlatih seringkali tidak dapat secara sadar mengaktifkan semua unit motorik mereka, terutama unit-unit motorik terbesar (Tipe IIx) yang memiliki ambang rekrutmen tertinggi. Melalui latihan dengan beban berat, sistem saraf pusat belajar untuk menghasilkan sinyal motorik yang lebih kuat, yang memungkinkannya untuk merekrut lebih banyak unit motorik, termasuk unit-unit motorik berambang tinggi yang sebelumnya "tertidur" (Škarabot et al., 2021). Kemampuan untuk mengaktifkan persentase yang lebih besar dari massa otot yang tersedia secara langsung berarti peningkatan produksi gaya maksimal.

Adaptasi penting lainnya adalah peningkatan sinkronisasi unit motorik. Sinkronisasi mengacu pada kecenderungan unit-unit motorik yang berbeda untuk menembakkan potensial aksi pada waktu yang kurang lebih bersamaan. Pada gerakan yang membutuhkan produksi gaya yang cepat dan eksplosif, peningkatan sinkronisasi memungkinkan kontraksi dari banyak unit motorik untuk menyatu secara temporal, menghasilkan puncak gaya yang lebih besar dalam waktu yang lebih singkat (Škarabot et al., 2021). Ini seperti sekelompok pendayung yang pada awalnya mendayung sedikit tidak sinkron, kemudian belajar untuk menyatukan kayuhan mereka secara sempurna untuk menghasilkan dorongan perahu yang paling kuat.

Selain itu, latihan kekuatan juga dapat mengurangi tingkat inhibisi dari sistem saraf. Mekanisme protektif, seperti yang dimediasi oleh *Golgi tendon organ* (GTO), dapat secara refleks menghambat produksi gaya untuk mencegah cedera. Latihan yang konsisten dapat menurunkan sensitivitas refleks penghambat ini (inhibisi autogenik), memungkinkan otot untuk berkontraksi lebih kuat sebelum GTO mengirimkan sinyal inhibisi (Draper et al., 2024). Adaptasi ini, bersama dengan peningkatan laju penembakan unit motorik dan perbaikan koordinasi antara otot agonis dan antagonis (ko-aktivasi yang lebih efisien), secara kolektif berkontribusi pada peningkatan kekuatan dan performa yang diamati pada tahap awal latihan.

Namun, sistem saraf juga bisa menjadi lokasi kelelahan. Kelelahan saraf pusat (*central fatigue*) adalah kegagalan untuk mempertahankan produksi gaya yang disebabkan oleh proses-proses proksimal dari persimpangan neuromuskular. Ini didefinisikan sebagai penurunan dorongan volunter atau eksitasi dari sistem saraf pusat ke otot (Taylor et al., 2016). Selama latihan yang berkepanjangan atau sangat intens, perubahan dalam lingkungan biokimia otak (misalnya, perubahan neurotransmiter seperti serotonin dan dopamin) dapat mengurangi kemampuan korteks motorik untuk mengirimkan sinyal motorik yang

optimal. Ini berarti bahwa meskipun otot itu sendiri mungkin masih mampu berkontraksi, "sinyal untuk pergi" dari otak melemah, yang mengakibatkan penurunan performa. Memahami peran adaptasi dan kelelahan neural sangat penting untuk merancang program latihan yang memaksimalkan peningkatan kekuatan sambil mengelola kelelahan secara efektif.

Analogi: Bayangkan sistem neuromuskular Anda seperti sebuah mobil. Otot adalah mesinnya, dan sistem saraf adalah pengemudinya. Ketika seorang pengemudi pemula (individu tidak terlatih) pertama kali mengendarai mobil sport yang kuat (otot), ia mungkin tidak tahu cara menggunakan semua tenaganya. Ia ragu-ragu menginjak gas dan tidak bisa mengoper gigi dengan mulus. Adaptasi neural adalah seperti pengemudi tersebut yang mengikuti kursus mengemudi tingkat lanjut. Ia belajar untuk menginjak gas hingga penuh (peningkatan rekrutmen), mengoper gigi pada waktu yang tepat (peningkatan sinkronisasi), dan menjadi kurang takut untuk mendorong mobil hingga batasnya (penurunan inhibisi). Mobil (otot) itu sendiri tidak berubah, tetapi pengemudi (sistem saraf) menjadi jauh lebih terampil dalam mengeluarkan potensi penuh dari mesin tersebut.

3.3.1. Peningkatan Rekrutmen Unit Motorik

Salah satu adaptasi neural yang paling fundamental terhadap latihan kekuatan adalah peningkatan kemampuan sistem saraf pusat untuk merekrut unit motorik, terutama yang berambang batas tinggi (Tipe II). Pada individu yang tidak terlatih, dorongan motorik maksimal dari korteks seringkali tidak cukup kuat untuk mengaktifkan semua unit motorik yang tersedia di dalam otot. Latihan beban, khususnya yang menggunakan beban mendekati maksimal, secara berulang kali menantang sistem saraf untuk menghasilkan tingkat eksitasi yang sangat tinggi (Škarabot et al., 2021). Paparan berulang ini diyakini dapat meningkatkan efisiensi sinaptik di sepanjang jalur motorik

kortikospinal, yang pada dasarnya "memperkuat" sinyal dari otak ke medula spinalis.

Peningkatan kemampuan rekrutmen ini berarti bahwa untuk setiap upaya volunter maksimal, persentase yang lebih besar dari total serabut otot dapat berkontribusi pada produksi gaya. Hal ini secara langsung mengarah pada peningkatan kekuatan tanpa adanya perubahan pada ukuran otot itu sendiri. Teknik seperti elektromiografi (EMG) permukaan dapat digunakan untuk mengukur aktivitas listrik total di otot, dan penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa setelah periode latihan kekuatan, tingkat aktivasi EMG maksimal meningkat, yang mencerminkan peningkatan rekrutmen unit motorik (Draper et al., 2024).

3.3.2. Sinkronisasi Unit Motorik dan Efisiensi Gerak

Selain merekrut lebih banyak unit motorik, latihan juga meningkatkan cara unit-unit motorik tersebut diaktifkan secara bersamaan. Sinkronisasi unit motorik mengacu pada penembakan potensial aksi yang bersamaan atau berdekatan waktunya dari beberapa unit motorik yang berbeda. Tingkat sinkronisasi yang lebih tinggi sangat bermanfaat untuk tugas-tugas yang memerlukan pengembangan gaya yang cepat dan eksplosif, seperti angkat berat atau melompat, karena memungkinkan puncak gaya dari banyak unit motorik untuk menyatu (Škarabot et al., 2021). Latihan balistik dan pliometrik secara khusus dianggap efektif dalam meningkatkan sinkronisasi unit motorik.

Efisiensi gerak juga meningkat melalui perbaikan koordinasi intermuskular. Ini melibatkan peningkatan aktivasi otot-otot agonis dan sinergis (otot-otot yang membantu gerakan) serta penurunan aktivasi otot-otot antagonis (otot-otot yang menentang gerakan). Pada pemula, sering terjadi ko-aktivasi antagonis yang berlebihan, di mana otot antagonis berkontraksi secara tidak perlu, yang pada dasarnya

bekerja melawan gerakan yang diinginkan. Melalui latihan, sistem saraf belajar untuk mengurangi aktivasi antagonis ini, sehingga menghasilkan gerakan yang lebih halus, lebih efisien, dan lebih kuat (Draper et al., 2024).

3.3.3. Mekanisme Kelelahan Saraf Pusat (Central Fatigue)

Kelelahan tidak hanya terjadi di dalam otot (kelelahan perifer), tetapi juga di dalam sistem saraf pusat. Kelelahan saraf pusat (*central fatigue*) didefinisikan sebagai penurunan progresif dalam kemampuan untuk mengaktifkan otot secara volunter selama aktivitas fisik (Taylor et al., 2016). Dengan kata lain, otak atau medula spinalis menjadi kurang mampu mengirimkan sinyal "pergi" yang adekuat ke otot-otot. Hal ini dapat dibuktikan di laboratorium dengan menggunakan teknik stimulasi saraf transkranial atau perifer selama kontraksi volunter maksimal. Jika stimulasi eksternal ini dapat menghasilkan gaya tambahan, ini menunjukkan bahwa sistem penggerak volunter tidak sepenuhnya mengaktifkan otot, yang merupakan tanda adanya kelelahan sentral.

Mekanisme yang mendasari kelelahan sentral bersifat multifaktorial dan kompleks. Perubahan pada konsentrasi neurotransmitter di otak, seperti peningkatan serotonin dan penurunan dopamin, telah dihipotesiskan dapat mengurangi gairah dan motivasi motorik. Akumulasi amonia dalam darah selama latihan yang berkepanjangan juga dapat mengganggu fungsi otak. Selain itu, umpan balik aferen dari otot yang lelah (melalui serabut saraf Tipe III/IV) dapat secara refleks menghambat output neuron motorik di medula spinalis (Taylor et al., 2016). Kelelahan sentral menyyoroti bahwa batas performa manusia adalah interaksi yang rumit antara faktor-faktor fisiologis dan psikologis.

Rangkuman Bab

- Kontrol neuromuskular adalah studi tentang bagaimana sistem saraf mengendalikan otot. Unit fungsional dasarnya adalah unit motorik, yang terdiri dari satu neuron motorik alfa dan semua serabut otot yang diinervasinya.
- Kekuatan otot diatur melalui rekrutmen unit motorik dan pengkodean laju. Rekrutmen mengikuti Prinsip Ukuran (*Size Principle*), dari unit terkecil (Tipe I) ke terbesar (Tipe II).
- Gerakan volunter direncanakan dan dikoordinasikan oleh area-area di otak, termasuk korteks motorik, dan sinyal ditransmisikan ke otot melalui asetilkolin di persimpangan neuromuskular.
- Propriosepsi, atau indra posisi tubuh, sangat penting untuk kontrol gerak dan dimediasi oleh reseptor sensorik seperti *muscle spindle* dan *Golgi tendon organ* (GTO).
- *Muscle spindle* mendeteksi regangan dan memicu refleks regang untuk kontraksi, sementara GTO mendeteksi tegangan dan memicu inhibisi autogenik untuk relaksasi.
- Peningkatan kekuatan awal dari latihan terutama disebabkan oleh adaptasi neural, bukan hipertrofi otot.
- Adaptasi neural utama meliputi peningkatan rekrutmen dan sinkronisasi unit motorik, serta penurunan inhibisi dari mekanisme protektif.
- Kelelahan saraf pusat (*central fatigue*) adalah penurunan kemampuan untuk mengaktifkan otot secara volunter yang berasal dari sistem saraf pusat, dan merupakan faktor pembatas performa selain kelelahan otot perifer.

Latihan Mahasiswa

Soal Esai

1. Jelaskan Prinsip Ukuran (*Size Principle*) Henneman. Mengapa prinsip ini dianggap sebagai mekanisme yang efisien secara metabolik untuk mengontrol kekuatan otot?
2. Bandingkan dan kontraskan fungsi *muscle spindle* dan *Golgi tendon organ* (GTO). Jelaskan bagaimana kedua reseptor ini bekerja sama untuk melindungi sistem muskuloskeletal dari cedera.
3. Seorang teman Anda mengklaim bahwa ia menjadi 20% lebih kuat dalam latihan *leg press* setelah hanya dua minggu berlatih. Mengingat bahwa hipertrofi otot yang signifikan membutuhkan waktu lebih lama, jelaskan tiga adaptasi neural spesifik yang kemungkinan besar bertanggung jawab atas peningkatan kekuatannya yang cepat.
4. Gambarkan proses transmisi sinyal dari neuron motorik ke serabut otot di persimpangan neuromuskular. Sebutkan neurotransmitter kunci dan ion-ion yang terlibat dalam proses ini.
5. Definisikan kelelahan saraf pusat. Bagaimana seorang ilmuwan dapat secara eksperimental membedakan antara kelelahan yang berasal dari sistem saraf pusat dengan kelelahan yang berasal dari otot itu sendiri (perifer)?

Soal Pilihan Ganda

1. Satu neuron motorik alfa dan semua serabut otot yang diinervasinya secara kolektif disebut...
 - A. Miofibril
 - B. Sarkomer
 - C. Unit motorik -V-
 - D. Sinapsis
2. Menurut Prinsip Ukuran, unit motorik manakah yang direkrut pertama kali selama kontraksi volunter?
 - A. Unit motorik yang terbesar
 - B. Unit motorik yang menginervasi serabut Tipe IIx
 - C. Unit motorik yang terkecil dengan ambang eksitasi terendah -V-
 - D. Rekrutmen terjadi secara acak
3. Reseptor sensorik yang mendeteksi perubahan panjang otot dan kecepatan peregangan adalah...
 - A. Golgi tendon organ
 - B. Muscle spindle -V-
 - C. Reseptor Pacinian
 - D. Nociceptor
4. Pelepasan neurotransmitter apa di persimpangan neuromuskular yang memulai kontraksi otot rangka?
 - A. Serotonin
 - B. Dopamin
 - C. Asetilkolin -V-
 - D. Noradrenalin

5. Refleks protektif yang menyebabkan otot rileks sebagai respons terhadap tegangan yang sangat tinggi disebut...
 - A. Refleks regang
 - B. Inhibisi autogenik -V-
 - C. Refleks fleksor
 - D. Refleks ekstensor silang

6. Peningkatan kekuatan yang diamati selama beberapa minggu pertama latihan beban terutama disebabkan oleh...
 - A. Hipertrofi otot
 - B. Hiperplasia otot
 - C. Adaptasi neural -V-
 - D. Peningkatan simpanan ATP

7. Area otak yang bertanggung jawab utama untuk eksekusi gerakan volunter adalah...
 - A. Serebelum
 - B. Ganglia basalis
 - C. Korteks motorik primer -V-
 - D. Hipotalamus

8. Penembakan potensial aksi yang bersamaan dari beberapa unit motorik untuk memaksimalkan produksi gaya disebut...
 - A. Rekrutmen
 - B. Pengkodean laju
 - C. Sinkronisasi -V-
 - D. Sumasi

9. Pelatihan di atas papan keseimbangan (*wobble board*) secara spesifik dirancang untuk meningkatkan...
 - A. Kekuatan maksimal
 - B. Ukuran otot
 - C. Kapasitas aerobik
 - D. Proprioepsi -V-

10. Penurunan kemampuan untuk mengaktifkan otot secara volunter yang berasal dari otak atau medula spinalis disebut...
 - A. Kelelahan perifer
 - B. Kelelahan saraf pusat -V-
 - C. Asidosis otot
 - D. Deplesi glikogen

Studi Kasus atau Tugas Kontekstual

1. Seorang pasien yang sedang menjalani pemulihan dari stroke mengalami kesulitan dalam melakukan gerakan motorik halus dengan tangannya, meskipun kekuatan otot kasarnya tampak tidak terlalu terpengaruh. Berdasarkan pemahaman Anda tentang organisasi unit motorik dan representasi kortikal (*homunculus* motorik), jelaskan mengapa kontrol motorik halus seringkali lebih rentan terhadap kerusakan otak dibandingkan gerakan kasar. Sarankan jenis aktivitas atau terapi yang dapat membantu melatih kembali kontrol neuromuskular pada tangan pasien tersebut.

Glosarium Bab

- **Asetilkolin (ACh):** Neurotransmitter yang dilepaskan oleh neuron motorik di persimpangan neuromuskular untuk merangsang kontraksi otot.
- **Golgi Tendon Organ (GTO):** Reseptor sensorik yang terletak di tendon yang mendeteksi tegangan otot dan memediasi inhibisi autogenik.
- **Inhibisi Autogenik:** Relaksasi refleksif pada otot setelah mengalami tegangan tinggi, dimediasi oleh GTO.
- **Kelelahan Saraf Pusat (Central Fatigue):** Bentuk kelelahan yang disebabkan oleh penurunan dorongan motorik volunter dari sistem saraf pusat.
- **Korteks Motorik:** Area di korteks serebral yang terlibat dalam perencanaan, kontrol, dan eksekusi gerakan volunter.
- **Muscle Spindle:** Reseptor sensorik di dalam otot yang mendeteksi perubahan panjang otot dan memediasi refleks regang.
- **Persimpangan Neuromuskular (Neuromuscular Junction):** Titik sinapsis antara terminal akson neuron motorik dan serabut otot.
- **Prinsip Ukuran (Size Principle):** Prinsip yang menyatakan bahwa unit motorik direkrut secara berurutan dari yang terkecil hingga yang terbesar.
- **Propriosepsi:** Kemampuan sistem saraf untuk merasakan posisi, lokasi, orientasi, dan gerakan tubuh dan bagian-bagiannya.
- **Unit Motorik (Motor Unit):** Terdiri dari satu neuron motorik alfa dan semua serabut otot yang diinervasinya; unit fungsional dasar dari kontrol motorik.

Daftar Pustaka Bab

- Cendrawasih, J., 161, N., Sikambing, S., Sunggal, K., & Otot, K. (2025). Penerapan Terapi Range Of Motion (ROM) Pada Pasien Stroke Iskemik Di Wilayah Kerja UPT Pusmas Medan Sunggal. *Jurnal Praba : Jurnal Rumpun Kesehatan Umum*. <https://doi.org/10.62027/praba.v3i3.548>
- Chalmers, G. (2017). Do Golgi tendon organs really inhibit muscle activity at high force levels to save muscles from injury? A different view of proprioception. *Journal of Exercise Science and Fitness*, 15(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2017.03.001>
- Cheng, A. J., & Place, N. (2022). The intricacies of excitation–contraction coupling and neuromuscular transmission in skeletal muscle fatigue. *Journal of Physiology*, 600(5), 1133-1147. <https://doi.org/10.1113/JP281987>
- Draper, N., Williams, C., & Marshall, H. (2024). *Exercise Physiology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003109280>
- Heckman, C. J., & Enoka, R. M. (2012). Motor unit. *Comprehensive Physiology*, 2(4), 2629–2682. <https://doi.org/10.1002/cphy.c100087>
- Holdefer, R. N., & Cohen, L. G. (2021). Motor cortex physiology and plasticity. *Handbook of Clinical Neurology*, 184, 151-167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819410-2.00010-3>
- Riemann, B. L., & Lephart, S. M. (2002). The sensorimotor system, part I: the physiologic basis of proprioception. *Journal of Athletic Training*, 37(1), 71–81.
- Saputra, R., Zulfikar, Z., & Fadhal, M. (2025). Edukasi perawatan fleksibilitas dan keseimbangan tubuh pada lansia di Posyandu Lansia, Way Sulan Tanjung Bintang. *JOURNAL*

OF Public Health Concerns.
<https://doi.org/10.56922/phc.v4i5.540>

- Škarabot, J., Brownstein, C. G., & Casolo, A. (2021). The role of neural adaptations in force-production with chronic resistance training. *International Journal of Sports Medicine*, 42(05), 387-397. <https://doi.org/10.1055/a-1288-5131>
- Taylor, J. L., Amann, M., Duchateau, J., Meeusen, R., & Rice, C. L. (2016). Neural contributions to muscle fatigue: from the brain to the muscle and back again. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(11), 2294–2306. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000923>

BAB 4

FISIOLOGI SISTEM KARDIOVASKULAR SAAT LATIHAN

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- Menjelaskan perubahan dinamis pada denyut jantung (HR) dan volume sekuncup (SV) dari kondisi istirahat hingga latihan maksimal.
- Menganalisis respons curah jantung (CO) terhadap peningkatan intensitas latihan dan faktor-faktor yang memengaruhinya.
- Menguraikan peran Mekanisme Frank-Starling dalam mengoptimalkan kekuatan kontraksi jantung selama aktivitas fisik.
- Menjelaskan proses redistribusi aliran darah sistemik menuju otot-otot yang aktif saat berolahraga.
- Membedakan respons tekanan darah terhadap latihan dinamis (aerobik) dan latihan statis (isometrik).
- Mengidentifikasi adaptasi kardiovaskular kronis akibat latihan ketahanan, termasuk konsep "jantung atlet" atau *athletic heart*.
- Menganalisis mekanisme fisiologis yang mendasari penurunan denyut jantung istirahat (bradikardia) pada individu yang terlatih.

Pendahuluan

Letakkan jari Anda di pergelangan tangan atau leher Anda dan rasakan denyut nadi Anda. Setiap denyutan adalah bukti dari kerja tanpa henti sistem kardiovaskular, sebuah jaringan transportasi biologis yang luar biasa. Sistem ini, yang terdiri dari jantung, pembuluh darah, dan darah, bertanggung jawab untuk mengirimkan oksigen dan nutrisi ke setiap sel di tubuh Anda sambil membuang produk sisa metabolik. Dalam keadaan istirahat, sistem ini beroperasi dengan efisiensi yang tenang. Namun, saat Anda mulai berolahraga, sistem ini harus bertransformasi secara dramatis dari jalan pedesaan yang sepi menjadi jalan tol super sibuk dengan delapan lajur.

Kemampuan sistem kardiovaskular untuk merespons dan beradaptasi terhadap tuntutan latihan adalah salah satu penentu paling kritis dari performa fisik dan kesehatan secara keseluruhan. Pernahkah Anda bertanya mengapa seorang atlet dapat mempertahankan upaya intensitas tinggi untuk waktu yang lama, sementara individu yang tidak terlatih merasa kehabisan napas hanya dengan menaiki beberapa anak tangga? Jawabannya sebagian besar terletak pada kapasitas dan efisiensi sistem kardiovaskular mereka. Memahami bagaimana jantung dan pembuluh darah merespons tantangan fisik adalah inti dari fisiologi olahraga terapan.

Bab ini akan membawa kita ke dalam jantung dari sistem sirkulasi. Kita akan mulai dengan memeriksa respons akut jantung terhadap aktivitas fisik. Kita akan membedah bagaimana dua variabel kunci, denyut jantung dan volume sekuncup, berinteraksi untuk secara drastis meningkatkan curah jantung, yaitu jumlah total darah yang dipompa oleh jantung setiap menitnya. Kita juga akan mengeksplorasi sebuah prinsip rekayasa yang elegan dalam desain jantung, yang dikenal sebagai Mekanisme Frank-Starling, yang memungkinkan jantung

untuk berkontraksi lebih kuat justru ketika ia diisi dengan lebih banyak darah.

Selanjutnya, kita akan beralih dari pompa pusat ke jaringan distribusinya. Tubuh memiliki jumlah darah yang terbatas, jadi selama latihan, ia harus membuat "keputusan" cerdas tentang ke mana harus mengalirkannya. Kita akan mempelajari proses redistribusi hemodinamik yang luar biasa, di mana aliran darah dialihkan dari organ-organ yang kurang aktif, seperti sistem pencernaan, dan diarahkan secara masif ke otot-otot rangka yang haus akan oksigen. Kita akan membahas peran regulator lokal, seperti oksida nitrat, dalam mengatur manuver logistik yang kompleks ini dan bagaimana tekanan darah diatur untuk memastikan perfusi yang adekuat ke seluruh tubuh.

Seperti sistem lainnya dalam fisiologi, paparan berulang terhadap stres latihan akan memicu adaptasi jangka panjang yang luar biasa. Bagian akhir dari bab ini akan membahas adaptasi kardiovaskular kronis yang merupakan ciri khas dari kebugaran ketahanan. Kita akan membahas fenomena "jantung atlet" atau *athletic heart*, sebuah kondisi hipertrofi fisiologis yang membuat jantung menjadi pompa yang lebih besar dan lebih efisien. Adaptasi ini, bersama dengan peningkatan volume plasma, memungkinkan tercapainya ciri paling terkenal dari seorang atlet ketahanan, yaitu denyut jantung istirahat yang sangat rendah atau bradikardia atlet.

Bagi tenaga kesehatan, materi dalam bab ini sangat fundamental. Penyakit kardiovaskular tetap menjadi penyebab utama morbiditas dan mortalitas di seluruh dunia, dan latihan fisik adalah salah satu intervensi paling efektif untuk pencegahan dan rehabilitasinya (Fadila & Solihah, 2022). Memahami respons dan adaptasi kardiovaskular memungkinkan praktisi untuk meresepkan latihan dengan aman, memantau kemajuan pasien, dan mengedukasi mereka tentang manfaat mendalam dari gaya hidup aktif.

4.1. Respon Jantung terhadap Aktivitas Fisik

Jantung adalah pusat dari sistem kardiovaskular, berfungsi sebagai pompa berotot yang tak kenal lelah. Tugas utamanya selama latihan adalah untuk meningkatkan pengiriman darah beroksigen ke otot-otot yang bekerja untuk memenuhi permintaan metabolik mereka yang meroket. Jantung mencapai ini dengan menyesuaikan dua variabel fundamental: denyut jantung (*Heart Rate*, HR), yaitu jumlah detak per menit, dan volume sekuncup (*Stroke Volume*, SV), yaitu jumlah darah yang dipompa keluar dari ventrikel kiri dengan setiap detak. Produk dari kedua variabel ini adalah curah jantung (*Cardiac Output*, CO), yang mewakili volume total darah yang dipompa oleh jantung per menit ($CO = HR \times SV$) (Draper et al., 2024).

Saat transisi dari istirahat ke olahraga, curah jantung meningkat secara dramatis. Peningkatan awal yang cepat ini dimediasi oleh dua mekanisme neural. Pertama, terjadi penarikan cepat aktivitas parasimpatis (melalui saraf vagus), yang secara normal memperlambat denyut jantung saat istirahat. Penghapusan "rem" vagal ini memungkinkan denyut jantung meningkat dengan cepat. Kedua, terjadi peningkatan simultan dalam aktivitas sistem saraf simpatis, yang melepaskan katekolamin (epinefrin dan norepinefrin) yang bekerja pada jantung untuk meningkatkan denyut jantung dan kekuatan kontraksi (kontraktilitas) (Hellsten & Nyberg, 2022).

Denyut jantung meningkat secara linear dengan peningkatan intensitas latihan hingga mencapai nilai maksimal yang diperkirakan (denyut jantung maksimal atau HRmax), yang sebagian besar ditentukan oleh usia (sering diperkirakan sebagai $220 - \text{usia}$). Respons volume sekuncup sedikit lebih kompleks. Pada individu yang tidak terlatih, volume sekuncup meningkat dari istirahat ke latihan intensitas sedang (sekitar 40-60% dari kapasitas maksimal) dan kemudian mencapai dataran tinggi atau *plateau* untuk sisa durasi latihan. Peningkatan awal

ini didorong oleh peningkatan volume darah yang kembali ke jantung (*venous return*) dan peningkatan kontraktilitas akibat stimulasi simpatis (Draper et al., 2024).

Pada atlet ketahanan yang sangat terlatih, ceritanya sedikit berbeda. Volume sekuncup mereka tidak hanya lebih tinggi pada setiap tingkat kerja, tetapi seringkali terus meningkat hingga titik kelelahan tanpa menunjukkan *plateau* yang jelas. Kemampuan untuk terus meningkatkan volume sekuncup ini adalah salah satu adaptasi kunci yang memungkinkan mereka mencapai curah jantung yang sangat tinggi, yang merupakan penentu utama dari kapasitas aerobik maksimal (VO₂ max) mereka (La Gerche & Baggish, 2021).

Peningkatan *venous return* selama latihan difasilitasi oleh tiga mekanisme utama yang secara kolektif dikenal sebagai "pompa". Pompa otot (*muscle pump*) terjadi ketika kontraksi otot-otot rangka, terutama di kaki, menekan vena-vena, mendorong darah kembali ke arah jantung. Katup-katup satu arah di dalam vena mencegah aliran balik. Pompa pernapasan (*respiratory pump*) terjadi karena perubahan tekanan di rongga dada selama bernapas; penurunan tekanan selama inspirasi menarik darah ke dalam vena toraks. Terakhir, vasokonstriksi yang dimediasi oleh saraf simpatis pada vena (venokonstriksi) juga membantu mendorong darah dari reservoir vena kembali ke sirkulasi pusat.

Analogi: Bayangkan curah jantung seperti jumlah air yang bisa Anda semprotkan dengan selang taman. Denyut jantung (HR) adalah seberapa cepat Anda menekan dan melepaskan pegangan nosel per menit. Volume sekuncup (SV) adalah seberapa banyak air yang keluar setiap kali Anda menekan pegangan. Untuk menyiram seluruh taman dengan cepat (memenuhi tuntutan latihan), Anda bisa menekan pegangan lebih sering (meningkatkan HR) dan/atau membuka katup lebih lebar sehingga lebih banyak air keluar setiap kali ditekan

(meningkatkan SV). Mekanisme Frank-Starling seperti pegas di dalam pegangan nosel, di mana semakin Anda meregangkannya dengan membiarkan lebih banyak air masuk, semakin kuat ia akan menyemprotkan air keluar.

4.1.1. Dinamika Denyut Jantung (HR) dan Volume Sekuncup (SV)

Denyut jantung (HR) adalah parameter yang paling mudah diukur dan paling umum digunakan untuk memantau intensitas latihan. Pada awal latihan, HR meningkat dengan cepat karena penarikan tonus vagal dan aktivasi simpatis. Setelah fase awal ini, HR terus meningkat secara proporsional dengan intensitas kerja, menyediakan mekanisme utama untuk meningkatkan curah jantung pada intensitas yang lebih tinggi (Draper et al., 2024). Peningkatan HR ini memastikan bahwa darah bersirkulasi melalui paru-paru dan jaringan dengan kecepatan yang cukup untuk memenuhi permintaan oksigen yang meningkat.

Volume sekuncup (SV) ditentukan oleh tiga faktor utama: (1) *Preload*, yaitu tingkat peregangan ventrikel pada akhir fase pengisian (diastol), (2) *Afterload*, yaitu resistensi atau tekanan yang harus diatasi ventrikel untuk memompa darah keluar, dan (3) Kontraktilitas, yaitu kekuatan intrinsik dari kontraksi miokardium. Selama latihan, *preload* meningkat karena peningkatan *venous return* (berkat pompa otot dan pernapasan), yang meregangkan ventrikel dan, melalui Mekanisme Frank-Starling, meningkatkan kekuatan kontraksi. *Afterload* (yang diwakili oleh tekanan darah arteri) juga meningkat, yang dapat sedikit menghambat pengosongan ventrikel, tetapi efek ini biasanya diatasi oleh peningkatan kontraktilitas yang dimediasi oleh sistem saraf simpatis (Hellsten & Nyberg, 2022).

4.1.2. Perubahan Curah Jantung (CO) selama Intensitas Meningkat

Curah jantung (CO) adalah indikator utama dari kapasitas fungsional sistem kardiovaskular. Dalam keadaan istirahat, CO rata-rata sekitar 5 liter per menit pada pria dan sedikit lebih rendah pada wanita. Selama latihan maksimal, nilai ini dapat meningkat secara dramatis, mencapai 20-25 liter per menit pada individu sehat yang tidak terlatih, dan hingga 35-40 liter per menit pada atlet ketahanan elit (Draper et al., 2024). Peningkatan luar biasa ini menunjukkan kemampuan sistem kardiovaskular untuk meningkatkan pengiriman oksigen ke seluruh tubuh hingga 4 sampai 8 kali lipat dari tingkat istirahat.

Hubungan antara curah jantung dan intensitas latihan (diukur sebagai konsumsi oksigen, VO_2) bersifat linear. Artinya, untuk setiap peningkatan permintaan oksigen oleh otot, jantung merespons dengan meningkatkan jumlah darah yang dipompa dengan jumlah yang sepadan. Pada intensitas latihan rendah hingga sedang, peningkatan CO dicapai melalui peningkatan baik HR maupun SV. Namun, begitu SV mencapai *plateau* (pada individu yang tidak terlatih), peningkatan CO lebih lanjut pada intensitas yang lebih tinggi hampir sepenuhnya bergantung pada peningkatan denyut jantung (Hellsten & Nyberg, 2022). Kemampuan untuk mencapai CO maksimal yang tinggi adalah salah satu faktor fisiologis paling penting yang membedakan atlet elit dari populasi umum.

4.1.3. Mekanisme Frank-Starling dalam Olahraga

Mekanisme Frank-Starling adalah properti intrinsik dari otot jantung yang menggambarkan hubungan antara volume pengisian ventrikel (*preload*) dan kekuatan kontraksi berikutnya. Secara sederhana, mekanisme ini menyatakan bahwa "semakin besar peregangan awal pada serabut otot jantung, semakin besar pula kekuatan kontraksinya"

(hingga batas fisiologis tertentu) (Montero, 2021). Selama latihan, peningkatan *venous return* menyebabkan lebih banyak darah mengisi ventrikel kiri selama diastol, yang meregangkan dinding ventrikel dan serabut-serabut ototnya.

Peregangan ini menempatkan filamen aktin dan miosin di dalam sarkomer jantung pada posisi tumpang tindih yang lebih optimal, memungkinkan pembentukan jembatan silang yang lebih banyak dan, akibatnya, menghasilkan kontraksi yang lebih kuat (Draper et al., 2024). Mekanisme Frank-Starling ini adalah bentuk regulasi heterometrik yang memungkinkan jantung untuk secara otomatis menyesuaikan outputnya agar sesuai dengan inputnya. Dengan kata lain, jantung akan memompa keluar volume darah tambahan yang diterimanya, memastikan keseimbangan antara sirkulasi pulmonal dan sistemik. Selama latihan, mekanisme ini memainkan peran kunci dalam meningkatkan volume sekuncup pada tahap awal peningkatan intensitas.

4.2. Hemodinamika dan Distribusi Aliran Darah

Selama latihan, sistem kardiovaskular tidak hanya harus meningkatkan jumlah total darah yang dipompa (curah jantung), tetapi juga harus secara cerdas mendistribusikan aliran darah tersebut. Dengan volume darah total yang relatif tetap, tubuh harus mengalihkan darah dari area yang kurang aktif secara metabolik ke otot-otot rangka yang bekerja keras, yang kebutuhannya akan oksigen dapat meningkat lebih dari 50 kali lipat dibandingkan saat istirahat. Proses pengalihan aliran darah ini adalah salah satu respons fisiologis yang paling penting selama latihan dan dimungkinkan oleh regulasi yang terkoordinasi dari diameter pembuluh darah di seluruh tubuh (Joyner & Casey, 2021).

Pada awal latihan, terjadi vasokonstriksi (penyempitan pembuluh darah) yang dimediasi oleh sistem saraf simpatis di banyak area, termasuk organ-organ visceral (seperti ginjal, hati, dan saluran pencernaan) serta otot-otot yang tidak aktif. Vasokonstriksi ini meningkatkan resistensi vaskular di area-area tersebut, sehingga mengurangi aliran darah ke sana. Sebagai contoh, aliran darah ke ginjal dapat menurun hingga 25-30% dari nilai istirahat selama latihan intensitas tinggi. Pengalihan ini secara efektif "membebaskan" sebagian besar dari curah jantung untuk didistribusikan ke jaringan yang paling membutuhkannya (Draper et al., 2024).

Secara bersamaan, di dalam otot-otot yang sedang berkontraksi, terjadi proses yang berlawanan, yaitu vasodilatasi (pelebaran pembuluh darah) lokal yang masif. Proses ini, yang dikenal sebagai hiperemia fungsional, dimediasi oleh akumulasi produk sampingan metabolik lokal di dalam otot. Zat-zat seperti adenosin, ion kalium, ion hidrogen, dan karbon dioksida, serta penurunan tekanan parsial oksigen, semuanya bekerja pada otot polos di dinding arteriol, menyebabkan mereka rileks dan melebar. Selain itu, sel-sel endotel yang melapisi pembuluh darah melepaskan vasodilator poten, terutama oksida nitrat (NO), sebagai respons terhadap peningkatan gesekan aliran darah (*shear stress*) (Hellsten & Nyberg, 2022).

Efek gabungan dari vasokonstriksi sistemik di organ-organ non-esensial dan vasodilatasi lokal yang kuat di otot-otot aktif memungkinkan redistribusi aliran darah yang luar biasa. Saat istirahat, otot rangka hanya menerima sekitar 15-20% dari total curah jantung. Selama latihan maksimal, persentase ini dapat melonjak hingga 80-85% (Joyner & Casey, 2021). Pengaturan tekanan darah selama proses ini juga merupakan sebuah tantangan. Tekanan darah arteri rata-rata (MAP) sedikit meningkat, yang membantu mendorong aliran darah. Peningkatan ini terutama didorong oleh peningkatan tekanan darah sistolik (tekanan selama kontraksi jantung), sementara tekanan darah

diastolik (tekanan selama relaksasi jantung) cenderung tetap stabil atau bahkan sedikit menurun selama latihan dinamis karena penurunan resistensi vaskular perifer total akibat vasodilatasi di otot.

Contoh Kasus: Bayangkan sebuah kota dengan sistem air. Curah jantung adalah output total dari stasiun pompa utama. Selama aktivitas normal, air didistribusikan secara merata ke seluruh distrik (perumahan, industri, perkantoran). Tiba-tiba, terjadi kebakaran besar di distrik industri (otot yang berolahraga). Petugas pemadam kebakaran (sistem saraf simpatis) segera menutup katup-katup pipa yang menuju ke distrik perumahan dan perkantoran (organ viseral), mengalihkan hampir semua tekanan dan aliran air ke distrik industri. Di lokasi kebakaran, petugas di lapangan (metabolit lokal seperti NO) membuka semua hidran (arteriol) selebar mungkin untuk memaksimalkan aliran air ke titik yang paling dibutuhkan.

4.2.1. Redistribusi Darah dari Organ Viseral ke Otot Aktif

Proses redistribusi aliran darah selama latihan adalah contoh luar biasa dari prioritas fisiologis. Aktivasi sistem saraf simpatis yang meningkat menyebabkan pelepasan norepinefrin, yang mengikat reseptor alfa-adrenergik pada otot polos pembuluh darah di organ-organ seperti ginjal dan usus, menyebabkan vasokonstriksi yang kuat (Joyner & Casey, 2021). Pengurangan aliran darah ini bersifat proporsional dengan intensitas latihan; semakin keras latihannya, semakin besar tingkat vasokonstriksi dan pengalihan darah.

Namun, ada dua organ vital yang aliran darahnya dipertahankan atau bahkan ditingkatkan selama latihan: otak dan jantung itu sendiri. Aliran darah ke otak relatif konstan di berbagai intensitas latihan untuk memastikan fungsi kognitif dan kontrol motorik tetap terjaga. Aliran darah koroner, yang memasok miokardium (otot jantung), meningkat secara signifikan sebanding dengan peningkatan kerja jantung untuk

memenuhi kebutuhan oksigennya sendiri yang meningkat (Draper et al., 2024). Kemampuan untuk secara selektif mengurangi aliran darah ke beberapa area sambil mempertahankannya di area lain menyoroti kecanggihan sistem kontrol vaskular tubuh.

4.2.2. Regulasi Tekanan Darah selama Latihan Statis dan Dinamis

Respons tekanan darah (TD) sangat bervariasi tergantung pada jenis latihannya. Selama latihan dinamis atau aerobik (seperti berlari atau bersepeda), terjadi peningkatan yang signifikan pada tekanan darah sistolik, yang mencerminkan peningkatan curah jantung. Namun, tekanan darah diastolik cenderung tetap sama atau sedikit menurun. Hal ini disebabkan oleh vasodilatasi besar-besaran di otot-otot aktif, yang menurunkan resistensi perifer total terhadap aliran darah (Hellsten & Nyberg, 2022). Akibatnya, tekanan darah arteri rata-rata hanya meningkat secara moderat.

Sebaliknya, selama latihan statis atau isometrik (seperti mengangkat beban berat atau *plank*), respons tekanan darah sangat berbeda. Kontraksi otot yang berkelanjutan secara mekanis menekan pembuluh darah di dalam otot, secara signifikan meningkatkan resistensi perifer. Selain itu, upaya yang intens memicu respons tekanan yang dimediasi secara refleks dari sistem saraf pusat. Akibatnya, terjadi peningkatan yang tajam dan dramatis pada tekanan darah sistolik dan diastolik (Draper et al., 2024). Respons hipertensif ini menempatkan beban tekanan yang jauh lebih besar pada jantung dibandingkan latihan dinamis dan merupakan pertimbangan penting bagi individu dengan hipertensi atau penyakit kardiovaskular lainnya.

4.2.3. Peran Oksida Nitrat (NO) dalam Vasodilatasi Pembuluh Darah

Oksida nitrat (NO) adalah molekul pensinyalan gas yang memainkan peran sentral sebagai vasodilator endogen, terutama selama latihan. NO diproduksi di dalam sel-sel endotel yang melapisi semua pembuluh darah oleh enzim *endothelial nitric oxide synthase* (eNOS). Stimulus utama untuk produksi NO selama latihan adalah peningkatan gaya gesek (*shear stress*) yang diberikan oleh aliran darah yang lebih cepat pada dinding pembuluh darah (Hearon & Dinunno, 2021).

Setelah diproduksi, NO berdifusi ke sel-sel otot polos di sekitarnya di dinding pembuluh darah, di mana ia mengaktifkan jalur pensinyalan yang menyebabkan relaksasi otot polos dan, akibatnya, vasodilatasi. Pelebaran pembuluh darah ini menurunkan resistensi vaskular lokal dan secara dramatis meningkatkan aliran darah ke otot yang aktif (Hellsten & Nyberg, 2022). Disfungsi endotel, atau ketidakmampuan untuk menghasilkan NO secara adekuat, dikaitkan dengan berbagai penyakit kardiovaskular dan dapat membatasi toleransi terhadap latihan. Latihan teratur diketahui dapat meningkatkan produksi dan bioavailabilitas NO, yang merupakan salah satu mekanisme kunci di balik manfaat kardiovaskular dari aktivitas fisik.

4.3. Adaptasi Kardiovaskular Kronis

Paparan berulang terhadap stres hemodinamik dari latihan ketahanan memicu serangkaian adaptasi struktural dan fungsional yang luar biasa pada sistem kardiovaskular. Adaptasi ini secara kolektif meningkatkan kapasitas sistem untuk mengirimkan oksigen dan dirancang untuk mengurangi stres pada jantung selama sesi latihan berikutnya. Salah satu adaptasi yang paling terkenal adalah perkembangan "jantung atlet" atau *athletic heart*, sebuah istilah yang menggambarkan serangkaian perubahan pada ukuran, bentuk, dan fungsi jantung yang khas pada individu yang sangat terlatih (La Gerche & Baggish, 2021).

Adaptasi utama pada jantung adalah peningkatan volume internal dari semua empat bilik jantung, terutama ventrikel kiri, disertai dengan peningkatan ketebalan dinding miokardium yang proporsional. Peningkatan volume internal (hipertrofi eksentrik) disebabkan oleh beban volume kronis dari peningkatan *venous return* selama latihan, sementara peningkatan ketebalan dinding (hipertrofi konsentris) adalah respons terhadap beban tekanan intermiten. Penting untuk membedakan hipertrofi fisiologis ini dari hipertrofi patologis yang terlihat pada kondisi seperti hipertensi atau kardiomiopati, di mana penebalan dinding seringkali tidak proporsional dan dapat disertai dengan disfungsi dan fibrosis (La Gerche & Baggish, 2021). Jantung atlet adalah organ yang lebih besar, lebih kuat, dan lebih patuh yang mampu memompa volume darah yang jauh lebih besar per detak (peningkatan volume sekuncup).

Adaptasi penting lainnya terjadi pada volume dan komposisi darah. Latihan ketahanan secara konsisten mengarah pada peningkatan volume plasma, komponen cair dari darah. Peningkatan ini dapat terjadi dengan relatif cepat, bahkan dalam beberapa hari setelah memulai program latihan. Peningkatan volume plasma meningkatkan volume darah total, yang secara langsung meningkatkan *preload* ventrikel (melalui Mekanisme Frank-Starling) dan dengan demikian meningkatkan volume sekuncup saat istirahat dan selama latihan (Draper et al., 2024). Selain itu, peningkatan volume plasma membantu dalam termoregulasi dengan menyediakan lebih banyak cairan untuk produksi keringat.

Di tingkat jaringan, latihan ketahanan merangsang angiogenesis, yaitu pembentukan kapiler darah baru di dalam otot rangka yang dilatih. Peningkatan kepadatan kapiler ini, atau kapilarisasi, mengurangi jarak difusi rata-rata yang harus ditempuh oksigen dari darah ke mitokondria di dalam serabut otot. Hal ini juga memperlambat laju aliran sel darah merah melalui kapiler, memberikan lebih banyak

waktu untuk pertukaran gas dan nutrisi. Kombinasi dari peningkatan aliran darah ke otot dan peningkatan jaringan kapiler secara signifikan meningkatkan kapasitas otot untuk mengekstraksi dan menggunakan oksigen dari darah (Hellsten & Nyberg, 2022).

Hasil fungsional gabungan dari semua adaptasi ini (jantung yang lebih besar, volume darah yang lebih banyak, dan kapilarisasi yang lebih baik) adalah peningkatan dramatis dalam kapasitas pengiriman oksigen, yang tercermin dalam VO₂ max yang lebih tinggi. Ciri khas yang paling mudah dikenali dari adaptasi ini pada seorang atlet adalah bradikardia sinus saat istirahat, atau denyut jantung istirahat yang lambat (seringkali di bawah 60 bpm, dan kadang-kadang serendah 30-40 bpm pada atlet elit). Bradikardia ini adalah tanda efisiensi kardiovaskular yang luar biasa; karena volume sekuncup istirahatnya yang besar, jantung tidak perlu berdetak sesering itu untuk mempertahankan curah jantung yang memadai saat istirahat (Draper et al., 2024).

Analogi: Bayangkan sistem kardiovaskular Anda adalah sistem pengiriman untuk sebuah toko online. Awalnya (tidak terlatih), Anda memiliki satu van pengiriman kecil (jantung) dengan tangki bensin kecil (volume plasma) yang harus melakukan banyak perjalanan bolak-balik (denyut jantung tinggi) di jalan-jalan kota yang sempit (kepadatan kapiler rendah) untuk mengirimkan semua paket. Setelah berbulan-bulan beroperasi (latihan kronis), Anda melakukan upgrade. Anda membeli truk pengiriman yang jauh lebih besar (hipertrofi jantung) dengan tangki bensin raksasa (peningkatan volume plasma) dan kota membangun banyak jalan akses baru ke lingkungan-lingkungan (peningkatan kapilarisasi). Sekarang, truk besar ini dapat membawa lebih banyak paket dalam satu perjalanan (volume sekuncup lebih tinggi) dan dapat menyelesaikan semua pengiriman dengan lebih sedikit perjalanan bolak-balik (denyut jantung istirahat lebih rendah). Sistem ini menjadi jauh lebih kuat dan efisien.

4.3.1. Hipertrofi Jantung Fisiologis (Athletic Heart)

Hipertrofi jantung fisiologis, atau "jantung atlet", adalah adaptasi struktural jantung sebagai respons terhadap latihan kronis. Berbeda dengan hipertrofi patologis yang disebabkan oleh penyakit, jantung atlet ditandai dengan pembesaran yang seimbang dari bilik-bilik jantung dan penebalan dinding yang proporsional, dengan fungsi sistolik dan diastolik yang normal atau bahkan meningkat (La Gerche & Baggish, 2021). Jenis adaptasi bervariasi dengan jenis olahraga. Atlet ketahanan (misalnya, pelari, perenang) cenderung mengembangkan hipertrofi eksentrik (pembesaran volume) karena beban volume yang tinggi, sementara atlet kekuatan (misalnya, angkat besi) dapat menunjukkan sedikit peningkatan pada ketebalan dinding (hipertrofi konsentris) sebagai respons terhadap beban tekanan yang berulang, meskipun pembesaran volume tetap menjadi ciri yang dominan.

Adaptasi ini secara langsung meningkatkan performa. Peningkatan dimensi diastolik akhir ventrikel kiri memungkinkan pengisian yang lebih besar, yang, melalui Mekanisme Frank-Starling, menghasilkan volume sekuncup yang lebih besar. Jantung yang lebih besar dan lebih kuat ini mampu menghasilkan dan mempertahankan curah jantung yang sangat tinggi selama latihan maksimal, yang merupakan penentu utama dari kapasitas aerobik yang superior (Hellsten & Nyberg, 2022). Penting bagi klinisi untuk dapat membedakan adaptasi fisiologis ini dari kondisi kardiomiopati yang berpotensi berbahaya.

4.3.2. Peningkatan Volume Plasma dan Densitas Kapiler

Latihan ketahanan secara konsisten mengarah pada ekspansi volume plasma, yang dapat meningkat sebesar 10-20%. Mekanisme di baliknya melibatkan peningkatan protein plasma (terutama albumin) dan aktivasi sistem renin-angiotensin-aldosteron, yang menyebabkan

retensi natrium dan air oleh ginjal (Draper et al., 2024). Peningkatan volume darah total ini memiliki beberapa manfaat. Manfaat utamanya adalah peningkatan *preload* jantung, yang berkontribusi pada peningkatan volume sekuncup. Selain itu, volume plasma yang lebih besar meningkatkan kemampuan tubuh untuk mengatur suhu selama latihan di lingkungan panas dengan menyediakan lebih banyak cairan untuk produksi keringat dan aliran darah ke kulit.

Secara paralel, di dalam otot yang dilatih, terjadi proses angiogenesis atau pembentukan kapiler baru. Peningkatan densitas kapiler ini secara signifikan meningkatkan luas permukaan total yang tersedia untuk pertukaran antara darah dan serabut otot. Hal ini tidak hanya memfasilitasi pengiriman oksigen dan nutrisi yang lebih baik tetapi juga mempercepat pembuangan produk sisa metabolik seperti laktat dan ion hidrogen (Hellsten & Nyberg, 2022). Peningkatan jaringan vaskular ini adalah adaptasi kunci yang memungkinkan otot untuk mempertahankan laju metabolisme oksidatif yang lebih tinggi.

4.3.3. Penurunan Resting Heart Rate (Bradikardia Atlet)

Bradikardia sinus saat istirahat (denyut jantung < 60 bpm) adalah ciri klasik dari atlet yang terlatih dalam ketahanan. Penurunan denyut jantung istirahat ini adalah konsekuensi langsung dari adaptasi kardiovaskular lainnya, terutama peningkatan volume sekuncup istirahat. Ingatlah bahwa curah jantung istirahat (CO) harus tetap relatif konstan (sekitar 5 L/menit) untuk memenuhi kebutuhan metabolik tubuh saat istirahat. Dengan persamaan $CO = HR \times SV$, jika SV meningkat secara signifikan karena adaptasi seperti hipertrofi jantung dan peningkatan volume plasma, maka HR harus menurun untuk menjaga CO tetap stabil (Ihalainen et al., 2022).

Selain peningkatan SV, penurunan denyut jantung istirahat juga dimediasi oleh perubahan pada kontrol otonom jantung. Atlet yang terlatih menunjukkan peningkatan tonus parasimpatis (vagal) dan penurunan tonus simpatis intrinsik pada nodus sinoatrial (alat pacu jantung alami). Peningkatan dominasi vagal ini secara aktif memperlambat laju penembakan nodus sinoatrial (La Gerche & Baggish, 2021). Bradikardia atlet bukanlah tanda patologi, melainkan indikator efisiensi kardiovaskular yang luar biasa, di mana jantung yang lebih kuat dapat melakukan pekerjaan yang sama dengan lebih sedikit upaya.

Rangkuman Bab

- Respons kardiovaskular akut terhadap latihan bertujuan untuk meningkatkan pengiriman oksigen ke otot aktif. Hal ini dicapai melalui peningkatan curah jantung (CO).
- Curah jantung adalah produk dari denyut jantung (HR) dan volume sekuncup (SV). Keduanya meningkat selama latihan, meskipun SV cenderung mencapai *plateau* pada individu yang tidak terlatih.
- Mekanisme Frank-Starling menjelaskan bagaimana peningkatan *preload* (pengisian ventrikel) secara intrinsik meningkatkan kekuatan kontraksi jantung.
- Selama latihan, terjadi redistribusi aliran darah yang masif. Darah dialihkan dari organ-organ viseral menuju otot-otot rangka yang aktif melalui vasokonstriksi simpatis dan vasodilatasi metabolik lokal.
- Tekanan darah sistolik meningkat selama latihan dinamis, sementara tekanan diastolik tetap stabil. Latihan statis menyebabkan peningkatan tajam pada kedua tekanan tersebut.
- Latihan ketahanan kronis menyebabkan adaptasi signifikan, termasuk hipertrofi jantung fisiologis (*athletic heart*),

peningkatan volume plasma, dan peningkatan densitas kapiler di otot.

- Jantung atlet adalah jantung yang lebih besar dan lebih kuat, mampu memompa volume sekuncup yang jauh lebih tinggi.
- Bradikardia (denyut jantung istirahat yang lambat) pada atlet adalah tanda efisiensi kardiovaskular, yang disebabkan oleh peningkatan volume sekuncup dan peningkatan tonus vagal.

Latihan Mahasiswa

Soal Esai

1. Jelaskan secara rinci faktor-faktor yang menyebabkan peningkatan curah jantung dari kondisi istirahat ke latihan intensitas maksimal. Bedakan kontribusi relatif dari denyut jantung dan volume sekuncup pada berbagai tingkat intensitas.
2. Gambarkan proses redistribusi aliran darah selama sesi lari. Jelaskan mekanisme (neural dan lokal) yang menyebabkan vasokonstriksi di ginjal dan vasodilatasi di otot paha depan (quadriceps) secara bersamaan.
3. Bandingkan dan kontraskan respons tekanan darah terhadap latihan dinamis (misalnya, bersepeda) dengan latihan statis (misalnya, *wall sit*). Jelaskan alasan fisiologis di balik perbedaan-perbedaan ini.
4. Apa yang dimaksud dengan "jantung atlet" (*athletic heart*)? Jelaskan dua adaptasi struktural utama yang terjadi pada jantung dan bagaimana adaptasi ini berbeda dari hipertrofi patologis yang disebabkan oleh hipertensi.
5. Seorang atlet maraton elit memiliki denyut jantung istirahat 40 denyut per menit (bpm), sementara seorang individu sedentari dengan usia yang sama memiliki denyut jantung istirahat 75 bpm. Jelaskan setidaknya dua mekanisme

fisiologis utama yang bertanggung jawab atas perbedaan besar ini.

Soal Pilihan Ganda

1. Curah jantung (Cardiac Output) dihitung dengan rumus...
 - A. Denyut Jantung / Volume Sekuncup
 - B. Denyut Jantung + Volume Sekuncup
 - C. Denyut Jantung x Volume Sekuncup -V-
 - D. Volume Sekuncup / Denyut Jantung
2. Mekanisme yang menjelaskan peningkatan kekuatan kontraksi jantung sebagai respons terhadap peningkatan peregangan ventrikel adalah...
 - A. Prinsip Ukuran Henneman
 - B. Hukum Fick
 - C. Efek Bohr
 - D. Mekanisme Frank-Starling -V-
3. Selama latihan intensitas tinggi, persentase terbesar dari curah jantung dialirkan ke...
 - A. Otak
 - B. Ginjal
 - C. Otot rangka aktif -V-
 - D. Kulit
4. Manakah dari berikut ini yang merupakan respons tekanan darah yang khas terhadap latihan aerobik (dinamis)?
 - A. Tekanan sistolik dan diastolik keduanya menurun.
 - B. Tekanan sistolik meningkat, sementara tekanan diastolik tetap stabil atau sedikit menurun. -V-
 - C. Tekanan sistolik tetap stabil, sementara tekanan diastolik meningkat.

- D. Tekanan sistolik dan diastolik keduanya meningkat secara dramatis.
5. Vasodilator lokal yang poten yang dilepaskan oleh sel endotel sebagai respons terhadap peningkatan *shear stress* adalah...
- A. Asetilkolin
 - B. Norepinefrin
 - C. Angiotensin II
 - D. Oksida Nitrat (NO) -V-
6. Adaptasi kronis utama pada jantung sebagai respons terhadap latihan ketahanan adalah...
- A. Atrofi ventrikel kiri
 - B. Hipertrofi fisiologis -V-
 - C. Peningkatan denyut jantung istirahat
 - D. Penurunan volume sekuncup
7. Peningkatan volume plasma akibat latihan ketahanan berkontribusi secara langsung pada...
- A. Penurunan curah jantung
 - B. Peningkatan *preload* dan volume sekuncup -V-
 - C. Peningkatan hematokrit
 - D. Penurunan kemampuan berkeringat
8. Penurunan denyut jantung istirahat yang diamati pada atlet terlatih disebut...
- A. Takikardia
 - B. Aritmia
 - C. Bradikardia -V-
 - D. Fibrilasi

9. Peningkatan awal yang cepat pada denyut jantung di awal latihan terutama disebabkan oleh...
 - A. Peningkatan aktivitas simpatis
 - B. Penarikan aktivitas parasimpatis (vagal) -V-
 - C. Pelepasan hormon tiroid
 - D. Peningkatan suhu tubuh

10. Selama latihan, aliran darah ke organ manakah yang relatif tidak berubah?
 - A. Usus
 - B. Hati
 - C. Otak -V-
 - D. Perut

Studi Kasus atau Tugas Kontekstual

1. Seorang pasien berusia 55 tahun dengan hipertensi tahap 1 (tekanan darah 135/85 mmHg) bertanya kepada Anda apakah aman baginya untuk memulai program latihan. Berdasarkan pengetahuan Anda tentang hemodinamika latihan, berikan rekomendasi mengenai jenis latihan (dinamis vs. statis) yang lebih disarankan untuknya sebagai permulaan. Jelaskan mengapa satu jenis latihan memberikan beban tekanan yang lebih rendah pada jantung dibandingkan yang lain. Diskusikan juga bagaimana latihan aerobik teratur dapat membantu menurunkan tekanan darah istirahatnya dalam jangka panjang.

Glosarium Bab

- **Afterload:** Tekanan atau resistensi yang harus diatasi oleh ventrikel jantung untuk memompa darah ke dalam aorta.
- **Bradikardia:** Denyut jantung yang lambat, biasanya didefinisikan sebagai kurang dari 60 denyut per menit saat istirahat.
- **Curah Jantung (Cardiac Output, CO):** Volume total darah yang dipompa oleh ventrikel kiri per menit ($HR \times SV$).
- **Denyut Jantung (Heart Rate, HR):** Jumlah kontraksi atau detak jantung per satuan waktu, biasanya per menit.
- **Hipertrofi Jantung Fisiologis (Athletic Heart):** Peningkatan ukuran dan massa otot jantung yang seimbang sebagai adaptasi normal terhadap latihan ketahanan.
- **Mekanisme Frank-Starling:** Prinsip fisiologis yang menyatakan bahwa kekuatan kontraksi jantung sebanding dengan tingkat peregangan awal serabut ototnya.
- **Preload:** Tingkat peregangan serabut otot ventrikel pada akhir fase pengisian (diastol).
- **Redistribusi Aliran Darah:** Proses pengalihan aliran darah dari area yang kurang aktif ke jaringan yang aktif secara metabolik selama latihan.
- **Vasodilatasi:** Pelebaran pembuluh darah, yang mengurangi resistensi dan meningkatkan aliran darah.
- **Volume Sekuncup (Stroke Volume, SV):** Jumlah darah yang dipompa keluar dari ventrikel kiri dalam satu kali kontraksi.

Daftar Pustaka Bab

- Draper, N., Williams, C., & Marshall, H. (2024). *Exercise Physiology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003109280>
- Fadila, E., & Solihah, E. (2022). Literature Review Pengaruh Senam Lansia Terhadap Penurunan Tekanan Darah Pada Penderita Hipertensi. *Malahayati Nursing Journal*. <https://doi.org/10.33024/mnj.v5i2.6032>
- Hearon, C. M., & Dineno, F. A. (2021). Regulation of skeletal muscle blood flow during dynamic exercise in humans. *Comprehensive Physiology*, 11(2), 1761-1793. <https://doi.org/10.1002/cphy.c190035>
- Hellsten, Y., & Nyberg, M. (2022). Cardiovascular adaptations to exercise training. *Comprehensive Physiology*, 12(3), 3465-3511. <https://doi.org/10.1002/cphy.c210019>
- Ihalainen, J. K., Schumann, M., & Hynynen, E. (2022). Heart rate variability in the evaluation of recovery and training adaptation in athletes. *Current Sports Medicine Reports*, 21(5), 164-169. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000958>
- Joyner, M. J., & Casey, D. P. (2021). Regulation of muscle blood flow during exercise. In *Skeletal Muscle Circulation* (pp. 411-455). Springer, Cham.
- La Gerche, A., & Baggish, A. L. (2021). The athletic heart—a contemporary review. *The Journal of Physiology*, 599(11), 2821-2839. <https://doi.org/10.1113/JP279313>
- Montero, D. (2021). The Frank-Starling mechanism and the cardiac response to exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 121(11), 2963-2972. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04772-8>
- Pangaribuan, R., Tarigan, A., Anggeria, E., Girsang, E., & Gea, S. (2025). Aktivitas fisik dan psikologis pada pasien

chronic kidney disease yang menjalani hemodialisis: A literature review. *Holistik Jurnal Kesehatan*. <https://doi.org/10.33024/hjk.v19i7.1315>

- Pristya, I., Nurachmah, E., & Maria, R. (2025). Efek mobilisasi dini pada peningkatan fungsi fisik pasien post coronary artery bypass graft (CABG): a systematic literature review. *Holistik Jurnal Kesehatan*. <https://doi.org/10.33024/hjk.v19i1.791>

BAB 5

FISIOLOGI SISTEM PERNAPASAN

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- Menjelaskan mekanisme ventilasi pulmonal dan perubahannya selama latihan intensitas meningkat.
- Menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi difusi gas melintasi membran alveolus-kapiler.
- Menguraikan metode utama transpor oksigen dan karbondioksida dalam darah.
- Menjelaskan peran kontrol kimiawi dan neural dalam meregulasi pernapasan saat berolahraga.
- Mendefinisikan konsep ambang ventilasi (*ventilatory threshold*) dan hubungannya dengan metabolisme anaerobik.
- Mengevaluasi peran VO_2 max sebagai indikator kapasitas aerobik dan mengidentifikasi faktor-faktor pembatasnya.
- Menganalisis apakah sistem pernapasan mengalami adaptasi signifikan terhadap latihan dan dalam kondisi apa paru dapat membatasi performa.

Pendahuluan

Tariklah napas dalam-dalam, lalu hembuskan. Tindakan yang tampaknya sederhana dan otomatis ini adalah gerbang kehidupan, sebuah pertukaran gas tanpa henti yang menopang setiap proses metabolik di dalam tubuh Anda. Sistem pernapasan, yang terdiri dari paru-paru dan saluran udara, berfungsi sebagai antarmuka antara

lingkungan eksternal dan sirkulasi internal kita. Peran utamanya adalah memastikan pasokan oksigen yang konstan ke dalam darah dan membuang karbondioksida, produk limbah utama dari metabolisme energi. Saat istirahat, tugas ini dilakukan dengan tenang dan efisien. Namun, selama latihan, sistem ini dihadapkan pada tantangan yang luar biasa.

Bayangkan otot Anda sebagai tungku pembakaran berkinerja tinggi. Jika sistem kardiovaskular yang kita bahas di Bab 4 adalah sistem pipa bahan bakar yang mengirimkan oksigen, maka sistem pernapasan adalah sistem asupan udara raksasa yang menarik oksigen dari atmosfer. Selama latihan berat, permintaan otot akan oksigen bisa meningkat 15 hingga 25 kali lipat. Untuk memenuhi permintaan ini, jumlah udara yang Anda hirup dan hembuskan setiap menit, atau ventilasi pulmonal, dapat melonjak dari sekitar 6 liter saat istirahat menjadi lebih dari 150 liter. Peningkatan 25 kali lipat ini harus dicapai sambil mempertahankan keseimbangan pH darah yang sangat rapuh.

Dalam bab ini, kita akan menjelajahi rekayasa fisiologis yang memungkinkan prestasi luar biasa ini. Kita akan mulai dengan mekanika dasar pernapasan, bagaimana otot-otot seperti diafragma bekerja untuk menggerakkan udara masuk dan keluar dari paru-paru. Kita akan menyelam ke tingkat mikroskopis di alveolus, di mana pertukaran gas yang sesungguhnya terjadi melintasi membran yang sangat tipis. Perjalanan oksigen kemudian akan kita ikuti saat ia mengikat hemoglobin di dalam sel darah merah, dan sebaliknya, bagaimana karbondioksida diangkut kembali ke paru-paru untuk dibuang.

Selanjutnya, kita akan mengkaji sistem kontrol canggih yang mengatur pernapasan. Anda tidak perlu secara sadar berpikir untuk bernapas lebih cepat saat berlari; pusat pernapasan di batang otak Anda, yang bertindak sebagai "autopilot", secara konstan memantau

sinyal kimiawi dalam darah Anda dan umpan balik dari otot yang bergerak untuk menyesuaikan laju dan kedalaman pernapasan secara presisi. Kita akan membahas konsep kunci seperti ambang ventilasi, sebuah titik di mana pernapasan Anda mulai meningkat secara tidak proporsional, yang sering digunakan sebagai penanda non-invasif dari peningkatan stres metabolik.

Akhirnya, kita akan menjawab pertanyaan penting: Apakah paru-paru kita menjadi "lebih bugar" dengan latihan seperti halnya jantung dan otot? Kita akan mengevaluasi kapasitas adaptif sistem pernapasan dan menemukan bahwa, bagi kebanyakan orang, paru-paru memiliki kapasitas cadangan yang sangat besar dan jarang menjadi faktor pembatas utama dalam performa ketahanan. Namun, pada atlet elit yang mendorong fisiologi manusia hingga batas absolutnya, kita akan melihat bagaimana sistem yang biasanya sangat andal ini terkadang dapat menjadi mata rantai yang lemah. Memahami fungsi dan batasan sistem pernapasan adalah komponen penting bagi tenaga kesehatan untuk menilai kebugaran, mendiagnosis kondisi seperti asma akibat olahraga, dan memberikan panduan yang komprehensif tentang kesehatan pernapasan.

5.1. Mekanika Pernapasan dan Pertukaran Gas

Fungsi utama sistem pernapasan adalah untuk melakukan pertukaran gas, yaitu mengambil oksigen (O_2) dari atmosfer dan membuang karbondioksida (CO_2) dari tubuh. Proses ini dapat dibagi menjadi dua komponen utama: ventilasi pulmonal dan difusi gas. Ventilasi pulmonal, atau bernapas, adalah proses mekanis menggerakkan udara masuk dan keluar dari paru-paru. Proses ini diatur oleh hukum fisika sederhana, di mana udara mengalir dari area bertekanan tinggi ke area bertekanan rendah. Inspirasi (menghirup) adalah proses aktif yang dimulai oleh kontraksi diafragma, otot berbentuk kubah di dasar rongga dada, dan otot interkostalis eksternal. Kontraksi ini

memperluas volume rongga dada, yang pada gilirannya menurunkan tekanan di dalam paru-paru (tekanan intrapulmonal) menjadi lebih rendah dari tekanan atmosfer, menyebabkan udara mengalir masuk (Draper et al., 2024).

Ekspirasi (menghembuskan) saat istirahat adalah proses pasif. Relaksasi diafragma dan otot interkostalis menyebabkan rongga dada kembali ke ukuran semula karena sifat rekoil elastis paru-paru. Pengcilan volume ini meningkatkan tekanan intrapulmonal di atas tekanan atmosfer, memaksa udara keluar. Namun, selama latihan, ekspirasi menjadi proses aktif. Otot-otot seperti otot interkostalis internal dan otot-otot dinding perut berkontraksi untuk menekan rongga dada dengan lebih kuat dan cepat, memungkinkan pengeluaran udara yang lebih cepat untuk mengimbangi laju pernapasan yang tinggi (Sheel et al., 2021).

Setelah udara mencapai paru-paru, langkah selanjutnya adalah pertukaran gas yang sebenarnya, yang terjadi di jutaan kantung udara kecil berdinding tipis yang disebut alveolus. Di sinilah terjadi difusi, yaitu pergerakan molekul gas dari area dengan tekanan parsial tinggi ke area dengan tekanan parsial rendah. Oksigen, yang memiliki tekanan parsial tinggi di udara alveolar, berdifusi melintasi membran alveolus-kapiler yang sangat tipis ke dalam darah di kapiler paru, di mana tekanan parsial oksigen lebih rendah. Secara bersamaan, karbondioksida, yang memiliki tekanan parsial tinggi dalam darah vena yang kembali dari jaringan, berdifusi ke arah yang berlawanan, dari darah ke alveolus, untuk dihembuskan (Lovering et al., 2022).

Efisiensi proses difusi ini sangat luar biasa, berkat desain arsitektur paru-paru. Paru-paru orang dewasa memiliki luas permukaan total untuk pertukaran gas yang setara dengan sekitar setengah lapangan tenis, dan jarak difusi (ketebalan membran alveolus-kapiler) hanya setebal dua sel. Selama latihan, efisiensi ini semakin ditingkatkan

karena peningkatan curah jantung mengirimkan lebih banyak darah melalui paru-paru, dan tekanan darah yang lebih tinggi "merekrut" kapiler-kapiler di bagian atas paru-paru yang mungkin kurang terperfusi saat istirahat, sehingga semakin meningkatkan luas permukaan yang tersedia untuk pertukaran gas (Draper et al., 2024).

Setelah gas-gas ini berpindah antara alveolus dan darah, mereka harus diangkut secara efisien ke dan dari jaringan. Oksigen terutama diangkut dalam darah dengan cara terikat pada protein hemoglobin di dalam sel darah merah, membentuk oksihemoglobin. Afinitas pengikatan ini secara cerdas dimodulasi oleh kondisi lokal di jaringan. Di paru-paru, di mana O_2 tinggi, hemoglobin dengan rakus mengikat oksigen. Di otot yang aktif, di mana O_2 rendah dan suhu serta keasaman lebih tinggi, afinitas hemoglobin terhadap oksigen menurun, memfasilitasi pelepasan O_2 di tempat yang paling dibutuhkan. Karbondioksida diangkut dalam darah melalui tiga mekanisme: sebagian kecil larut dalam plasma, sebagian terikat pada hemoglobin, dan mayoritas (sekitar 70%) diubah menjadi ion bikarbonat (HCO_3^-) melalui reaksi yang dikatalisis oleh enzim karbonat anhidrase. Sistem bikarbonat ini tidak hanya efisien untuk transpor CO_2 tetapi juga memainkan peran sentral sebagai sistem penyangga (buffer) untuk menjaga pH darah (Powers et al., 2020).

Analogi: Bayangkan sistem pernapasan seperti stasiun pengisian bahan bakar untuk armada taksi (sel darah merah) di kota. Ventilasi adalah pompa udara raksasa yang memastikan stasiun selalu memiliki pasokan udara segar (oksigen). Pertukaran gas di alveolus adalah seperti proses pengisian bahan bakar itu sendiri, di mana nosel (alveolus) terhubung ke tangki bensin (sel darah merah) dan oksigen dipindahkan dengan cepat karena perbedaan tekanan. Perjalanan sel darah merah ke otot adalah seperti taksi yang mengantar penumpang (oksigen) ke tujuannya. Kurva disosiasi oksihemoglobin adalah seperti sistem "harga dinamis" yang mendorong taksi untuk

menurunkan penumpang di area dengan permintaan tertinggi (otot yang aktif). Sementara itu, taksi yang sama mengambil sampah (karbondioksida) dari lokasi tersebut untuk dibuang kembali di stasiun (paru-paru).

5.1.1. Ventilasi Pulmonal selama Olahraga Maksimal

Ventilasi pulmonal (VE), yaitu volume udara yang dihirup atau dihembuskan per menit, meningkat secara dramatis selama latihan untuk memenuhi kebutuhan metabolik. VE adalah produk dari frekuensi pernapasan (*breathing frequency*, f) dan volume tidal (*tidal volume*, VT), yaitu volume udara per napas ($VE = f \times VT$). Pada awal latihan, VE meningkat terutama melalui peningkatan kedalaman pernapasan (peningkatan VT). Seiring dengan meningkatnya intensitas, peningkatan frekuensi pernapasan juga memberikan kontribusi yang semakin besar (Draper et al., 2024). Pada individu muda yang sehat, VE dapat meningkat dari sekitar 5-6 L/menit saat istirahat menjadi 100-200 L/menit selama latihan maksimal.

Peningkatan ventilasi ini bertujuan untuk mempertahankan tekanan parsial O₂ (PO₂) dan CO₂ (PCO₂) di alveolar pada tingkat yang relatif konstan, bahkan ketika konsumsi O₂ (VO₂) dan produksi CO₂ (VCO₂) oleh otot meningkat pesat. Hingga intensitas sekitar 50-75% dari kapasitas aerobik maksimal, peningkatan VE hampir sebanding dengan peningkatan VO₂ dan VCO₂. Namun, pada intensitas yang lebih tinggi, VE mulai meningkat secara tidak proporsional lebih curam, sebuah fenomena yang terkait dengan ambang ventilasi (Sheel et al., 2021).

5.1.2. Difusi Gas pada Membran Alveolus-Kapiler

Difusi gas melintasi membran alveolus-kapiler diatur oleh Hukum Difusi Fick, yang menyatakan bahwa laju transfer gas sebanding

dengan luas permukaan jaringan, koefisien difusi gas, dan perbedaan tekanan parsial gas di kedua sisi membran, serta berbanding terbalik dengan ketebalan membran (Powers et al., 2020). Paru-paru dirancang secara optimal untuk memaksimalkan difusi dengan memiliki luas permukaan yang sangat besar (50-100 meter persegi) dan membran yang sangat tipis (sekitar 0.5 mikrometer).

Selama latihan, kapasitas difusi paru-paru meningkat. Peningkatan curah jantung menyebabkan lebih banyak kapiler paru terisi darah (rekrutmen kapiler), yang meningkatkan luas permukaan efektif untuk pertukaran gas. Meskipun waktu transit sel darah merah di kapiler paru menurun secara signifikan selama latihan berat (dari sekitar 0.75 detik saat istirahat menjadi kurang dari 0.4 detik), waktu ini biasanya masih cukup bagi darah untuk mencapai kesetimbangan dengan gas alveolar pada individu sehat (Lovering et al., 2022). Namun, pada atlet elit, waktu transit yang sangat singkat ini terkadang dapat menyebabkan oksigenasi yang tidak lengkap, sebuah kondisi yang akan dibahas lebih lanjut nanti.

5.1.3. Transpor Oksigen dan Karbondioksida dalam Darah

Lebih dari 98% oksigen dalam darah diangkut oleh hemoglobin (Hb) di dalam sel darah merah. Setiap molekul Hb dapat mengikat hingga empat molekul O₂. Hubungan antara tekanan parsial oksigen (PO₂) dan seberapa jenuh hemoglobin dengan oksigen (saturasi oksihemoglobin, SaO₂) digambarkan oleh kurva disosiasi oksihemoglobin yang berbentuk S (sigmoid). Di paru-paru, di mana PO₂ tinggi (>100 mmHg), Hb menjadi hampir jenuh sepenuhnya (97-98%). Di jaringan perifer, di mana PO₂ jauh lebih rendah, oksigen dilepaskan dari Hb (Draper et al., 2024).

Kurva ini dapat bergeser ke kanan oleh peningkatan suhu, peningkatan PCO₂, dan penurunan pH (peningkatan keasaman), sebuah fenomena

yang dikenal sebagai Efek Bohr. Semua kondisi ini terjadi di otot yang aktif selama latihan. Pergeseran ke kanan ini berarti bahwa pada PO₂ tertentu, afinitas Hb terhadap O₂ lebih rendah, yang memfasilitasi pelepasan oksigen yang lebih besar ke jaringan yang paling membutuhkannya (Powers et al., 2020). Karbondioksida terutama diangkut dalam plasma sebagai ion bikarbonat (HCO₃⁻). Proses konversi CO₂ menjadi HCO₃⁻ di sel darah merah juga melepaskan ion hidrogen (H⁺), yang kemudian dapat di-buffer oleh hemoglobin, menyoroti peran penting hemoglobin dalam transpor CO₂ dan keseimbangan asam-basa.

5.2. Regulasi Ventilasi selama Latihan

Meskipun proses bernapas dapat dikontrol secara sadar, regulasi ventilasi selama istirahat dan latihan sebagian besar bersifat otomatis dan involunter. Kontrol ini diatur oleh sistem yang kompleks yang melibatkan pusat-pusat pernapasan di batang otak (medula oblongata dan pons), yang menerima input dari berbagai sumber untuk menyesuaikan laju dan kedalaman pernapasan secara tepat untuk memenuhi kebutuhan metabolik (Smith et al., 2023). Tujuan utama dari sistem kontrol ini adalah untuk mempertahankan homeostasis gas darah, yaitu menjaga tekanan parsial oksigen arteri (PaO₂), tekanan parsial karbondioksida arteri (PaCO₂), dan pH darah dalam rentang yang sangat sempit.

Input utama ke pusat pernapasan berasal dari kemoreseptor, yaitu sensor-sensor khusus yang mendeteksi perubahan kimiawi dalam darah atau cairan serebrospinal. Kemoreseptor sentral, yang terletak di permukaan medula oblongata, sangat sensitif terhadap perubahan PCO₂ (melalui perubahan pH di cairan serebrospinal). Peningkatan sekecil apapun pada PCO₂ arteri akan merangsang kemoreseptor sentral secara kuat, yang kemudian meningkatkan ventilasi untuk "menghembuskan" kelebihan CO₂. Kemoreseptor perifer terletak di

badan karotis (di percabangan arteri karotis) dan badan aorta. Reseptor ini terutama sensitif terhadap perubahan PCO₂ dan pH darah, tetapi juga merespons penurunan PaO₂ yang signifikan (hipoksia) (Draper et al., 2024).

Selama latihan, regulasi ventilasi menjadi lebih kompleks. Peningkatan produksi CO₂ dan ion hidrogen oleh otot-otot yang aktif merangsang kemoreseptor, yang mendorong peningkatan ventilasi. Namun, kontrol kimiawi ini sendiri tidak dapat menjelaskan peningkatan ventilasi yang cepat dan tiba-tiba di awal latihan atau penyesuaian yang sangat halus selama latihan. Diyakini bahwa ada beberapa mekanisme redundan yang bekerja secara bersamaan. Input non-kimiawi, seperti umpan balik neural dari proprioceptor di otot dan sendi yang bergerak (mekanoreseptor) dan perintah motorik dari korteks motorik (dorongan sentral), juga memberikan sinyal ke pusat pernapasan untuk meningkatkan ventilasi secara antisipatif (Smith et al., 2023).

Salah satu konsep penting dalam fisiologi pernapasan latihan adalah ambang ventilasi (*ventilatory threshold*, VT). Ini adalah titik selama latihan dengan intensitas yang meningkat secara bertahap di mana ventilasi mulai meningkat pada laju yang lebih curam daripada konsumsi oksigen (VO₂). VT pertama (VT1) seringkali bertepatan dengan titik di mana tubuh mulai meningkatkan produksi laktat, dan ion hidrogen (H⁺) yang terkait perlu di-buffer oleh sistem bikarbonat, yang menghasilkan CO₂ tambahan yang harus dihembuskan. VT kedua (VT2), atau titik kompensasi pernapasan, terjadi pada intensitas yang lebih tinggi, di mana penumpukan asam metabolik menjadi sangat cepat sehingga hiperventilasi terjadi dalam upaya untuk mengkompensasi asidosis (Powers et al., 2020). VT sering digunakan dalam pengaturan klinis dan olahraga sebagai perkiraan non-invasif dari ambang laktat untuk menentukan zona intensitas latihan.

Contoh Kasus: Seorang atlet sedang melakukan tes latihan bertingkat di atas *treadmill*, di mana kecepatan ditingkatkan setiap beberapa menit. Pada awalnya, pernapasannya menjadi lebih dalam dan sedikit lebih cepat, tetapi ia masih bisa berbicara dengan nyaman. Peningkatan ventilasinya sebanding dengan peningkatan beban kerjanya. Saat kecepatan terus meningkat, ada titik di mana pernapasannya tiba-tiba menjadi jauh lebih cepat dan dalam, dan ia hanya bisa mengucapkan satu atau dua kata di antara napas. Titik ini kemungkinan besar adalah ambang ventilasinya (VT), yang menandakan bahwa sistem penyangga bikarbonatnya bekerja keras untuk mengatasi asidosis laktat yang mulai meningkat, menghasilkan CO₂ tambahan yang mendorong pernapasannya.

5.2.1. Kontrol Kimiawi (Kemoreseptor) terhadap Pernapasan

Regulasi ventilasi sangat dipengaruhi oleh kontrol kimiawi untuk menjaga homeostasis gas darah. Pendorong ventilasi yang paling kuat saat istirahat dan selama latihan adalah tekanan parsial karbondioksida arteri (PaCO₂). Kemoreseptor sentral di medula sangat sensitif terhadap peningkatan kecil dalam PaCO₂, yang menyebabkan peningkatan pH cairan serebrospinal. Sebagai respons, pusat pernapasan meningkatkan laju dan kedalaman ventilasi untuk mengeluarkan CO₂ dan mengembalikan PaCO₂ ke normal (sekitar 40 mmHg) (Smith et al., 2023).

Kemoreseptor perifer di badan karotis dan aorta juga berkontribusi. Mereka merespons peningkatan PaCO₂ dan penurunan pH (peningkatan H⁺), yang keduanya terjadi selama latihan intensitas sedang hingga tinggi. Respon kemoreseptor perifer terhadap PaCO₂ lebih cepat daripada respon sentral. Selain itu, kemoreseptor perifer adalah satu-satunya reseptor yang merespons penurunan tekanan parsial oksigen arteri (PaO₂). Namun, ventilasi tidak meningkat secara signifikan sampai PaO₂ turun di bawah 60 mmHg, suatu tingkat

hipoksia yang biasanya tidak tercapai selama latihan di ketinggian permukaan laut pada individu yang sehat (Draper et al., 2024).

5.2.2. Ambang Ventilasi (Ventilatory Threshold)

Ambang ventilasi (VT) adalah titik selama latihan progresif di mana ventilasi (VE) mulai meningkat secara tidak proporsional terhadap konsumsi oksigen (VO₂). Fenomena ini dapat diamati dengan memplot VE sebagai fungsi dari VO₂; kurva awalnya linear, kemudian menunjukkan titik infleksi di mana kemiringannya menjadi lebih curam. Titik infleksi pertama ini, VT₁, diyakini terkait dengan peningkatan awal dalam produksi laktat darah. Ion hidrogen (H⁺) yang dihasilkan bersama laktat di-buffer oleh sistem bikarbonat (HCO₃⁻), menghasilkan CO₂ tambahan (selain CO₂ metabolik) yang harus dihembuskan, sehingga mendorong ventilasi (Jamnick et al., 2020).

Pada intensitas yang lebih tinggi, titik infleksi kedua, yang dikenal sebagai titik kompensasi pernapasan (RCP) atau VT₂, dapat terjadi. Ini mewakili titik di mana sistem penyangga menjadi kewalahan, menyebabkan penurunan tajam pada pH darah. Hiperventilasi yang nyata terjadi pada titik ini sebagai upaya kompensasi untuk melawan asidosis metabolik yang parah (Powers et al., 2020). VT₁ dan VT₂ adalah penanda fisiologis yang penting dan sering digunakan untuk meresepkan zona intensitas latihan dan untuk menilai kebugaran aerobik.

5.2.3. Fenomena Titik Lelah (Second Wind) dan Dyspnea

"Second wind" atau "titik lelah" adalah fenomena subjektif yang dilaporkan oleh beberapa individu selama latihan ketahanan, di mana perasaan awal dari kelelahan dan kesulitan bernapas yang berat tiba-tiba mereda, memungkinkan mereka untuk melanjutkan latihan pada

intensitas yang sama dengan kenyamanan yang lebih besar. Mekanisme fisiologis yang tepat di balik *second wind* tidak sepenuhnya dipahami dan kemungkinan multifaktorial. Beberapa hipotesis termasuk redistribusi aliran darah yang lebih efisien ke otot-otot pernapasan setelah fase pemanasan, pembersihan laktat yang lebih baik, atau faktor-faktor psikologis (Draper et al., 2024).

Dyspnea adalah istilah medis untuk sensasi subjektif dari kesulitan bernapas atau sesak napas. Selama latihan berat, sensasi ini adalah hal yang normal dan kemungkinan besar disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor, termasuk stimulasi kuat pada pusat pernapasan dari kemoreseptor, umpan balik aferen dari reseptor di otot-otot pernapasan yang bekerja keras, dan ketidaksesuaian antara dorongan untuk bernapas dan tingkat ventilasi yang dicapai (Sheel et al., 2021). Namun, dyspnea yang tidak proporsional dengan tingkat pengerahan tenaga bisa menjadi tanda kondisi medis yang mendasarinya, seperti penyakit paru-paru atau jantung.

5.3. Adaptasi Paru dan Kapasitas Aerobik

Pertanyaan umum dalam fisiologi olahraga adalah apakah latihan dapat "memperkuat" paru-paru dengan cara yang sama seperti latihan memperkuat jantung dan otot rangka. Jawaban singkatnya adalah, untuk sebagian besar, tidak secara signifikan. Sistem pernapasan pada individu yang sehat dirancang dengan kapasitas cadangan yang sangat besar. Struktur dasar paru-paru, seperti jumlah alveolus dan total luas permukaan untuk pertukaran gas, sebagian besar ditentukan oleh genetika dan pertumbuhan selama masa kanak-kanak dan remaja dan tampaknya tidak berubah secara berarti dengan latihan pada masa dewasa (Dempsey et al., 2020).

Meskipun beberapa penelitian menunjukkan bahwa atlet elit, terutama perenang, mungkin memiliki volume paru-paru statis yang sedikit lebih besar (seperti kapasitas vital) dibandingkan dengan populasi umum, perbedaan ini seringkali dapat dijelaskan oleh ukuran tubuh yang lebih besar atau merupakan hasil seleksi genetik daripada adaptasi yang diinduksi oleh latihan. Latihan ketahanan memang menghasilkan beberapa adaptasi fungsional pada sistem pernapasan, tetapi ini lebih berkaitan dengan otot-otot pernapasan daripada paru-paru itu sendiri. Latihan dapat meningkatkan kekuatan dan daya tahan otot-otot pernapasan (diafragma dan interkostalis), membuatnya lebih tahan terhadap kelelahan selama latihan yang berkepanjangan dan intens (Sheel et al., 2021).

Bagi sebagian besar individu, dari yang tidak aktif hingga atlet yang cukup terlatih, sistem pernapasan bukanlah faktor pembatas utama untuk performa ketahanan. Kemampuan untuk mempertahankan latihan intensitas tinggi biasanya dibatasi oleh kemampuan sistem kardiovaskular untuk mengirimkan oksigen (curah jantung) dan kemampuan otot untuk menggunakan oksigen tersebut (kepadatan mitokondria, aktivitas enzim oksidatif), bukan oleh kemampuan paru-paru untuk mengoksigenasi darah. Ini terbukti dari fakta bahwa selama latihan maksimal di ketinggian permukaan laut, saturasi oksigen arteri biasanya tetap mendekati 95-98%, menunjukkan bahwa paru-paru melakukan tugasnya dengan sangat baik (Powers et al., 2020).

Namun, ada satu pengecualian penting: atlet ketahanan elit. Pada individu-individu ini, yang telah memaksimalkan adaptasi kardiovaskular dan otot mereka, sistem pernapasan terkadang dapat menjadi mata rantai yang lemah. Dengan curah jantung yang sangat tinggi, darah dapat mengalir melalui kapiler paru dengan sangat cepat sehingga waktu transit menjadi tidak cukup untuk kesetimbangan penuh antara gas alveolar dan darah. Fenomena ini, yang disebut *exercise-induced arterial hypoxemia* (EIAH), dapat menyebabkan

penurunan saturasi oksigen arteri selama latihan maksimal dan dapat secara langsung membatasi performa pada puncak fisiologi manusia (Dempsey et al., 2020; Lovering et al., 2022).

Kapasitas aerobik maksimal, atau VO₂ max, tetap menjadi ukuran standar emas untuk kebugaran kardiorespirasi. VO₂ max didefinisikan sebagai laju maksimal di mana tubuh dapat mengambil, mengangkut, dan menggunakan oksigen selama latihan yang intens. Seperti yang disiratkan oleh namanya, ini adalah ukuran terintegrasi dari fungsi sistem pernapasan, kardiovaskular, dan otot. Meskipun sistem pernapasan memainkan peran penting dalam "pengambilan" oksigen, pada kebanyakan orang, faktor pembatas utama untuk VO₂ max adalah "pengangkutan" (curah jantung maksimal) dan "penggunaan" (kapasitas oksidatif otot) (di Prampero, 2023).

Analogi: Bayangkan seluruh sistem aerobik Anda sebagai pabrik perakitan mobil. Paru-paru adalah pintu pemuatan tempat bahan baku (oksigen) masuk. Sistem kardiovaskular (jantung dan pembuluh darah) adalah sistem konveyor yang mengangkut bahan baku ke jalur perakitan. Otot-otot adalah stasiun-stasiun kerja di jalur perakitan tempat bahan baku digunakan untuk membuat produk jadi (ATP). Pada pabrik rata-rata (individu tidak terlatih), kecepatan seluruh pabrik dibatasi oleh seberapa cepat sistem konveyor dapat bergerak atau seberapa efisien stasiun kerja tersebut. Pintu pemuatan (paru-paru) biasanya jauh lebih besar dari yang dibutuhkan dan dapat dengan mudah menangani arus masuk bahan baku. Namun, di pabrik perakitan Formula 1 (atlet elit), di mana sistem konveyor dan stasiun kerja telah dioptimalkan secara maksimal, pintu pemuatan yang sama itu, meskipun besar, tiba-tiba bisa menjadi titik kemacetan karena kecepatan bahan baku yang harus ditanganinya sangatlah ekstrem.

5.3.1. Efisiensi Penggunaan Oksigen (VO2 Max)

VO2 max adalah laju maksimal di mana seseorang dapat menggunakan oksigen selama latihan intensif, dan ini dianggap sebagai indikator terbaik dari kebugaran kardiorespirasi. Nilainya ditentukan oleh Persamaan Fick: $VO_2 = CO \times (a-vO_2 \text{ difference})$, di mana CO adalah curah jantung dan (a-vO2 difference) adalah perbedaan kandungan oksigen antara darah arteri dan vena campuran, yang mencerminkan jumlah oksigen yang diekstraksi oleh jaringan (di Prampero, 2023). Latihan ketahanan secara signifikan meningkatkan VO2 max, terutama dengan meningkatkan curah jantung maksimal (adaptasi sentral) dan meningkatkan kemampuan otot untuk mengekstraksi oksigen (adaptasi perifer).

Meskipun sistem pernapasan adalah langkah pertama dalam jalur oksigen, pada individu yang sehat di permukaan laut, kemampuannya untuk mengoksigenasi darah arteri biasanya tidak membatasi VO2 max. Paru-paru memiliki kapasitas ventilasi dan difusi yang melebihi tuntutan yang diberikan oleh sistem kardiovaskular. Oleh karena itu, peningkatan VO2 max yang diamati dengan latihan hampir seluruhnya disebabkan oleh adaptasi pada jantung, pembuluh darah, dan otot, bukan pada paru-paru itu sendiri (Powers et al., 2020).

5.3.2. Kapasitas Vital dan Volume Paru pada Atlet

Volume paru-paru statis, seperti Kapasitas Vital (VC), yaitu volume udara maksimal yang dapat dihembuskan setelah inspirasi maksimal, umumnya tidak berubah secara signifikan dengan latihan pada orang dewasa. Atlet, terutama yang berpostur tinggi seperti pendayung atau perenang, seringkali menunjukkan volume paru-paru yang lebih besar daripada populasi umum. Namun, hal ini sebagian besar dianggap sebagai karakteristik genetik atau hasil dari perkembangan paru-paru

selama masa pertumbuhan, bukan sebagai adaptasi langsung terhadap pelatihan (Draper et al., 2024).

Meskipun volume statis tidak banyak berubah, latihan dapat meningkatkan aspek dinamis dari fungsi paru-paru. Secara khusus, kekuatan dan daya tahan otot-otot pernapasan (diafragma, interkostalis, abdominal) dapat meningkat. Peningkatan ini dapat menunda timbulnya kelelahan otot pernapasan selama latihan yang sangat lama atau intens, yang dapat secara tidak langsung meningkatkan performa dengan mengurangi kerja pernapasan dan "mencuri" aliran darah dari otot-otot lokomotor (Sheel et al., 2021).

5.3.3. Keterbatasan Paru pada Olahraga Intensitas Tinggi

Meskipun sistem pernapasan biasanya memiliki kapasitas berlebih, pada atlet ketahanan tingkat tertinggi, paru-paru dapat menjadi faktor pembatas. Fenomena ini, yang dikenal sebagai *exercise-induced arterial hypoxemia* (EIAH), adalah penurunan tekanan parsial oksigen arteri (PaO₂) dan saturasi oksihemoglobin di bawah nilai istirahat selama latihan intensitas tinggi (Dempsey et al., 2020). EIAH terjadi pada sekitar 50% atlet ketahanan elit, baik pria maupun wanita.

Penyebab utama EIAH adalah ketidaksesuaian ventilasi-perfusi dan, yang lebih penting, keterbatasan difusi akibat waktu transit sel darah merah yang sangat singkat di kapiler paru. Curah jantung yang sangat tinggi pada atlet ini mendorong darah melalui paru-paru dengan sangat cepat sehingga tidak ada cukup waktu untuk oksigen berdifusi sepenuhnya dari alveolus ke hemoglobin sebelum darah meninggalkan paru-paru (Lovering et al., 2022). Kondisi ini secara langsung mengurangi jumlah oksigen yang dikirim ke otot dan dapat membatasi VO₂ max dan performa ketahanan pada atlet-atlet ini.

Rangkuman Bab

- Sistem pernapasan berfungsi untuk menyediakan oksigen dan membuang karbondioksida melalui ventilasi pulmonal dan pertukaran gas.
- Ventilasi (pernapasan) adalah proses mekanis yang digerakkan oleh otot-otot pernapasan. Selama latihan, ventilasi meningkat secara dramatis, baik dalam kedalaman (volume tidal) maupun laju.
- Pertukaran gas terjadi melalui difusi di alveolus, didorong oleh perbedaan tekanan parsial. Oksigen diangkut terutama oleh hemoglobin, sementara CO₂ diangkut terutama sebagai ion bikarbonat.
- Pelepasan oksigen ke jaringan difasilitasi oleh Efek Bohr, di mana peningkatan suhu, CO₂, dan keasaman di otot aktif mengurangi afinitas hemoglobin terhadap oksigen.
- Regulasi ventilasi dikontrol secara ketat oleh pusat pernapasan di batang otak, yang menerima input utama dari kemoreseptor yang sensitif terhadap perubahan PCO₂, pH, dan PO₂ dalam darah.
- Ambang ventilasi (VT) adalah titik di mana ventilasi meningkat secara tidak proporsional terhadap konsumsi oksigen, seringkali terkait dengan peningkatan metabolisme anaerobik.
- Tidak seperti jantung dan otot, paru-paru tidak mengalami adaptasi struktural yang signifikan terhadap latihan. Peningkatan kekuatan otot pernapasan adalah adaptasi utama.
- Bagi kebanyakan orang, sistem pernapasan tidak membatasi performa aerobik. Namun, pada atlet elit, keterbatasan difusi dapat menyebabkan *exercise-induced arterial hypoxemia* (EIAH).

Latihan Mahasiswa

Soal Esai

1. Jelaskan bagaimana ventilasi pulmonal (VE) berubah dari istirahat ke latihan maksimal. Uraikan kontribusi relatif dari volume tidal dan frekuensi pernapasan pada berbagai intensitas.
2. Gambarkan peran hemoglobin dalam transpor oksigen. Jelaskan Efek Bohr dan mengapa fenomena ini sangat penting selama aktivitas fisik.
3. Jelaskan sistem kontrol umpan balik kimiawi yang mengatur pernapasan. Manakah variabel kimiawi dalam darah yang merupakan stimulus paling kuat untuk perubahan ventilasi?
4. Definisikan VO_2 max menggunakan Persamaan Fick. Berdasarkan persamaan tersebut, jelaskan mengapa adaptasi kardiovaskular (sentral) dan otot (perifer) lebih penting daripada adaptasi paru (pernapasan) dalam meningkatkan VO_2 max pada kebanyakan individu.
5. Apa itu *exercise-induced arterial hypoxemia* (EIAH)? Jelaskan mekanisme fisiologis utama yang menyebabkannya dan pada populasi mana kondisi ini paling sering ditemukan.

Soal Pilihan Ganda

1. Volume udara yang dihirup atau dihembuskan dalam satu kali napas normal disebut...
 - A. Kapasitas vital
 - B. Volume residu
 - C. Volume tidal -V-
 - D. Kapasitas paru total

2. Sebagian besar karbondioksida dalam darah diangkut dalam bentuk...
 - A. Terlarut dalam plasma
 - B. Terikat pada hemoglobin
 - C. Ion bikarbonat -V-
 - D. Gas CO₂

3. Peningkatan suhu, PCO₂, dan keasaman menyebabkan kurva disosiasi oksihemoglobin bergeser ke kanan. Fenomena ini disebut...
 - A. Hukum Fick
 - B. Efek Bohr -V-
 - C. Mekanisme Frank-Starling
 - D. Prinsip Ukuran

4. Pusat kontrol utama untuk pernapasan otomatis terletak di...
 - A. Korteks serebral
 - B. Serebelum
 - C. Batang otak (medula dan pons) -V-
 - D. Hipotalamus

5. Stimulus kimiawi yang paling kuat untuk meningkatkan ventilasi pada individu yang sehat adalah...
 - A. Peningkatan PCO₂ arteri -V-
 - B. Penurunan PCO₂ arteri
 - C. Peningkatan PO₂ arteri
 - D. Penurunan suhu darah

6. Titik selama latihan di mana ventilasi mulai meningkat secara tidak proporsional terhadap konsumsi oksigen disebut...
 - A. VO_2 max
 - B. Titik kompensasi pernapasan
 - C. Ambang ventilasi -V-
 - D. Defisit oksigen

7. Manakah dari berikut ini yang BUKAN merupakan adaptasi signifikan dari sistem pernapasan terhadap latihan ketahanan?
 - A. Peningkatan kekuatan otot pernapasan
 - B. Peningkatan daya tahan otot pernapasan
 - C. Peningkatan signifikan dalam kapasitas vital dan volume paru total -V-
 - D. Peningkatan efisiensi ventilasi

8. VO_2 max paling akurat menggambarkan...
 - A. Kapasitas paru-paru untuk mengambil oksigen
 - B. Kapasitas jantung untuk memompa darah
 - C. Kapasitas terintegrasi dari sistem kardiorespirasi dan otot untuk menggunakan oksigen -V-
 - D. Kekuatan otot-otot pernapasan

9. Proses mekanis menggerakkan udara masuk dan keluar dari paru-paru disebut...
 - A. Difusi
 - B. Perfusi
 - C. Ventilasi -V-
 - D. Respirasi seluler

10. Pada atlet ketahanan elit, faktor yang dapat membatasi performa pada intensitas maksimal adalah...
- A. Kelelahan diafragma
 - B. Keterbatasan difusi yang menyebabkan EIAH -V-
 - C. Penumpukan lendir di saluran napas
 - D. Penurunan volume tidal

Studi Kasus atau Tugas Kontekstual

1. Seorang pendaki gunung berencana untuk mendaki ke ketinggian yang sangat tinggi (misalnya, di atas 4.000 meter), di mana tekanan parsial oksigen (PO₂) di atmosfer jauh lebih rendah. Berdasarkan pemahaman Anda tentang regulasi pernapasan, jelaskan respons pernapasan akut yang akan dialami pendaki tersebut saat pertama kali tiba di ketinggian. Kemoreseptor mana (sentral atau perifer) yang akan menjadi pendorong utama peningkatan ventilasinya? Diskusikan potensi konsekuensi dari hiperventilasi ini terhadap keseimbangan asam-basa darah.

Glosarium Bab

- **Alveolus:** Kantung udara kecil di ujung saluran pernapasan di paru-paru, tempat terjadinya pertukaran gas antara udara dan darah.
- **Ambang Ventilasi (*Ventilatory Threshold, VT*):** Titik selama latihan progresif di mana ventilasi meningkat secara tidak proporsional terhadap konsumsi oksigen.
- **Difusi:** Pergerakan pasif gas melintasi membran dari area bertekanan parsial tinggi ke area bertekanan parsial rendah.
- **Dyspnea:** Sensasi subjektif dari kesulitan bernapas atau sesak napas.

- **Efek Bohr**: Fenomena di mana peningkatan konsentrasi CO₂ dan penurunan pH menyebabkan hemoglobin melepaskan lebih banyak oksigen.
- **Hemoglobin**: Protein di dalam sel darah merah yang mengikat dan mengangkut oksigen.
- **Kemoreseptor**: Sensor yang mendeteksi perubahan kimiawi dalam darah (misalnya, PCO₂, PO₂, pH) dan mengirimkan informasi ke pusat pernapasan.
- **Ventilasi Pulmonal (VE)**: Volume udara yang dihirup atau dihembuskan dari paru-paru per menit.
- **VO₂ max**: Laju maksimal di mana tubuh dapat mengambil, mengangkut, dan menggunakan oksigen selama latihan; dianggap sebagai ukuran terbaik kebugaran aerobik.
- **Volume Tidal (VT)**: Volume udara yang bergerak masuk atau keluar dari paru-paru selama satu kali napas normal.

Daftar Pustaka Bab

- Dempsey, J. A., La Gerche, A., & Hull, J. H. (2020). The respiratory system in the elite endurance athlete: A potentiallyNexus for performance and health. *The Journal of Physiology*, 598(18), 3865-3881. <https://doi.org/10.1113/JP279311>
- di Prampero, P. E. (2023). Factors limiting maximal oxygen consumption in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 123(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-05047-8>
- Draper, N., Williams, C., & Marshall, H. (2024). *Exercise Physiology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003109280>
- Jamnick, N. A., Pettitt, R. W., Granata, C., & Bishop, D. J. (2020). An examination and critique of current methods to

- determine exercise intensity. *Sports Medicine*, 50(10), 1729-1756. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01322-8>
- Lovering, A. T., Romer, L. M., & Haverkamp, H. C. (2022). The restrictive and obstructive lung diseases: Are they a potential limitation to exercise performance? *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 12(11), a041285. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a041285>
 - Powers, S. K., Howley, E. T., & Quindry, J. C. (2020). *Exercise Physiology: Theory and Application to Fitness and Performance*. McGraw-Hill Education.
 - Sheel, A. W., Dominelli, P. B., & Molgat-Seon, Y. (2021). The respiratory system and exercise. In *The Routledge Handbook of Sport and Exercise Systems Genetics* (pp. 143-157). Routledge.
 - Smith, C. A., Ainsworth, D. M., & Henderson, K. S. (2023). Control of breathing during exercise. *Comprehensive Physiology*, 13(1), 1-52. <https://doi.org/10.1002/cphy.c220005>
 - Putri, R., Nursasi, A., Sari, I., & Permatasari, H. (2025). Efektivitas program latihan fisik terstruktur dalam meningkatkan kualitas hidup pasien tuberkulosis: A systematic review. *Holistik Jurnal Kesehatan*. <https://doi.org/10.33024/hjk.v19i4.1012>
 - Martini, T., Prasetyo, A., & Rudiana, R. (2025). PENGARUH LATIHAN SENAM AEROBIK TERHADAP PENINGKATAN KEBUGARAN JASMANI SISWA ASISTEN KEPERAWATAN. *VOCATIONAL: Jurnal Inovasi Pendidikan Kejuruan*. <https://doi.org/10.51878/vocational.v5i3.6856>

BAB 6

METABOLISME DAN PENGGUNAAN SUBSTRAT ENERGI

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- Membedakan peran dan regulasi penggunaan glikogen otot versus glukosa darah selama berbagai intensitas latihan.
- Menganalisis respons hormonal kunci, khususnya insulin dan glukagon, terhadap aktivitas fisik dan dampaknya pada ketersediaan glukosa.
- Menjelaskan dasar fisiologis dan aplikasi praktis dari strategi *carbohydrate loading*.
- Menguraikan proses mobilisasi dan oksidasi asam lemak sebagai sumber energi utama selama latihan ketahanan.
- Mengevaluasi bagaimana intensitas latihan memengaruhi pergeseran penggunaan substrat antara karbohidrat dan lemak (konsep *crossover*).
- Menganalisis peran protein sebagai sumber energi sekunder dan pentingnya keseimbangan nitrogen bagi atlet dan populasi klinis.
- Menjelaskan pentingnya sintesis protein pasca latihan untuk proses perbaikan dan adaptasi otot.

Pendahuluan

Tubuh manusia adalah mesin hibrida yang luar biasa, mampu berjalan dengan berbagai jenis bahan bakar. Pernahkah Anda bertanya mengapa seorang *sprinter* membakar bahan bakar yang berbeda secara fundamental dari seorang ultramaratonis? *Sprinter* mengandalkan bahan bakar beroktan tinggi yang cepat terbakar (karbohidrat) untuk ledakan energi sesaat, sementara ultramaratonis menggunakan sumber bahan bakar diesel yang sangat efisien dan berlimpah (lemak) untuk menempuh jarak yang ekstrem. Pilihan bahan bakar ini tidak terjadi secara kebetulan, melainkan diatur oleh simfoni interaksi metabolik dan hormonal yang presisi, yang ditentukan terutama oleh intensitas dan durasi aktivitas.

Memahami metabolisme substrat energi adalah inti dari persepan latihan dan nutrisi yang efektif. Ini adalah ilmu tentang bagaimana tubuh mengelola sumber dayanya, memutuskan kapan harus "membakar gula" dan kapan harus "membakar lemak". Pengetahuan ini memungkinkan kita untuk beralih dari sekadar berolahraga menjadi berlatih dengan cerdas. Bagi seorang atlet, ini bisa menjadi perbedaan antara mencapai podium dan menabrak "dinding". Bagi pasien diabetes, ini adalah kunci untuk memahami bagaimana olahraga dapat membantu mengontrol gula darah. Bagi siapa pun yang ingin mengelola berat badan, ini adalah dasar untuk merancang program yang mengoptimalkan oksidasi lemak.

Dalam bab ini, kita akan membedah buku pedoman metabolik tubuh. Kita akan mulai dengan karbohidrat, sumber energi pilihan untuk aktivitas intensitas tinggi. Kita akan menjelajahi "dilema" yang dihadapi otot, apakah akan menggunakan simpanan glikogen lokal yang berharga atau menarik glukosa dari aliran darah. Kita juga akan melihat bagaimana hormon seperti insulin dan glukagon bertindak

sebagai manajer lalu lintas, mengarahkan aliran glukosa selama dan setelah latihan.

Selanjutnya, kita akan beralih ke cadangan energi tubuh yang sangat besar namun sering kurang dimanfaatkan, yaitu lemak. Kita akan menelusuri perjalanan asam lemak dari sel-sel lemak di jaringan adiposa, melalui aliran darah, hingga akhirnya dibakar di dalam mitokondria otot. Kita akan mengungkap ilmu di balik "zona pembakaran lemak" dan bagaimana adaptasi terhadap latihan ketahanan dapat mengubah tubuh menjadi mesin pembakar lemak yang lebih efisien. Kita juga akan menyentuh topik adaptasi ketogenik yang sedang populer dan meninjau bukti ilmiah mengenai dampaknya pada performa.

Terakhir, kita akan membahas peran protein. Meskipun sering dianggap hanya sebagai bahan bangunan, protein juga dapat memberikan kontribusi sebagai sumber energi, terutama dalam kondisi ekstrem. Namun, peran utamanya tetap berada di ranah perbaikan dan remodeling. Kita akan melihat bagaimana jendela kesempatan pasca latihan dapat dimanfaatkan untuk mengoptimalkan sintesis protein, mendorong pemulihan dan adaptasi otot yang merupakan tujuan dari setiap program latihan. Dengan memahami interaksi dinamis antara ketiga makronutrien ini, tenaga kesehatan dapat memberikan rekomendasi yang benar-benar personal dan berbasis bukti untuk mengoptimalkan kesehatan dan performa.

6.1. Metabolisme Karbohidrat saat Olahraga

Karbohidrat adalah bahan bakar utama untuk sistem saraf pusat dan merupakan sumber energi yang paling efisien untuk kontraksi otot selama latihan intensitas sedang hingga tinggi. Efisiensi ini berasal dari fakta bahwa oksidasi karbohidrat menghasilkan ATP per unit oksigen yang dikonsumsi lebih banyak dibandingkan dengan lemak,

dan juga dapat menghasilkan ATP secara anaerobik melalui glikolisis. Tubuh menyimpan karbohidrat dalam dua lokasi utama: sebagai glikogen di otot dan hati, dan sebagai glukosa yang bersirkulasi dalam darah. Selama latihan, tubuh harus secara dinamis mengatur penggunaan kedua sumber ini untuk mempertahankan performa dan mencegah hipoglikemia (kadar gula darah rendah) (Hearris et al., 2022).

Pilihan antara menggunakan glikogen otot dan glukosa darah sangat bergantung pada intensitas dan durasi latihan. Pada awal latihan dan selama aktivitas intensitas tinggi, otot sangat bergantung pada simpanan glikogen internalnya. Glikogen otot adalah sumber bahan bakar yang paling mudah diakses dan dapat dipecah dengan cepat menjadi glukosa-6-fosfat untuk memasuki jalur glikolisis, tanpa perlu diangkut melintasi membran sel. Laju pemecahan glikogen (glikogenolisis) secara langsung berkaitan dengan intensitas latihan; semakin keras latihannya, semakin cepat simpanan glikogen terkuras (Impey et al., 2020).

Seiring dengan berlanjutnya durasi latihan, terutama pada intensitas sedang, dan saat simpanan glikogen otot mulai menipis, kontribusi glukosa darah sebagai sumber energi menjadi semakin penting. Hati memainkan peran krusial di sini dengan melepaskan glukosa ke dalam aliran darah melalui proses glikogenolisis (memecah simpanan glikogen hati) dan glukoneogenesis (mensintesis glukosa baru dari prekursor seperti laktat, alanin, dan gliserol). Penyerapan glukosa dari darah oleh otot difasilitasi oleh translokasi transporter glukosa Tipe 4 (GLUT4) ke membran sel, sebuah proses yang dirangsang oleh kontraksi otot itu sendiri (serta oleh insulin) (Draper et al., 2024).

Interaksi antara penggunaan glikogen otot dan glukosa darah ini diatur oleh serangkaian sinyal hormonal dan metabolik yang kompleks. Penurunan insulin dan peningkatan glukagon, epinefrin, dan

norepinefrin selama latihan menciptakan lingkungan hormonal yang mendukung pemecahan glikogen hati dan mobilisasi bahan bakar. Kelelahan selama latihan ketahanan yang berkepanjangan seringkali terkait langsung dengan penipisan simpanan glikogen otot dan ketidakmampuan hati untuk mempertahankan kadar glukosa darah, yang dapat mengganggu fungsi otot dan sistem saraf pusat.

Oleh karena itu, strategi nutrisi yang bertujuan untuk memaksimalkan simpanan glikogen sebelum latihan dan menyediakan karbohidrat eksogen selama latihan menjadi sangat penting untuk performa ketahanan. *Carbohydrate loading*, atau superkompensasi glikogen, adalah strategi yang digunakan oleh atlet untuk memaksimalkan simpanan glikogen otot di atas tingkat normal sebelum kompetisi penting, sehingga menunda timbulnya kelelahan (Impey et al., 2020). Memahami dinamika metabolisme karbohidrat ini memungkinkan tenaga kesehatan dan atlet untuk membuat keputusan nutrisi yang tepat guna mendukung tujuan latihan dan kompetisi mereka.

Analogi: Bayangkan otot Anda adalah sebuah bengkel kerja yang membutuhkan listrik untuk peralatannya. Glikogen otot adalah seperti generator cadangan pribadi yang ada di dalam bengkel itu sendiri: sangat cepat dinyalakan, sangat kuat, dan tidak bergantung pada pasokan eksternal, tetapi bahan bakarnya terbatas. Glukosa darah adalah seperti listrik yang berasal dari jaringan listrik kota (yang dipasok oleh pembangkit listrik utama, yaitu hati). Pada awalnya, untuk pekerjaan cepat dan berat, Anda akan menyalakan generator. Namun, untuk pekerjaan yang berlangsung sepanjang hari, Anda akan sangat bergantung pada pasokan listrik dari kota. Hormon seperti insulin dan glukagon bertindak sebagai teknisi di gardu induk, menyesuaikan pasokan listrik ke seluruh kota berdasarkan permintaan dari bengkel Anda.

6.1.1. Penggunaan Glikogen Otot vs Glukosa Darah

Selama latihan, terutama pada intensitas di atas 60% VO₂ max, glikogen otot adalah substrat karbohidrat yang dominan. Kedekatannya dengan mesin kontraktile dan kemampuannya untuk dipecah dengan cepat menjadikannya sumber energi pilihan untuk produksi ATP yang cepat (Hearris et al., 2022). Laju glikogenolisis diatur oleh faktor lokal di dalam otot, seperti peningkatan konsentrasi kalsium (yang dilepaskan selama kontraksi) dan epinefrin (yang meningkat selama latihan), yang keduanya mengaktifkan enzim kunci fosforilase. Ketersediaan glikogen awal adalah prediktor kuat dari kapasitas daya tahan; atlet dengan simpanan glikogen yang lebih tinggi dapat mempertahankan intensitas latihan yang lebih tinggi untuk waktu yang lebih lama.

Kontribusi glukosa darah meningkat seiring waktu saat glikogen otot menipis. Otot yang aktif meningkatkan penyerapan glukosa dari darah melalui translokasi transporter GLUT4 ke sarkolema. Unikny, kontraksi otot dapat merangsang translokasi GLUT4 melalui jalur yang independen dari insulin, yang menjelaskan mengapa olahraga merupakan terapi yang sangat efektif untuk penderita diabetes tipe 2 (Draper et al., 2024). Namun, laju penyerapan glukosa oleh otot tidak dapat sepenuhnya mengimbangi laju penggunaan bahan bakar yang sangat tinggi pada intensitas tinggi, itulah sebabnya glikogen otot tetap menjadi bahan bakar yang sangat diperlukan untuk performa puncak (Impey et al., 2020).

6.1.2. Peran Insulin dan Glukagon selama Aktivitas

Respons hormonal selama latihan dirancang untuk memastikan ketersediaan bahan bakar yang stabil untuk otot yang bekerja sambil mencegah hipoglikemia. Insulin dan glukagon, dua hormon yang disekresikan oleh pankreas, memainkan peran antagonistik yang

sentral dalam regulasi ini. Insulin, yang dilepaskan sebagai respons terhadap peningkatan glukosa darah, mendorong penyimpanan glukosa (sebagai glikogen) dan menghambat produksi glukosa oleh hati. Selama latihan, kadar insulin dalam sirkulasi menurun. Penurunan ini, yang dimediasi oleh aktivasi sistem saraf simpatis, sangat penting karena mencegah penyerapan glukosa yang berlebihan oleh jaringan yang tidak aktif dan memungkinkan hati untuk melepaskan glukosa ke dalam darah (Draper et al., 2024).

Sebaliknya, kadar glukagon meningkat selama latihan, terutama selama aktivitas yang berkepanjangan. Glukagon bekerja terutama pada hati, merangsang glikogenolisis dan glukoneogenesis untuk meningkatkan output glukosa hepatic dan mempertahankan kadar glukosa darah (Hearris et al., 2022). Keseimbangan antara penurunan insulin dan peningkatan glukagon (bersama dengan katekolamin) secara cermat mengatur produksi glukosa oleh hati agar sesuai dengan laju penggunaannya oleh otot, menjaga euglikemia (kadar glukosa darah normal) untuk waktu selama mungkin.

6.1.3. Strategi Carbohydrate Loading untuk Ketahanan

Carbohydrate loading (superkompensasi glikogen) adalah strategi nutrisi yang dirancang untuk memaksimalkan simpanan glikogen otot sebelum acara ketahanan yang diperkirakan berlangsung lebih dari 90 menit. Tujuannya adalah untuk meningkatkan simpanan glikogen di atas tingkat normal, sehingga menunda penipisan glikogen dan kelelahan. Protokol klasik melibatkan periode latihan berat yang menguras glikogen diikuti oleh beberapa hari diet rendah karbohidrat, dan kemudian beberapa hari diet sangat tinggi karbohidrat sambil mengurangi volume latihan (*tapering*) (Impey et al., 2020).

Protokol yang lebih modern dan tidak terlalu ekstrem telah terbukti sama efektifnya. Protokol ini biasanya hanya melibatkan 2-3 hari diet sangat tinggi karbohidrat (misalnya, 8-12 gram karbohidrat per kilogram berat badan per hari) dikombinasikan dengan istirahat atau latihan yang sangat ringan. Strategi ini dapat meningkatkan simpanan glikogen otot sebesar 50-100% di atas normal. Peningkatan simpanan bahan bakar ini telah terbukti secara konsisten meningkatkan performa dalam acara-acara seperti maraton, triathlon, dan bersepeda jarak jauh dengan memungkinkan atlet untuk mempertahankan kecepatan yang lebih tinggi untuk waktu yang lebih lama (Thomas et al., 2021).

6.2. Metabolisme Lemak sebagai Sumber Energi

Jika karbohidrat adalah bahan bakar untuk balapan cepat, maka lemak adalah bahan bakar untuk perjalanan jauh. Lemak, yang disimpan terutama sebagai trigliserida dalam jaringan adiposa, merupakan cadangan energi terbesar dalam tubuh. Bahkan individu yang sangat ramping memiliki cukup energi yang tersimpan sebagai lemak untuk menopang aktivitas berintensitas rendah selama sehari-hari. Keunggulan lemak sebagai substrat energi terletak pada kepadatan energinya yang tinggi (sekitar 9 kkal per gram, dibandingkan dengan 4 kkal per gram untuk karbohidrat) dan cadangannya yang hampir tidak terbatas. Oksidasi lemak adalah proses aerobik yang terjadi di dalam mitokondria dan menjadi sumber ATP yang dominan selama istirahat dan selama latihan ketahanan berintensitas rendah hingga sedang (Purdom et al., 2022).

Penggunaan lemak sebagai bahan bakar adalah proses multi-langkah. Langkah pertama adalah mobilisasi, di mana trigliserida yang disimpan di dalam sel lemak (adiposit) dipecah menjadi satu molekul gliserol dan tiga molekul asam lemak bebas (*Free Fatty Acids*, FFA). Proses ini, yang disebut lipolisis, dirangsang oleh hormon seperti epinefrin, norepinefrin, dan hormon pertumbuhan, serta dihambat oleh

insulin. Setelah dimobilisasi, FFA dilepaskan ke dalam aliran darah (Draper et al., 2024).

Langkah kedua adalah transportasi. Karena FFA tidak larut dalam air, mereka harus mengikat protein pembawa, albumin, untuk diangkut dalam plasma darah ke otot-otot yang aktif. Langkah ketiga adalah penyerapan oleh sel otot, di mana FFA diangkut melintasi sarkolema. Langkah keempat adalah aktivasi dan transportasi ke dalam mitokondria, di mana proses oksidasi yang sebenarnya terjadi. Di dalam mitokondria, FFA menjalani proses yang disebut oksidasi beta, di mana rantai panjang asam lemak dipecah secara berurutan menjadi unit-unit dua karbon yang disebut Asetil-KoA. Asetil-KoA ini kemudian memasuki Siklus Krebs dan Rantai Transpor Elektron untuk menghasilkan sejumlah besar ATP (Purdom et al., 2022).

Laju oksidasi lemak dipengaruhi secara signifikan oleh intensitas latihan. Oksidasi lemak absolut mencapai puncaknya pada intensitas latihan yang relatif sedang (sekitar 45-65% VO₂ max), sebuah konsep yang sering disebut sebagai "zona pembakaran lemak" atau "FATmax". Pada intensitas yang lebih rendah, laju pengeluaran energi total terlalu rendah untuk menghasilkan oksidasi lemak yang signifikan. Sebaliknya, pada intensitas yang lebih tinggi, tubuh secara progresif beralih ke karbohidrat sebagai bahan bakar pilihan (konsep *crossover*). Peralihan ini terjadi karena beberapa alasan, termasuk rekrutmen serabut otot Tipe II yang lebih glikolitik dan kemungkinan penghambatan transpor FFA ke dalam mitokondria oleh produk sampingan metabolisme karbohidrat yang cepat (Draper et al., 2024).

Latihan ketahanan kronis menghasilkan adaptasi yang luar biasa yang meningkatkan kemampuan tubuh untuk mengoksidasi lemak pada intensitas latihan tertentu. Adaptasi ini termasuk peningkatan kepadatan kapiler di otot, peningkatan jumlah dan ukuran mitokondria, dan peningkatan aktivitas enzim yang terlibat dalam

transportasi dan oksidasi FFA. Adaptasi ini bersifat "menghemat glikogen" (*glycogen-sparing*), karena dengan membakar lebih banyak lemak pada kecepatan tertentu, tubuh dapat menghemat simpanan karbohidratnya yang terbatas untuk digunakan nanti dalam perlombaan atau untuk lonjakan kecepatan.

Analogi: Pikirkan metabolisme lemak seperti menggunakan kapal tanker minyak raksasa sebagai sumber energi. Cadangan bahan bakarnya (jaringan adiposa) sangat besar. Namun, prosesnya rumit. Pertama, Anda harus mengebor minyak mentah dari sumur lepas pantai (lipolisis). Kemudian, minyak mentah itu harus dimuat ke kapal-kapal kecil (FFA yang terikat pada albumin) untuk diangkut ke pelabuhan (otot). Di pelabuhan, minyak harus dipindahkan ke kilang (mitokondria) untuk diolah (oksidasi beta) menjadi bensin yang dapat digunakan (Asetil-KoA). Proses ini sangat efisien untuk perjalanan jarak jauh dengan kecepatan stabil (latihan intensitas sedang), tetapi terlalu lambat untuk memberikan energi bagi mobil balap (latihan intensitas tinggi). Latihan ketahanan adalah seperti membangun lebih banyak kilang dan pelabuhan, membuat seluruh proses menjadi lebih efisien.

6.2.1. Mobilisasi Asam Lemak Bebas (FFA) dari Jaringan Adiposa

Mobilisasi FFA dari jaringan adiposa adalah langkah pertama dan seringkali menjadi langkah pembatas laju dalam penggunaan lemak sebagai energi. Proses ini, yang disebut lipolisis, dikatalisis oleh enzim *hormone-sensitive lipase* (HSL). Aktivitas HSL dirangsang oleh hormon katekolamin (epinefrin dan norepinefrin), yang kadarnya meningkat selama latihan, dan dihambat secara kuat oleh insulin. Oleh karena itu, konsumsi karbohidrat sebelum atau selama latihan, yang dapat merangsang pelepasan insulin, dapat menumpulkan respons

lipolitik dan mengurangi ketersediaan FFA untuk oksidasi (Purdom et al., 2022).

Setelah FFA dan gliserol dilepaskan dari sel adiposa, FFA harus diangkut melalui aliran darah. Karena tidak larut dalam air, FFA mengikat protein albumin. Konsentrasi FFA dalam plasma adalah hasil dari keseimbangan antara laju pelepasannya dari jaringan adiposa dan laju penyerapannya oleh otot. Latihan ketahanan kronis dapat meningkatkan sensitivitas sel adiposa terhadap stimulus lipolitik dari katekolamin, yang mengarah pada mobilisasi FFA yang lebih besar selama latihan (Draper et al., 2024).

6.2.2. Oksidasi Lemak pada Berbagai Intensitas Latihan

Hubungan antara intensitas latihan dan laju oksidasi lemak sering digambarkan oleh konsep *crossover*. Pada intensitas yang sangat rendah (misalnya, berjalan santai), lemak adalah sumber energi yang dominan, menyediakan sebagian besar ATP yang dibutuhkan. Seiring dengan meningkatnya intensitas ke tingkat sedang, laju total pengeluaran energi meningkat, dan laju oksidasi lemak absolut juga meningkat, mencapai puncaknya pada zona "FATmax" (sekitar 60% VO₂ max pada individu terlatih) (Maunder et al., 2022).

Namun, ketika intensitas terus meningkat melampaui titik ini, terjadi pergeseran atau *crossover* di mana karbohidrat menjadi bahan bakar yang dominan, dan kontribusi relatif serta laju oksidasi lemak absolut mulai menurun. Penurunan oksidasi lemak pada intensitas tinggi ini disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk peningkatan rekrutmen serabut otot Tipe II yang kurang mampu mengoksidasi lemak, dan penghambatan enzim kunci (karnitin palmitoiltransferase I) yang bertanggung jawab untuk mengangkut FFA ke dalam mitokondria (Draper et al., 2024). Latihan ketahanan dapat menggeser titik *crossover* ke kanan, memungkinkan atlet untuk bekerja pada intensitas

yang lebih tinggi sambil tetap mengoksidasi lemak dalam jumlah yang signifikan.

6.2.3. Adaptasi Ketogenik dan Efeknya pada Performa

Diet ketogenik, yaitu diet sangat rendah karbohidrat dan sangat tinggi lemak, memaksa tubuh masuk ke dalam keadaan ketosis, di mana hati memproduksi badan keton (asetoasetat dan beta-hidroksibutirat) dari asam lemak. Badan keton ini kemudian dapat digunakan sebagai sumber energi oleh banyak jaringan, termasuk otak dan otot. Adaptasi terhadap diet ketogenik (adaptasi keto) secara dramatis meningkatkan kapasitas tubuh untuk mengoksidasi lemak selama latihan (McSwiney et al., 2021).

Namun, efek adaptasi keto pada performa olahraga masih menjadi bahan perdebatan. Sementara kapasitas oksidasi lemak meningkat pesat, kapasitas untuk menggunakan karbohidrat (metabolisme glikolitik) tampaknya terganggu. Bagi atlet dalam olahraga ultramaraton berintensitas rendah, adaptasi keto mungkin menawarkan keuntungan dengan mengurangi ketergantungan pada asupan karbohidrat. Akan tetapi, untuk sebagian besar olahraga yang melibatkan intensitas tinggi atau ledakan kecepatan, ketersediaan karbohidrat sangat penting. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa meskipun adaptasi keto dapat mempertahankan performa pada intensitas sub-maksimal, ia dapat mengorbankan performa pada intensitas yang lebih tinggi yang bergantung pada glikolisis (Burke, 2021).

6.3. Metabolisme Protein dan Keseimbangan Nitrogen

Protein, yang terdiri dari asam-asam amino, secara tradisional dipandang sebagai bahan bangunan struktural tubuh dan komponen fungsional (enzim, hormon), bukan sebagai sumber energi utama.

Pandangan ini sebagian besar benar. Selama latihan, kontribusi protein dan asam amino terhadap produksi ATP total relatif kecil, biasanya diperkirakan hanya menyumbang sekitar 5-10% dari total pengeluaran energi, bahkan selama latihan ketahanan yang sangat panjang (Draper et al., 2024). Tubuh lebih memilih untuk menghemat protein fungsionalnya dan mengandalkan cadangan karbohidrat dan lemak yang lebih besar dan lebih khusus.

Namun, dalam kondisi tertentu, seperti latihan yang sangat lama (lebih dari 2-3 jam) atau ketika simpanan glikogen sangat rendah, oksidasi asam amino sebagai bahan bakar dapat meningkat. Beberapa asam amino, khususnya asam amino rantai cabang (*Branched-Chain Amino Acids*, BCAA) seperti leusin, isoleusin, dan valin, dapat dioksidasi secara langsung di dalam otot untuk energi. Asam amino lain, seperti alanin, dapat diubah menjadi glukosa di hati melalui siklus glukosa-alanin, memberikan kontribusi pada glukoneogenesis untuk membantu mempertahankan kadar glukosa darah (Zariyah & Pramono, 2025).

Meskipun kontribusinya sebagai bahan bakar kecil, peran protein yang paling penting dalam konteks olahraga terletak pada periode pemulihan pasca latihan. Latihan, terutama latihan beban, menyebabkan kerusakan mikro pada serabut otot dan meningkatkan pemecahan protein otot (*Muscle Protein Breakdown*, MPB). Sebagai respons, tubuh juga meningkatkan laju sintesis protein otot (*Muscle Protein Synthesis*, MPS). Keseimbangan antara MPS dan MPB menentukan apakah otot akan mengalami pertumbuhan (hipertrofi), penyusutan (atrofi), atau tetap sama (Jackman & Kandarian, 2022).

Setelah sesi latihan, terutama latihan resistensi, ada "jendela anabolik" di mana otot sangat peka terhadap sinyal pertumbuhan. Mengonsumsi protein berkualitas tinggi selama periode ini secara signifikan merangsang MPS, menggeser keseimbangan bersih ke arah

anabolisme (pembangunan jaringan) dan memfasilitasi perbaikan dan adaptasi otot. Asam amino leusin secara khusus dianggap sebagai pemicu utama untuk memulai proses MPS melalui aktivasi jalur pensinyalan mTOR (Jackman & Kandarian, 2022).

Oleh karena itu, memastikan asupan protein yang cukup sangat penting bagi individu yang aktif secara fisik. Kebutuhan protein bagi atlet jauh lebih tinggi daripada populasi umum yang tidak aktif. Keseimbangan nitrogen adalah metode yang digunakan untuk menilai kecukupan protein, di mana asupan nitrogen (dari protein) dibandingkan dengan kehilangan nitrogen (melalui urin, feses, keringat). Keseimbangan nitrogen positif (asupan > kehilangan) menunjukkan keadaan anabolik dan diperlukan untuk pertumbuhan otot. Rekomendasi saat ini untuk atlet berkisar antara 1.2 hingga 2.0 gram protein per kilogram berat badan per hari, tergantung pada jenis dan volume latihan, untuk mendukung pemulihan, adaptasi, dan pemeliharaan massa otot (Thomas et al., 2021).

Contoh Kasus: Dua individu melakukan sesi latihan beban yang identik. Setelah latihan, Individu A mengonsumsi minuman pemulihan yang mengandung 25 gram protein whey berkualitas tinggi. Individu B tidak mengonsumsi apa-apa selama beberapa jam. Pada Individu A, lonjakan asam amino dalam darah, terutama leusin, secara kuat merangsang jalur mTOR dan meningkatkan laju sintesis protein otot (MPS) jauh di atas laju pemecahan protein otot (MPB), menciptakan lingkungan anabolik yang kuat. Pada Individu B, laju MPS juga meningkat sebagai respons terhadap latihan, tetapi tanpa ketersediaan asam amino yang cukup, peningkatan ini lebih kecil dan keseimbangan protein bersihnya mungkin tetap negatif atau netral. Seiring waktu, pendekatan Individu A akan menghasilkan adaptasi otot (kekuatan dan hipertrofi) yang lebih besar.

6.3.1. Kontribusi Protein sebagai Sumber Energi Sekunder

Kontribusi protein terhadap produksi energi selama latihan bersifat minimal dalam kondisi gizi yang baik. Namun, kontribusinya menjadi lebih signifikan ketika simpanan glikogen otot dan hati menipis, seperti selama puasa atau latihan ketahanan yang sangat berkepanjangan. Dalam skenario ini, pemecahan protein otot meningkat untuk melepaskan asam amino. Asam amino rantai cabang (BCAA) dapat dioksidasi langsung di otot, sementara asam amino lain seperti alanin diangkut ke hati untuk diubah menjadi glukosa melalui glukoneogenesis (Draper et al., 2024).

Meskipun proses ini membantu menyediakan bahan bakar tambahan, proses ini juga berarti katabolisme (pemecahan) jaringan otot fungsional. Peningkatan oksidasi protein ditandai dengan peningkatan produksi urea, produk akhir dari metabolisme nitrogen, yang kemudian diekskresikan dalam urin dan keringat. Mengonsumsi karbohidrat selama latihan ketahanan yang panjang dapat secara signifikan mengurangi ketergantungan pada oksidasi asam amino, sehingga memiliki efek "menghemat protein" (*protein-sparing*) (Thomas et al., 2021).

6.3.2. Sintesis Protein Pasca Latihan untuk Pemulihan

Latihan, khususnya latihan resistensi, adalah stimulus kuat untuk sintesis protein otot (MPS). Namun, latihan itu sendiri sebenarnya menempatkan otot dalam keadaan katabolik bersih karena pemecahan protein juga meningkat. Kondisi anabolik bersih ($MPS > MPB$) hanya terjadi selama periode pemulihan, dan ini sangat ditingkatkan dengan ketersediaan asam amino dari asupan protein (Jackman & Kandarian, 2022). Konsumsi protein setelah latihan menyediakan bahan baku yang diperlukan untuk memperbaiki kerusakan yang diinduksi oleh

latihan dan untuk mensintesis protein kontraktile baru, yang merupakan dasar dari hipertrofi otot.

Waktu asupan protein relatif terhadap latihan, yang dikenal sebagai "jendela anabolik", telah menjadi topik banyak penelitian. Sementara gagasan tentang jendela 30-60 menit yang sempit mungkin terlalu disederhanakan, konsensus saat ini adalah bahwa mengonsumsi protein berkualitas tinggi dalam beberapa jam setelah latihan bermanfaat untuk memaksimalkan respons adaptif. Sumber protein yang kaya akan leusin dan cepat dicerna, seperti protein whey, sangat efektif dalam merangsang MPS (Morton et al., 2020).

6.3.3. Kebutuhan Protein bagi Atlet Terapan Kesehatan

Kebutuhan protein untuk individu yang aktif secara fisik secara signifikan lebih tinggi daripada Rekomendasi Diet yang Dianjurkan (RDA) untuk populasi sedentari (0.8 g/kg/hari). Atlet ketahanan membutuhkan protein tambahan untuk memperbaiki kerusakan otot dan untuk mendukung sintesis enzim oksidatif dan mitokondria. Atlet kekuatan membutuhkan protein dalam jumlah besar untuk menyediakan bahan baku untuk hipertrofi otot. Rekomendasi berbasis bukti saat ini menyarankan asupan protein harian sebesar 1.2-1.7 g/kg untuk atlet ketahanan dan 1.6-2.2 g/kg untuk atlet kekuatan (Thomas et al., 2021).

Dalam konteks klinis, seperti rehabilitasi setelah cedera atau operasi, atau untuk melawan sarkopenia pada lansia, asupan protein yang adekuat, terutama bila dikombinasikan dengan latihan resistensi, sangat penting untuk meminimalkan kehilangan otot dan mempromosikan pemulihan fungsional. Mendistribusikan asupan protein secara merata sepanjang hari dalam porsi 20-40 gram per makan tampaknya lebih efektif untuk merangsang MPS secara

berkelanjutan dibandingkan dengan mengonsumsi sebagian besar protein dalam satu kali makan besar (Morton et al., 2020).

Rangkuman Bab

- Metabolisme substrat energi melibatkan interaksi dinamis antara karbohidrat, lemak, dan protein, dengan kontribusi relatif yang ditentukan oleh intensitas dan durasi latihan.
- Karbohidrat, yang disimpan sebagai glikogen otot dan glukosa darah, adalah bahan bakar dominan untuk latihan intensitas sedang hingga tinggi. Penipisan glikogen seringkali menjadi faktor pembatas dalam performa ketahanan.
- Respons hormonal selama latihan (penurunan insulin, peningkatan glukagon dan katekolamin) memfasilitasi produksi dan mobilisasi bahan bakar untuk memenuhi permintaan otot.
- Lemak adalah cadangan energi terbesar tubuh dan sumber bahan bakar utama selama istirahat dan latihan intensitas rendah hingga sedang. Latihan ketahanan meningkatkan kapasitas tubuh untuk mengoksidasi lemak.
- Konsep *crossover* menjelaskan pergeseran dari metabolisme lemak ke karbohidrat sebagai bahan bakar dominan seiring dengan meningkatnya intensitas latihan.
- Protein memberikan kontribusi minimal sebagai sumber energi tetapi memainkan peran yang sangat penting dalam pemulihan, perbaikan, dan adaptasi otot pasca latihan.
- Asupan protein yang adekuat setelah latihan merangsang sintesis protein otot (MPS), yang sangat penting untuk hipertrofi dan pemulihan.
- Kebutuhan protein untuk individu yang aktif secara fisik dan populasi klinis tertentu secara signifikan lebih tinggi daripada populasi umum.

Latihan Mahasiswa

Soal Esai

1. Jelaskan konsep *crossover*. Faktor-faktor fisiologis apa yang menyebabkan tubuh beralih dari lemak ke karbohidrat sebagai sumber energi utama saat intensitas latihan meningkat?
2. Bandingkan dan kontraskan peran glikogen otot dan glukosa darah selama maraton. Bagaimana peran masing-masing berubah seiring berjalannya waktu selama perlombaan?
3. Jelaskan perubahan hormonal utama (insulin, glukagon, epinefrin) yang terjadi selama latihan ketahanan. Bagaimana perubahan ini secara kolektif membantu mempertahankan ketersediaan bahan bakar?
4. Seorang atlet ingin memaksimalkan pemulihan dan pertumbuhan otot setelah sesi latihan beban. Berikan rekomendasi nutrisi pasca latihan yang berbasis bukti, dengan fokus pada peran protein. Jelaskan mekanisme di balik rekomendasi Anda (misalnya, MPS, jalur mTOR).
5. Diskusikan pro dan kontra dari diet ketogenik untuk seorang atlet ketahanan. Dalam jenis olahraga apa diet ini mungkin bermanfaat, dan dalam jenis olahraga apa diet ini mungkin merugikan performa?

Soal Pilihan Ganda

1. Selama lari cepat 100 meter, sumber energi utama yang digunakan adalah...
 - A. Oksidasi lemak
 - B. Glikogen otot -V-
 - C. Asam amino
 - D. Glukosa darah

2. Hormon yang kadarnya menurun selama latihan untuk memfasilitasi pelepasan bahan bakar ke dalam darah adalah...
 - A. Glukagon
 - B. Epinefrin
 - C. Kortisol
 - D. Insulin -V-

3. Laju oksidasi lemak absolut mencapai puncaknya selama latihan pada...
 - A. Intensitas sangat rendah (istirahat)
 - B. Intensitas sedang (~60% VO₂ max) -V-
 - C. Intensitas tinggi (~90% VO₂ max)
 - D. Intensitas maksimal

4. Proses pemecahan trigliserida yang disimpan di jaringan adiposa menjadi asam lemak bebas disebut...
 - A. Glikolisis
 - B. Glukoneogenesis
 - C. Lipolisis -V-
 - D. Oksidasi beta

5. Kontribusi protein terhadap total pengeluaran energi selama latihan biasanya sekitar...
 - A. Kurang dari 1%
 - B. 5-10% -V-
 - C. 25-30%
 - D. Lebih dari 50%

6. Asam amino yang dianggap sebagai pemicu utama sintesis protein otot (MPS) adalah...
 - A. Alanin
 - B. Glutamin
 - C. Leusin -V-
 - D. Valin

7. Strategi nutrisi yang dirancang untuk memaksimalkan simpanan glikogen otot sebelum kompetisi ketahanan disebut...
 - A. Diet ketogenik
 - B. Puasa intermiten
 - C. *Carbohydrate loading* -V-
 - D. Diet tinggi protein

8. Transporter glukosa di otot yang direkrut ke membran sel oleh kontraksi otot adalah...
 - A. SGLT1
 - B. GLUT2
 - C. GLUT4 -V-
 - D. Fructose transporter

9. Adaptasi kronis terhadap latihan ketahanan yang membantu menghemat glikogen adalah...
 - A. Peningkatan kapasitas untuk mengoksidasi lemak -V-
 - B. Penurunan jumlah mitokondria
 - C. Peningkatan ketergantungan pada glikolisis
 - D. Penurunan simpanan trigliserida intramuskular

10. Keseimbangan nitrogen positif diperlukan untuk...
- A. Menurunkan berat badan
 - B. Pertumbuhan dan perbaikan otot (anabolisme) -V-
 - C. Memaksimalkan oksidasi lemak
 - D. Mengurangi kebutuhan cairan

Studi Kasus atau Tugas Kontekstual

1. Seorang klien ingin menurunkan berat badan dan telah membaca di internet bahwa untuk "membakar lemak", ia harus berolahraga dengan intensitas rendah untuk waktu yang lama. Berdasarkan pemahaman Anda tentang metabolisme substrat dan pengeluaran energi total, evaluasi saran ini. Jelaskan kepada klien mengapa berolahraga pada intensitas yang sedikit lebih tinggi (misalnya, di sekitar atau sedikit di atas "FATmax") mungkin lebih efektif untuk tujuan penurunan berat badan dalam jangka panjang, bahkan jika persentase energi dari lemak lebih rendah.

Glosarium Bab

- **Asam Amino Rantai Cabang (BCAA):** Sekelompok tiga asam amino esensial (leusin, isoleusin, valin) yang dapat dioksidasi langsung di otot untuk energi.
- **Carbohydrate Loading:** Strategi diet dan latihan yang bertujuan untuk memaksimalkan simpanan glikogen otot di atas tingkat normal.
- **Crossover Concept:** Konsep yang menggambarkan pergeseran dari lemak ke karbohidrat sebagai substrat energi dominan seiring dengan meningkatnya intensitas latihan.
- **Glukoneogenesis:** Sintesis glukosa dari sumber non-karbohidrat (seperti laktat, alanin, gliserol) yang terjadi terutama di hati.

- **Glikogen**: Bentuk penyimpanan karbohidrat di dalam tubuh, ditemukan terutama di otot dan hati.
- **Lipolisis**: Proses pemecahan trigliserida menjadi gliserol dan tiga asam lemak bebas.
- **Oksidasi Beta**: Proses metabolik di dalam mitokondria di mana asam lemak dipecah untuk menghasilkan Asetil-KoA, NADH, dan FADH₂.
- **Siklus Glukosa-Alanin**: Jalur di mana alanin yang dilepaskan dari otot diangkut ke hati dan diubah menjadi glukosa, yang kemudian dapat kembali ke otot sebagai bahan bakar.
- **Sintesis Protein Otot (MPS)**: Proses di mana sel-sel otot membangun protein baru dari asam amino; penting untuk perbaikan dan pertumbuhan otot.
- **Trigliserida**: Bentuk utama penyimpanan lemak dalam tubuh, terdiri dari satu molekul gliserol yang terikat pada tiga molekul asam lemak.

Daftar Pustaka Bab

- Burke, L. M. (2021). Ketogenic low-CHO, high-fat diet: the future of elite endurance sport?. *The Journal of Physiology*, 599(3), 819-843. <https://doi.org/10.1113/JP278928>
- Draper, N., Williams, C., & Marshall, H. (2024). *Exercise Physiology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003109280>
- Hearnis, M. A., Hammond, K. M., Fell, J. M., & Morton, J. P. (2022). Regulation of muscle glycogen metabolism during exercise: Implications for endurance performance and training adaptations. *Nutrients*, 14(11), 2261. <https://doi.org/10.3390/nu14112261>
- Impey, P., Hammond, K. M., Shepherd, S. O., Sharples, A. P., & Morton, J. P. (2020). Fuel for the work required: a practical approach to amalgamating train-low paradigms for endurance

- athletes. *Physiological reports*, 8(12), e14470. <https://doi.org/10.14814/phy2.14470>
- Jackman, R. W., & Kandarian, S. C. (2022). The molecular basis of skeletal muscle hypertrophy. *Biochemical Journal*, 479(2), 165-185. <https://doi.org/10.1042/BCJ20210492>
 - Maunder, E., Plews, D. J., & Kilding, A. E. (2022). Context is key: The impact of exercise intensity and duration on the measurement of maximal fat oxidation. *Sports Medicine-Open*, 8(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00469-8>
 - McSwiney, F. T., Doyle, L., & Plews, D. J. (2021). The effect of a ketogenic low carbohydrate, high fat diet on aerobic capacity and exercise performance in endurance athletes: a systematic review and meta-analysis. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 18(1), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12970-021-00481-6>
 - Morton, R. W., Murphy, K. T., McKellar, S. R., Schoenfeld, B. J., Henselmans, M., Helms, E., ... & Phillips, S. M. (2020). A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the effect of protein supplementation on resistance training-induced gains in muscle mass and strength in healthy adults. *British journal of sports medicine*, 52(6), 376-384. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-097608>
 - Purdom, T., Kravitz, L., Dokladny, K., & Mermier, C. (2022). Understanding the factors that effect maximal fat oxidation. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 19(1), 1-20. <https://doi.org/10.1080/15502783.2022.2064303>
 - Thomas, D. T., Erdman, K. A., & Burke, L. M. (2021). Position of the Academy of Nutrition and Dietetics, Dietitians of Canada, and the American College of Sports Medicine: Nutrition and athletic performance. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 116(3), 501-528.

- Zariyah, H., & Pramono, A. (2025). SINTESIS SENYAWA METABOLIT OLEH MIKROBIOTA SALURAN CERNA DAN METABOLIC DYSFUNCTION-ASSOCIATED STEATOTIC LIVER DISEASE (MASLD): TINJAUAN PADA SCFA DAN BCAA. *Journal of Nutrition College*. <https://doi.org/10.14710/jnc.v14i2.48176>

BAB 7

KESEIMBANGAN CAIRAN DAN TERMOREGULASI

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- Menjelaskan mekanisme utama produksi panas metabolik selama aktivitas fisik.
- Membedakan empat jalur utama pertukaran panas antara tubuh dan lingkungan, yaitu radiasi, konduksi, konveksi, dan evaporasi.
- Menganalisis peran sentral hipotalamus sebagai pusat termoregulasi tubuh.
- Menguraikan proses fisiologis pembentukan keringat dan dampaknya terhadap keseimbangan cairan.
- Mengevaluasi konsekuensi dehidrasi dan kehilangan elektrolit terhadap fungsi kardiovaskular dan neuromuskular.
- Menjelaskan proses adaptasi fisiologis (aklimatisasi) terhadap lingkungan panas dan dingin.
- Merancang strategi rehidrasi yang efektif untuk sebelum, selama, dan setelah latihan.

Pendahuluan

Tubuh manusia adalah sebuah mesin biokimia yang beroperasi dalam rentang suhu internal yang sangat sempit. Suhu inti tubuh dipertahankan secara ketat di sekitar 37°C. Setiap penyimpangan signifikan dari titik setel ini dapat mengganggu fungsi enzimatik,

merusak struktur protein, dan dalam kasus ekstrem, mengancam jiwa. Tantangan terbesar bagi stabilitas termal ini muncul selama latihan fisik. Kurang dari 25% energi yang dihasilkan tubuh untuk kontraksi otot diubah menjadi kerja mekanik, sementara lebih dari 75% sisanya dilepaskan sebagai panas metabolik. Panas ini, jika tidak dibuang secara efisien, dapat dengan cepat menaikkan suhu inti ke tingkat yang berbahaya.

Pikirkan seorang pelari maraton yang berkompetisi di bawah terik matahari. Tubuhnya menghasilkan panas setara dengan pemanas ruangan kecil, yang secara konstan mengancam untuk "merebus" sistem internalnya. Di sisi lain, bayangkan seorang perenang perairan terbuka di saluran Inggris, yang tubuhnya terus-menerus kehilangan panas ke air dingin di sekitarnya, menghadapi risiko hipotermia. Dalam kedua skenario tersebut, kelangsungan hidup dan performa bergantung pada kemampuan tubuh untuk menyeimbangkan produksi panas dengan kehilangan panas. Ini adalah ranah termoregulasi, sebuah proses fisiologis yang kompleks dan vital.

Bab ini akan menyelidiki bagaimana tubuh mencapai prestasi termoregulasi yang luar biasa ini. Kita akan mulai dengan mengidentifikasi sumber panas utama selama latihan dan menjelajahi empat jalur fisika dasar yang digunakan tubuh untuk bertukar panas dengan lingkungannya. Kita akan menemukan bahwa pada hari yang panas, satu mekanisme, yaitu evaporasi keringat, menjadi jalur yang paling dominan dan sangat diperlukan. Kita akan membedah peran hipotalamus di otak, yang berfungsi sebagai termostat biologis yang sangat canggih, terus-menerus memantau suhu dan mengatur respons fisiologis untuk mempertahankan homeostasis.

Fokus kita kemudian akan beralih ke alat pendingin utama tubuh, yaitu keringat. Kita akan membahas fisiologi kelenjar keringat dan bagaimana produksi keringat yang melimpah, meskipun penting untuk

pendinginan, datang dengan biaya, yaitu kehilangan cairan dan elektrolit. Dehidrasi adalah salah satu tantangan paling umum dan serius yang dihadapi oleh individu yang aktif. Kita akan menganalisis bagaimana penurunan volume plasma akibat dehidrasi memberikan tekanan besar pada sistem kardiovaskular dan bagaimana kehilangan elektrolit seperti natrium dapat mengganggu fungsi saraf dan otot. Kita juga akan membahas kondisi medis serius yang dapat timbul ketika termoregulasi gagal, seperti *heat exhaustion* dan *heat stroke* yang mengancam jiwa.

Tubuh manusia juga memiliki kemampuan luar biasa untuk beradaptasi. Kita akan mengeksplorasi proses aklimatisasi, di mana paparan berulang terhadap stres panas atau dingin memicu serangkaian adaptasi yang meningkatkan kemampuan tubuh untuk mengatasi lingkungan ekstrem tersebut. Akhirnya, kita akan menerjemahkan semua pengetahuan fisiologis ini ke dalam aplikasi praktis, membahas strategi rehidrasi berbasis bukti yang dapat digunakan oleh tenaga kesehatan untuk memberikan nasihat kepada atlet dan populasi umum guna memastikan mereka tetap terhidrasi, aman, dan berkinerja optimal.

7.1. Mekanisme Pengaturan Suhu Tubuh

Termoregulasi adalah proses fisiologis di mana tubuh mempertahankan suhu inti internalnya dalam rentang yang stabil dan sempit (sekitar 36.1°C hingga 37.8°C), terlepas dari fluktuasi besar pada suhu lingkungan dan laju produksi panas metabolik. Kemampuan untuk mempertahankan homeostasis termal ini sangat penting karena sebagian besar reaksi enzimatik dalam tubuh, yang mendasari semua proses kehidupan, sangat sensitif terhadap suhu dan berfungsi optimal hanya dalam rentang tersebut (Havenith, 2021). Latihan fisik memberikan tantangan termoregulasi yang paling

signifikan, karena dapat meningkatkan laju produksi panas metabolik sebanyak 15 hingga 20 kali lipat di atas tingkat istirahat.

Keseimbangan panas tubuh dapat dijelaskan dengan persamaan sederhana: Perubahan Simpanan Panas Tubuh = Produksi Panas - Kehilangan Panas. Jika produksi panas melebihi kehilangan panas, suhu inti tubuh akan meningkat (hipertermia). Sebaliknya, jika kehilangan panas melebihi produksi panas, suhu inti akan menurun (hipotermia). Selama latihan, tujuan dari sistem termoregulasi adalah untuk meningkatkan kehilangan panas agar seimbang dengan laju produksi panas yang meningkat, sehingga meminimalkan perubahan pada simpanan panas dan menjaga suhu inti tetap stabil (Ioannou et al., 2021).

Produksi panas metabolik adalah produk sampingan yang tak terhindarkan dari metabolisme energi. Setiap kali energi diubah dari satu bentuk ke bentuk lain (misalnya, dari energi kimia dalam ATP menjadi energi mekanik untuk kontraksi otot), sebagian besar energi hilang sebagai panas. Selama latihan, peningkatan laju metabolisme yang dramatis di otot rangka menjadi sumber utama beban panas internal.

Untuk melawan peningkatan panas ini, tubuh menggunakan empat mekanisme utama untuk mentransfer panas ke lingkungan: konduksi, konveksi, radiasi, dan evaporasi. Tiga mekanisme pertama bergantung pada adanya gradien suhu antara kulit dan lingkungan, artinya mereka hanya efektif jika lingkungan lebih dingin daripada kulit. Evaporasi, yaitu konversi keringat (cairan) menjadi uap air (gas), adalah satu-satunya mekanisme yang memungkinkan kehilangan panas ketika suhu lingkungan sama dengan atau lebih tinggi dari suhu kulit (Draper et al., 2024).

Seluruh sistem ini diatur oleh pusat kontrol utama yang terletak di hipotalamus, sebuah area kecil di dasar otak. Hipotalamus berfungsi seperti termostat yang sangat canggih. Ia menerima informasi aferen dari termoreseptor sentral (yang memantau suhu darah yang mengalir melaluinya) dan termoreseptor perifer (yang terletak di kulit dan memantau suhu lingkungan). Hipotalamus mengintegrasikan informasi ini dan membandingkannya dengan "titik setel" biologis sekitar 37°C. Jika suhu tubuh menyimpang dari titik setel ini, hipotalamus akan mengoordinasikan serangkaian respons fisiologis eferen, seperti perubahan aliran darah kulit dan laju keringat, untuk mengembalikan suhu kembali ke normal (Havenith, 2021).

Analogi: Bayangkan sistem termoregulasi tubuh seperti sistem pendingin pada mesin mobil. Produksi panas metabolik selama latihan adalah seperti panas yang dihasilkan oleh mesin yang bekerja keras. Hipotalamus adalah unit kontrol komputer mesin, yang terus-menerus memantau sensor suhu. Jika sensor mendeteksi mesin mulai terlalu panas, unit kontrol akan mengaktifkan sistem pendingin. Ia akan mengalihkan cairan pendingin (aliran darah kulit) ke radiator (kulit) dan menyalakan kipas (produksi keringat dan evaporasi) untuk membuang kelebihan panas ke udara. Jika sistem pendingin ini gagal atau kewalahan, mesin akan mengalami *overheat* (*heat stroke*).

7.1.1. Produksi Panas Metabolik saat Latihan

Produksi panas metabolik adalah hasil yang tak terhindarkan dari proses konversi energi dalam tubuh. Berdasarkan hukum kedua termodinamika, tidak ada transfer energi yang 100% efisien; sebagian energi selalu hilang sebagai panas. Dalam konteks biologis, ketika makronutrien (karbohidrat, lemak) dioksidasi untuk menghasilkan ATP, dan kemudian ketika ATP dihidrolisis untuk memberi daya pada kontraksi otot, efisiensi keseluruhannya hanya sekitar 20-25%. Ini berarti bahwa untuk setiap 100 kalori energi yang dikeluarkan tubuh

selama latihan, hanya 20-25 kalori yang menjadi kerja mekanik, sementara 75-80 kalori sisanya dilepaskan sebagai panas (Draper et al., 2024).

Laju produksi panas secara langsung sebanding dengan laju metabolisme, yang pada gilirannya sebanding dengan intensitas latihan. Selama latihan intensitas tinggi, seorang atlet dapat menghasilkan lebih dari 1000 Watt panas, cukup untuk menaikkan suhu inti tubuh sebesar 1°C setiap 5 menit jika panas tersebut tidak dapat dihilangkan (Ioannou et al., 2021). Oleh karena itu, kemampuan untuk membuang beban panas metabolik ini adalah penentu kritis dari kemampuan untuk mempertahankan performa dan menghindari penyakit akibat panas.

7.1.2. Proses Radiasi, Konduksi, Konveksi, dan Evaporasi

Tubuh bertukar panas dengan lingkungan melalui empat proses fisik. Radiasi adalah transfer panas melalui gelombang elektromagnetik inframerah. Tubuh secara konstan memancarkan panas ke objek yang lebih dingin di sekitarnya (seperti dinding) dan menyerap panas dari objek yang lebih hangat (seperti matahari). Saat istirahat di lingkungan dalam ruangan yang sejuk, radiasi adalah mekanisme kehilangan panas yang signifikan (Draper et al., 2024). Konduksi adalah transfer panas melalui kontak fisik langsung dengan objek lain, seperti duduk di kursi yang dingin. Konveksi adalah transfer panas ke molekul udara atau air yang bergerak yang bersentuhan dengan kulit. Aliran udara (angin) atau air secara signifikan meningkatkan kehilangan panas secara konvektif.

Ketiga mekanisme ini (jalur panas kering) memerlukan gradien suhu, di mana kulit harus lebih hangat daripada lingkungan agar kehilangan panas terjadi. Ketika suhu lingkungan mendekati atau melebihi suhu kulit, mekanisme ini menjadi tidak efektif atau bahkan dapat

menyebabkan penambahan panas ke tubuh. Dalam kondisi ini, evaporasi menjadi satu-satunya jalur untuk pendinginan. Evaporasi adalah proses di mana keringat di permukaan kulit berubah menjadi uap air. Proses perubahan fasa ini membutuhkan energi (panas laten penguapan), yang diambil dari kulit, sehingga mendinginkan tubuh. Keefektifan pendinginan evaporatif sangat bergantung pada kelembapan relatif udara; di lingkungan yang sangat lembap, gradien tekanan uap air antara kulit dan udara kecil, yang menghambat evaporasi dan pendinginan (Gagnon & Crandall, 2022).

7.1.3. Peran Hipotalamus sebagai Termostat Tubuh

Hipotalamus, khususnya area preoptik hipotalamus anterior (PO/AH), berfungsi sebagai pusat integrasi dan kontrol untuk termoregulasi. Area ini berisi neuron-neuron yang sensitif terhadap suhu yang secara langsung merasakan suhu darah arteri yang melewatinya (suhu inti). PO/AH juga menerima input sinaptik dari termoreseptor perifer di kulit, yang memberikan informasi antisipatif tentang perubahan suhu lingkungan (Havenith, 2021).

Hipotalamus membandingkan informasi suhu terintegrasi ini dengan titik setel suhunya. Jika suhu inti terdeteksi lebih tinggi dari titik setel, hipotalamus mengaktifkan respons untuk mendinginkan tubuh. Ini termasuk merangsang sistem saraf simpatis kolinergik untuk mengaktifkan kelenjar keringat (meningkatkan kehilangan panas evaporatif) dan menarik tonus simpatis adrenergik ke arteriol kulit, menyebabkan vasodilatasi kulit. Vasodilatasi ini meningkatkan aliran darah ke kulit, memfasilitasi transfer panas dari inti tubuh ke permukaan untuk dibuang (Draper et al., 2024). Sebaliknya, jika suhu inti turun di bawah titik setel, hipotalamus memicu vasokonstriksi kulit (untuk menghemat panas) dan menggigil (kontraksi otot involunter untuk menghasilkan panas).

7.2. Fisiologi Keringat dan Dehidrasi

Berkeringat adalah mekanisme termoregulasi yang paling kuat yang dimiliki manusia untuk membuang panas selama latihan, terutama di lingkungan yang hangat. Kelenjar keringat ekrin, yang berjumlah jutaan dan tersebar di seluruh permukaan kulit, menghasilkan larutan hipotonik (lebih encer dari plasma darah) yang berasal dari filtrat plasma. Ketika keringat ini menyebar di atas permukaan kulit, ia akan menguap. Proses evaporasi ini sangat efektif dalam mendinginkan, karena setiap liter keringat yang menguap dapat menghilangkan sekitar 580 kkal panas dari tubuh. Laju keringat dapat bervariasi secara dramatis tergantung pada intensitas latihan, kondisi lingkungan (suhu dan kelembapan), dan status aklimatisasi individu, dengan laju setinggi 1-2 liter per jam menjadi hal yang umum selama aktivitas berat di lingkungan panas (Kenefick & Chevront, 2023).

Namun, manfaat termoregulasi dari berkeringat datang dengan biaya fisiologis yang signifikan: kehilangan cairan dan elektrolit. Kehilangan cairan ini, jika tidak diganti secara adekuat, menyebabkan dehidrasi, yang didefinisikan sebagai proses kehilangan air tubuh. Dehidrasi progresif menyebabkan hipovolemia (penurunan volume plasma darah). Penurunan volume plasma ini secara langsung merusak fungsi kardiovaskular. Dengan lebih sedikit volume darah untuk bersirkulasi, *venous return* dan *preload* jantung menurun, yang pada gilirannya mengurangi volume sekuncup. Untuk mempertahankan curah jantung yang diperlukan untuk latihan, jantung harus mengkompensasi dengan meningkatkan denyut jantung. Peningkatan denyut jantung pada intensitas latihan yang tetap ini dikenal sebagai *cardiovascular drift* dan merupakan tanda dari meningkatnya ketegangan kardiovaskular (Draper et al., 2024).

Dehidrasi yang parah dapat mengganggu performa dan meningkatkan risiko penyakit akibat panas. Kehilangan cairan hanya sebesar 2% dari massa tubuh (misalnya, 1.4 kg pada orang seberat 70 kg) sudah cukup untuk secara signifikan mengganggu performa ketahanan aerobik. Dehidrasi yang lebih lanjut dapat merusak performa kognitif, kekuatan otot, dan pada akhirnya, kemampuan tubuh untuk mengatur suhu itu sendiri, karena penurunan volume plasma yang parah pada akhirnya akan membatasi kemampuan untuk mempertahankan aliran darah kulit dan laju keringat (Kenefick & Chevront, 2023).

Selain air, keringat juga mengandung elektrolit, dengan natrium (Na^+) dan klorida (Cl^-) sebagai yang paling melimpah, diikuti oleh kalium (K^+), magnesium (Mg^{2+}), dan kalsium (Ca^{2+}). Meskipun keringat bersifat hipotonik, kehilangan elektrolit yang substansial dapat terjadi selama periode berkeringat yang berkepanjangan. Kehilangan natrium yang signifikan dapat mengganggu keseimbangan cairan dan, dalam kasus yang jarang terjadi di mana hanya air putih yang dikonsumsi dalam jumlah yang sangat besar, dapat menyebabkan hiponatremia (konsentrasi natrium darah yang rendah secara berbahaya) (Belval et al., 2022). Kehilangan elektrolit seperti kalium dan kalsium secara teoritis dapat mengganggu potensial membran sel saraf dan otot, yang berpotensi berkontribusi pada kram otot yang terkait dengan olahraga, meskipun etiologi kram bersifat kompleks dan multifaktorial.

Ketika termoregulasi gagal total karena kombinasi dari beban panas internal dan eksternal yang ekstrem serta dehidrasi, kondisi yang mengancam jiwa yang disebut *heat stroke* atau sengatan panas dapat terjadi. Ini ditandai dengan suhu inti yang sangat tinggi ($>40^\circ\text{C}$) dan disfungsi sistem saraf pusat (misalnya, kebingungan, pingsan). *Heat stroke* adalah keadaan darurat medis yang memerlukan pendinginan cepat dan agresif untuk mencegah kerusakan organ permanen atau kematian (Ioannou et al., 2021).

Contoh Kasus: Seorang pemain sepak bola berkompetisi dalam pertandingan 90 menit pada hari yang panas dan lembap (32°C, kelembapan 80%). Ia memulai pertandingan dalam keadaan terhidrasi dengan baik. Selama pertandingan, ia berkeringat dengan laju 1.5 liter per jam. Meskipun ia minum air di sela-sela waktu, asupannya hanya sekitar 0.5 liter per jam. Pada akhir pertandingan, ia telah kehilangan 1.5 liter cairan ($1.5 \text{ L/jam} - 0.5 \text{ L/jam} \times 1.5 \text{ jam} = 1.5 \text{ liter}$, atau sekitar 2% dari massa tubuhnya. Pada babak kedua, ia merasa performanya menurun drastis, dan denyut jantungnya terasa jauh lebih tinggi dari biasanya pada kecepatan lari yang sama (*cardiovascular drift*). Dehidrasi ringan ini telah meningkatkan ketegangan kardiovaskular dan merusak kemampuannya untuk berkinerja optimal.

7.2.1. Laju Pengosongan Lambung dan Penyerapan Cairan

Keefektifan rehidrasi selama latihan tidak hanya bergantung pada jumlah cairan yang diminum, tetapi juga pada seberapa cepat cairan tersebut dapat dikosongkan dari lambung dan diserap di usus kecil. Laju pengosongan lambung dipengaruhi oleh beberapa faktor. Volume cairan di lambung adalah pendorong utama; volume yang lebih besar mendorong pengosongan yang lebih cepat. Sebaliknya, kandungan kalori (terutama karbohidrat) dan osmolalitas (konsentrasi zat terlarut) dari minuman dapat memperlambat pengosongan lambung (Draper et al., 2024).

Oleh karena itu, minuman olahraga yang ideal biasanya mengandung konsentrasi karbohidrat sekitar 6-8% dan memiliki osmolalitas yang sedikit hipotonik atau isotonik relatif terhadap cairan tubuh, yang memberikan keseimbangan antara pengiriman energi dan penyerapan cairan yang cepat. Latihan dengan intensitas sangat tinggi (di atas 75% VO₂ max) juga dapat mengurangi aliran darah ke saluran pencernaan dan memperlambat pengosongan lambung, yang dapat menyebabkan

ketidaknyamanan gastrointestinal jika volume besar cairan dikonsumsi (Kenefick & Chevront, 2023).

7.2.2. Dampak Kehilangan Elektrolit terhadap Kontraksi Otot

Elektrolit seperti natrium, kalium, dan kalsium memainkan peran penting dalam transmisi saraf dan kontraksi otot dengan mempertahankan gradien elektrokimia di seluruh membran sel. Kehilangan elektrolit yang substansial melalui keringat secara teoritis dapat mengganggu fungsi neuromuskular. Namun, hubungan langsung antara depleksi elektrolit dan kram otot akibat olahraga (*exercise-associated muscle cramps*, EAMC) lebih kompleks dari yang diperkirakan sebelumnya (Belval et al., 2022).

Teori "dehidrasi-elektrolit" untuk EAMC menyatakan bahwa kehilangan cairan dan natrium menyebabkan "hipereksitabilitas" pada terminal saraf motorik. Namun, bukti yang lebih baru menunjukkan bahwa EAMC lebih mungkin disebabkan oleh kelelahan neuromuskular dan perubahan kontrol refleks dari sistem saraf pusat, daripada depleksi elektrolit sistemik semata. Meskipun demikian, mengganti kehilangan natrium tetap penting untuk mempertahankan volume plasma dan dorongan untuk minum, dan ini menjadi sangat penting dalam acara-acara ultramaraton di mana kehilangan total natrium bisa sangat besar (Swash et al., 2021).

7.2.3. Mekanisme Terjadinya Heat Stroke dan Heat Exhaustion

Penyakit akibat panas terjadi dalam sebuah spektrum, mulai dari kram panas hingga *heat exhaustion* dan *heat stroke*. *Heat exhaustion* (kelelahan panas) ditandai oleh ketidakmampuan untuk melanjutkan latihan karena ketegangan kardiovaskular yang berat (akibat dehidrasi), sakit kepala, pusing, dan mual, tetapi suhu inti biasanya di bawah 40°C dan fungsi mental masih utuh. Kondisi ini disebabkan

oleh kehilangan air dan garam yang berlebihan dan respons sirkulasi yang tidak adekuat terhadap stres panas (Ioannou et al., 2021).

Heat stroke (sengatan panas) adalah bentuk yang jauh lebih parah dan mengancam jiwa, yang didefinisikan oleh tiga serangkai: hipertermia (suhu inti $> 40^{\circ}\text{C}$), disfungsi sistem saraf pusat (misalnya, disorientasi, kejang, koma), dan seringkali disertai dengan respons inflamasi sistemik. *Heat stroke* akibat olahraga terjadi ketika laju produksi panas metabolik jauh melebihi laju kehilangan panas, yang sering diperparah oleh dehidrasi. Ini mewakili kegagalan total dari sistem termoregulasi dan merupakan keadaan darurat medis absolut yang memerlukan pendinginan tubuh secepat mungkin (misalnya, perendaman dalam air es) untuk mencegah kerusakan organ dan kematian (Gagnon & Crandall, 2022).

7.3. Aklimatisasi terhadap Lingkungan Ekstrem

Tubuh manusia memiliki kapasitas adaptif yang luar biasa. Paparan berulang terhadap stres lingkungan, seperti panas atau dingin, memicu serangkaian adaptasi fisiologis terkoordinasi yang secara kolektif dikenal sebagai aklimatisasi. Adaptasi ini meningkatkan toleransi terhadap stres lingkungan, meningkatkan performa, dan mengurangi risiko cedera atau penyakit. Aklimatisasi panas adalah contoh yang paling banyak dipelajari dan sangat efektif. Ketika seseorang berolahraga berulang kali di lingkungan yang panas, serangkaian adaptasi yang menguntungkan mulai terjadi, biasanya dalam 7 hingga 14 hari (Mujika & Sharma, 2020).

Salah satu adaptasi utama adalah ekspansi volume plasma. Peningkatan volume darah ini mengurangi ketegangan kardiovaskular pada intensitas latihan tertentu dengan mendukung volume sekuncup yang lebih tinggi. Adaptasi kunci lainnya terjadi pada respons berkeringat. Individu yang teraklimatisasi panas mulai berkeringat

lebih awal, pada suhu inti yang lebih rendah, dan laju keringat maksimal mereka meningkat. Ini memungkinkan pendinginan evaporatif dimulai lebih cepat dan menjadi lebih efektif. Selain itu, keringat menjadi lebih encer, karena kelenjar keringat menjadi lebih baik dalam mereabsorpsi natrium dan klorida. Penghematan elektrolit ini membantu menjaga keseimbangan cairan dan elektrolit (Havenith, 2021). Secara kolektif, adaptasi ini menghasilkan suhu inti dan denyut jantung yang lebih rendah selama latihan pada intensitas yang sama di lingkungan panas, serta peningkatan persepsi kenyamanan termal.

Respons tubuh terhadap latihan di lingkungan dingin juga melibatkan serangkaian respons akut dan adaptasi kronis, meskipun adaptasi terhadap dingin umumnya kurang menonjol dibandingkan dengan panas. Respons akut utama terhadap paparan dingin adalah vasokonstriksi perifer dan menggigil. Vasokonstriksi pembuluh darah kulit mengurangi aliran darah ke ekstremitas, yang meminimalkan kehilangan panas konvektif dan menjaga panas di inti tubuh. Jika vasokonstriksi tidak cukup, tubuh memulai respons menggigil, yaitu kontraksi otot skeletal yang tidak sinkron dan involunter yang dapat meningkatkan produksi panas metabolik istirahat sebanyak 3 hingga 5 kali lipat (Tipton & Costello, 2024).

Dengan paparan dingin kronis, beberapa adaptasi (aklimatisasi dingin) dapat terjadi. Ini mungkin termasuk peningkatan laju metabolisme basal melalui termogenesis non-menggigil (yang melibatkan aktivasi jaringan adiposa coklat) atau pengembangan respons vasokonstriksi kulit yang lebih kuat. Sebaliknya, pada beberapa populasi, seperti nelayan, habituasi dapat terjadi, di mana respons menggigil dan vasokonstriksi menjadi tumpul, memungkinkan mereka untuk mentolerir suhu yang lebih dingin dengan lebih nyaman (Tipton & Costello, 2024).

Memahami fisiologi aklimatisasi ini sangat penting untuk memberikan nasihat kepada individu yang bepergian untuk berkompetisi atau bekerja di lingkungan yang tidak biasa mereka hadapi. Merencanakan periode aklimatisasi yang memadai sebelum acara utama dapat secara dramatis meningkatkan kesehatan, keselamatan, dan performa. Demikian pula, merancang strategi hidrasi yang tepat yang memperhitungkan laju keringat individu dan kondisi lingkungan adalah komponen penting dari praktik fisiologi olahraga terapan.

Contoh Kasus: Seorang pelari dari iklim sejuk akan berkompetisi dalam maraton di kota yang panas dan lembap. Tanpa aklimatisasi, ia akan mengalami denyut jantung yang sangat tinggi, suhu inti yang meningkat pesat, dan risiko penyakit panas yang signifikan. Untuk mempersiapkan diri, ia tiba di lokasi 10 hari sebelum perlombaan dan setiap hari melakukan sesi lari ringan hingga sedang selama 60-90 menit. Dalam seminggu, ia memperhatikan bahwa ia mulai berkeringat lebih cepat dan lebih banyak, dan lari pada kecepatan yang sama terasa jauh lebih mudah daripada di hari pertama. Volume plasmanya telah meningkat, dan keringatnya menjadi lebih encer. Pada hari perlombaan, tubuhnya yang telah teraklimatisasi jauh lebih siap untuk mengatasi stres panas, memungkinkannya untuk berkinerja lebih baik dan lebih aman (Mujika & Sharma, 2020).

7.3.1. Adaptasi Tubuh terhadap Lingkungan Panas dan Lembap

Aklimatisasi panas menghasilkan serangkaian adaptasi yang terintegrasi untuk meningkatkan pembuangan panas dan mengurangi ketegangan fisiologis. Adaptasi kardiovaskular utama adalah peningkatan volume plasma sebesar 10-12%, yang terjadi dengan cepat dalam 3-6 hari pertama paparan. Peningkatan ini mendukung volume sekuncup, memungkinkan curah jantung yang memadai pada

denyut jantung yang lebih rendah, dan menyediakan lebih banyak cairan untuk berkeringat (Mujika & Sharma, 2020).

Perubahan pada mekanisme berkeringat adalah inti dari aklimatisasi. Sensitivitas dan output kelenjar keringat meningkat, yang berarti individu mulai berkeringat pada suhu inti yang lebih rendah (ambang batas yang lebih rendah) dan dapat mencapai laju keringat yang lebih tinggi (peningkatan gain). Keringat juga didistribusikan lebih merata ke seluruh tubuh. Selain itu, terjadi konservasi natrium yang signifikan, karena keringat menjadi lebih hipotonik, mengurangi gangguan elektrolit (Havenith, 2021). Adaptasi ini secara kolektif mengarah pada suhu inti dan kulit yang lebih rendah, penurunan ketergantungan pada metabolisme glikogen, dan peningkatan performa ketahanan di lingkungan panas.

7.3.2. Respon Tubuh terhadap Latihan di Lingkungan Dingin

Berolahraga di lingkungan dingin memberikan serangkaian tantangan yang berbeda. Risiko utama termasuk hipotermia (penurunan suhu inti tubuh) dan cedera dingin lokal seperti *frostbite*. Tubuh merespons paparan dingin dengan vasokonstriksi pembuluh darah kulit untuk mengurangi kehilangan panas secara konvektif dari ekstremitas dan mengisolasi inti tubuh. Jika suhu terus menurun, tubuh akan mengaktifkan termogenesis menggigil, yaitu kontraksi otot yang tidak efisien untuk menghasilkan panas (Tipton & Costello, 2024).

Latihan itu sendiri menghasilkan panas metabolik yang signifikan, yang seringkali cukup untuk mempertahankan suhu inti selama aktivitas, bahkan di lingkungan yang sangat dingin. Namun, setelah latihan berhenti, produksi panas menurun drastis sementara kehilangan panas dapat tetap tinggi, terutama jika pakaian basah oleh keringat, yang meningkatkan risiko hipotermia pasca-latihan. Pernapasan udara dingin dan kering juga dapat menyebabkan

kehilangan panas dan air dari saluran pernapasan dan dapat memicu bronkokonstriksi pada individu yang rentan (misalnya, penderita asma) (Tipton & Costello, 2024).

7.3.3. Strategi Rehidrasi Pra, Selama, dan Pasca Latihan

Strategi rehidrasi yang efektif sangat penting untuk performa dan keselamatan. Tujuannya adalah untuk memulai latihan dalam keadaan euhidrasi (hidrasi normal), meminimalkan dehidrasi selama latihan, dan mengganti sisa defisit cairan dan elektrolit setelah latihan. **Pra-latihan:** Individu harus minum sekitar 5-7 mL cairan per kg berat badan setidaknya 4 jam sebelum latihan. Minuman yang mengandung natrium dapat membantu merangsang rasa haus dan menahan cairan yang dikonsumsi (Kenefick & Chevront, 2023).

Selama latihan: Tujuannya adalah untuk minum pada laju yang mendekati laju keringat untuk mencegah dehidrasi melebihi 2% dari massa tubuh. Minum sesuai jadwal lebih disarankan daripada hanya minum saat haus, karena rasa haus bukanlah indikator yang andal untuk kebutuhan cairan selama latihan. Untuk aktivitas yang berlangsung lebih dari satu jam, minuman olahraga yang mengandung 6-8% karbohidrat dan elektrolit (terutama natrium) bermanfaat untuk menyediakan energi, mempertahankan volume plasma, dan mendorong penyerapan cairan (Belval et al., 2022).

Pasca-latihan: Rehidrasi agresif diperlukan untuk memulihkan homeostasis cairan. Aturan praktis yang umum adalah mengonsumsi 125-150% dari berat badan yang hilang selama latihan dalam 4-6 jam berikutnya (misalnya, 1.5 liter cairan untuk setiap 1 kg berat badan yang hilang). Memasukkan natrium dalam cairan atau makanan pasca-latihan sangat penting untuk memulihkan volume plasma dan menghindari diuresis (peningkatan produksi urin) yang tidak diinginkan (Kenefick & Chevront, 2023).

Rangkuman Bab

- Termoregulasi adalah proses mempertahankan suhu inti tubuh yang stabil (sekitar 37°C), yang dikendalikan oleh hipotalamus.
- Latihan meningkatkan produksi panas metabolik secara dramatis. Panas ini dihilangkan melalui radiasi, konduksi, konveksi, dan evaporasi.
- Evaporasi keringat adalah mekanisme pendinginan yang paling penting selama latihan di lingkungan hangat.
- Berkeringat menyebabkan kehilangan cairan dan elektrolit, yang jika tidak diganti, akan menyebabkan dehidrasi.
- Dehidrasi mengganggu performa dengan meningkatkan ketegangan kardiovaskular (misalnya, *cardiovascular drift*) dan meningkatkan risiko penyakit akibat panas seperti *heat exhaustion* dan *heat stroke*.
- Aklimatisasi panas adalah serangkaian adaptasi (misalnya, peningkatan volume plasma, peningkatan laju keringat, keringat yang lebih encer) yang meningkatkan toleransi terhadap panas.
- Respons utama terhadap dingin adalah vasokonstriksi kulit dan menggigil untuk menghemat dan menghasilkan panas.
- Strategi rehidrasi yang efektif melibatkan hidrasi yang adekuat sebelum, selama (mencocokkan laju keringat), dan setelah (mengganti 125-150% dari defisit) latihan.

Latihan Mahasiswa

Soal Esai

1. Jelaskan empat mekanisme pertukaran panas antara tubuh dan lingkungan. Manakah dari mekanisme ini yang paling penting untuk pendinginan selama latihan di hari yang sangat panas dan mengapa?

2. Gambarkan peran hipotalamus dalam termoregulasi. Jelaskan respons fisiologis yang dikoordinasikannya ketika suhu inti tubuh terdeteksi meningkat di atas titik setel.
3. Jelaskan fenomena *cardiovascular drift*. Bagaimana dehidrasi berkontribusi pada fenomena ini selama latihan yang berkepanjangan?
4. Anda adalah seorang pelatih untuk tim lari lintas alam yang akan berkompetisi di daerah dengan iklim panas. Jelaskan tiga adaptasi fisiologis utama yang akan diperoleh atlet Anda dari periode aklimatisasi panas selama 10 hari.
5. Rancang sebuah rencana hidrasi lengkap (pra, selama, dan pasca) untuk seorang atlet yang akan mengikuti perlombaan sepeda selama 3 jam. Asumsikan atlet tersebut kehilangan berat badan sekitar 1 kg per jam selama latihan.

Soal Pilihan Ganda

1. Pusat kontrol utama untuk termoregulasi dalam tubuh adalah...
 - A. Korteks motorik
 - B. Serebelum
 - C. Kelenjar adrenal
 - D. Hipotalamus -V-
2. Mekanisme kehilangan panas yang paling penting selama latihan di lingkungan dengan suhu 35°C adalah...
 - A. Konduksi
 - B. Konveksi
 - C. Radiasi
 - D. Evaporasi -V-

3. Dehidrasi sebesar 2% dari massa tubuh telah terbukti secara signifikan mengganggu...
 - A. Kekuatan maksimal
 - B. Performa ketahanan aerobik -V-
 - C. Fleksibilitas
 - D. Keseimbangan

4. Manakah dari berikut ini yang merupakan adaptasi khas dari aklimatisasi panas?
 - A. Penurunan laju keringat
 - B. Peningkatan konsentrasi natrium dalam keringat
 - C. Peningkatan volume plasma -V-
 - D. Peningkatan ambang batas untuk mulai berkeringat

5. Kondisi medis yang paling serius dan mengancam jiwa yang terkait dengan panas, ditandai dengan suhu inti $>40^{\circ}\text{C}$ dan disfungsi SSP, adalah...
 - A. Kram panas
 - B. *Heat exhaustion*
 - C. *Heat stroke* -V-
 - D. Sinkop panas

6. Respons fisiologis utama tubuh terhadap paparan dingin akut adalah...
 - A. Vasodilatasi kulit dan berkeringat
 - B. Vasokonstriksi kulit dan menggigil -V-
 - C. Peningkatan denyut jantung dan curah jantung
 - D. Penurunan laju metabolisme

7. Untuk rehidrasi pasca-latihan yang optimal, direkomendasikan untuk mengonsumsi cairan sebanyak...
 - A. 50% dari berat badan yang hilang
 - B. 100% dari berat badan yang hilang
 - C. 125-150% dari berat badan yang hilang -V-
 - D. 200% dari berat badan yang hilang

8. Elektrolit yang paling banyak hilang dalam keringat adalah...
 - A. Kalium
 - B. Kalsium
 - C. Magnesium
 - D. Natrium -V-

9. Faktor yang dapat memperlambat laju pengosongan lambung selama latihan adalah...
 - A. Volume cairan yang besar di lambung
 - B. Minuman dengan konsentrasi karbohidrat yang tinggi -V-
 - C. Suhu minuman yang dingin
 - D. Intensitas latihan yang rendah

10. Peningkatan denyut jantung yang progresif pada intensitas latihan yang stabil selama periode waktu yang lama disebut...
 - A. *Cardiovascular drift* -V-
 - B. Bradikardia
 - C. Efek Bohr
 - D. Ambang ventilasi

Studi Kasus atau Tugas Kontekstual

1. Seorang pekerja konstruksi berusia 40 tahun dilarikan ke unit gawat darurat pada suatu sore di musim panas. Dia ditemukan pingsan di tempat kerja. Teman-temannya melaporkan bahwa dia tampak bingung dan tidak koheren sebelum pingsan. Pemeriksaan menunjukkan suhu rektal 41°C, kulit panas dan kering, dan denyut nadi yang cepat. Berdasarkan tanda-tanda ini, diagnosis apa yang paling mungkin? Jelaskan patofisiologi kondisi ini dan uraikan langkah-langkah intervensi pertama yang paling penting yang harus segera dilakukan.

Glosarium Bab

- **Aklimatisasi:** Serangkaian adaptasi fisiologis yang terjadi sebagai respons terhadap paparan berulang terhadap stres lingkungan (misalnya, panas atau dingin), yang meningkatkan toleransi di masa depan.
- **Cardiovascular Drift:** Peningkatan bertahap pada denyut jantung yang terjadi selama latihan dengan intensitas stabil yang berkepanjangan, terutama terkait dengan dehidrasi.
- **Dehidrasi:** Proses kehilangan air tubuh; atau keadaan di mana kandungan air tubuh berada di bawah normal (hipohidrasi).
- **Elektrolit:** Mineral dalam tubuh yang memiliki muatan listrik (misalnya, natrium, kalium, klorida) dan penting untuk keseimbangan cairan dan fungsi neuromuskular.
- **Evaporasi:** Proses perubahan cairan menjadi uap; mekanisme utama kehilangan panas selama latihan, terutama di lingkungan panas.
- **Heat Stroke (Sengatan Panas):** Kondisi medis darurat yang ditandai dengan hipertermia berat ($>40^{\circ}\text{C}$) dan disfungsi sistem saraf pusat, yang disebabkan oleh kegagalan sistem termoregulasi.

- **Hipotalamus:** Struktur di otak yang berfungsi sebagai pusat kontrol utama tubuh untuk homeostasis, termasuk termoregulasi.
- **Konveksi:** Transfer panas dari satu tempat ke tempat lain melalui pergerakan cairan atau gas.
- **Termoregulasi:** Proses di mana organisme mempertahankan suhu internalnya dalam rentang yang sempit.
- **Volume Plasma:** Komponen cair dari darah; penurunan volume plasma adalah konsekuensi utama dari dehidrasi akibat keringat.

Daftar Pustaka Bab

- Belval, L. N., Hosokawa, Y., Adams, W. M., Bragdon, E. E., Chiampas, G., Jardine, J., ... & Stearns, R. L. (2022). ACSM expert consensus statement: The diagnosis and management of exercise-associated muscle cramps. *Current Sports Medicine Reports*, 21(5), 170-181. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000959>
- Draper, N., Williams, C., & Marshall, H. (2024). *Exercise Physiology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003109280>
- Gagnon, D., & Crandall, C. G. (2022). The impact of exertional heat stress on the human brain. *Journal of Applied Physiology*, 133(2), 260-272. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00089.2022>
- Havenith, G. (2021). Human thermoregulation in occupational and sports settings. *Comprehensive Physiology*, 11(2), 1649-1690. <https://doi.org/10.1002/cphy.c200021>
- Ioannou, L. G., Tsoutsoubi, L., & Flouris, A. D. (2021). Human physiological responses to exercising in the heat and treatment of exertional heat stress. *Comprehensive*

Physiology, 11(2), 1933-1976.
<https://doi.org/10.1002/cphy.c190034>

- Kenefick, R. W., & Cheuvront, S. N. (2023). Hydration for health and performance. *Annual Review of Nutrition*, 43, 337-355. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-062220-111155>
- Mujika, I., & Sharma, A. P. (2020). Heat acclimation and athletic performance: A comprehensive review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(5), 603-614. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0129>
- Swash, M., Czesnik, D., & de Carvalho, M. (2021). Muscle cramp: A clinical and physiological assessment. *Journal of the Neurological Sciences*, 429, 117624. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2021.117624>
- Tipton, M. J., & Costello, J. T. (2024). Human responses to exercise in cold environments. *Physiological Reviews*, 104(1), 321-365. <https://doi.org/10.1152/physrev.00009.2023>

BAB 8

ENDOKRINOLOGI DALAM OLAAHRAGA

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- Menjelaskan respons hormonal akut utama terhadap latihan, termasuk peran katekolamin, kortisol, dan hormon pertumbuhan.
- Menganalisis bagaimana intensitas dan durasi latihan memengaruhi besarnya respons hormonal.
- Menguraikan peran hormon anabolik, seperti testosteron dan IGF-1, dalam proses perbaikan dan adaptasi jaringan pasca latihan.
- Menjelaskan hubungan antara latihan, kualitas tidur, dan sekresi melatonin.
- Mengidentifikasi penanda hormonal dan gejala dari sindrom *overtraining*.
- Menjelaskan komponen dan patofisiologi dari *Female Athlete Triad*.
- Menganalisis mekanisme bagaimana latihan fisik dapat meningkatkan sensitivitas insulin dan berperan dalam manajemen diabetes.

Pendahuluan

Jika sistem saraf adalah sistem komunikasi berkabel berkecepatan tinggi di dalam tubuh, yang mengirimkan pesan instan melalui jalur-jalur spesifik, maka sistem endokrin adalah jaringan komunikasi nirkabelnya. Sistem ini melepaskan molekul-molekul pembawa pesan

kimia, yang disebut hormon, ke dalam aliran darah, yang kemudian berjalan ke seluruh tubuh untuk memberikan instruksi kepada sel-sel target yang jauh. Responsnya mungkin tidak secepat kilat seperti sinyal saraf, tetapi dampaknya seringkali lebih luas dan bertahan lebih lama, mengatur segala sesuatu mulai dari metabolisme dan pertumbuhan hingga suasana hati dan keseimbangan cairan.

Latihan fisik adalah salah satu stimulus paling kuat yang diketahui untuk sistem endokrin. Setiap sesi latihan memicu pelepasan berbagai hormon yang terkoordinasi secara cermat. "Badai" hormonal akut ini bukanlah respons yang kacau, melainkan sebuah orkestra fisiologis yang bertujuan untuk satu hal, yaitu mempertahankan homeostasis dalam menghadapi tantangan fisik yang ekstrem. Hormon-hormon dimobilisasi untuk melepaskan cadangan energi, mengatur tekanan darah, menjaga keseimbangan cairan, dan menumpulkan persepsi nyeri.

Bab ini akan membawa kita ke dalam dunia endokrinologi olahraga yang dinamis. Kita akan memulai dengan menjelajahi respons hormonal langsung atau akut terhadap latihan. Kita akan melihat bagaimana hormon "stres" seperti adrenalin dan kortisol sebenarnya adalah sekutu vital selama berolahraga, bertindak sebagai manajer bahan bakar yang memastikan otot-otot Anda tidak pernah kehabisan energi. Kita juga akan membahas peran hormon pertumbuhan, yang dilepaskan sebagai respons terhadap latihan intens, sebagai pemicu awal untuk proses perbaikan.

Setelah badai mereda, muncullah fase pembangunan kembali. Di sini, kita akan beralih ke peran hormon anabolik. Kita akan mengkaji bagaimana hormon seperti testosteron dan *Insulin-like Growth Factor 1* (IGF-1) mengambil alih setelah latihan, memberikan sinyal pada otot untuk memperbaiki kerusakan dan tumbuh menjadi lebih kuat dan lebih besar. Proses ini adalah inti dari adaptasi fisiologis. Kita juga

akan mengeksplorasi hubungan yang menarik antara olahraga, tidur, dan hormon melatonin, menyoroti pentingnya istirahat untuk pemulihan yang dimediasi secara hormonal.

Namun, seperti halnya banyak hal dalam fisiologi, terlalu banyak hal yang baik bisa menjadi buruk. Bagian akhir dari bab ini akan membahas sisi gelap dari stres latihan yang berlebihan. Kita akan membahas sindrom *overtraining*, suatu kondisi di mana sistem endokrin menjadi tidak seimbang, yang mengarah pada kelelahan kronis dan penurunan performa. Kita akan membahas *Female Athlete Triad*, sebuah sindrom serius yang menyoroti bagaimana kekurangan energi dapat mengganggu sumbu reproduksi dan kesehatan tulang. Sebaliknya, kita akan menutup dengan catatan positif, meninjau kembali bagaimana latihan fisik dapat menjadi intervensi endokrin yang kuat untuk memerangi resistensi insulin, salah satu masalah kesehatan masyarakat terbesar di zaman kita.

8.1. Respon Hormonal terhadap Latihan Akut

Setiap sesi latihan memicu serangkaian respons hormonal yang cepat dan terkoordinasi yang dirancang untuk mendukung peningkatan permintaan metabolik dan kardiovaskular. Respons akut ini terutama bersifat katabolik, artinya mereka mempromosikan pemecahan molekul-molekul kompleks (seperti glikogen dan trigliserida) menjadi unit-unit yang lebih kecil untuk menghasilkan energi. Perubahan hormonal ini sangat penting untuk mobilisasi bahan bakar dari tempat penyimpanan ke otot yang aktif dan untuk mempertahankan kadar glukosa darah agar fungsi sistem saraf pusat tetap terjaga (Kraemer & Ratamess, 2020).

Orkestra hormonal ini dipimpin oleh peningkatan aktivitas sistem saraf simpatis. Peningkatan *output* simpatis dari otak merangsang medula adrenal untuk melepaskan katekolamin, yaitu epinefrin

(adrenalin) dan norepinefrin (noradrenalin), ke dalam aliran darah. Hormon-hormon "lawan atau lari" (*fight-or-flight*) ini bekerja dengan cepat untuk meningkatkan denyut jantung, kekuatan kontraksi jantung, dan tekanan darah. Secara metabolik, mereka merangsang pemecahan glikogen di hati dan otot (glikogenolisis) serta pemecahan lemak di jaringan adiposa (lipolisis), sehingga secara cepat meningkatkan ketersediaan glukosa dan asam lemak bebas sebagai bahan bakar (Draper et al., 2024).

Stres fisik dari latihan juga mengaktifkan sumbu hipotalamus-hipofisis-adrenal (HPA). Hipotalamus melepaskan *corticotropin-releasing hormone* (CRH), yang merangsang kelenjar hipofisis anterior untuk melepaskan *adrenocorticotropin hormone* (ACTH). ACTH kemudian berjalan ke korteks adrenal dan merangsang pelepasan kortisol. Kortisol, yang sering disebut sebagai hormon stres, memainkan peran multifaset selama latihan. Ia mendukung mobilisasi bahan bakar dengan meningkatkan glukoneogenesis di hati (pembentukan glukosa baru), memobilisasi asam amino dari protein, dan memfasilitasi aksi katekolamin pada lipolisis (Hackney & Aggelidis, 2022).

Selain itu, kelenjar hipofisis anterior juga meningkatkan pelepasan hormon pertumbuhan (*Growth Hormone*, GH). Pelepasan GH dirangsang oleh intensitas latihan, dengan latihan intensitas tinggi (terutama latihan resistensi dan interval) yang memicu respons GH terbesar. Selama latihan, peran utama GH adalah metabolik, yaitu untuk mendukung lipolisis dan menghambat penyerapan glukosa oleh jaringan yang tidak aktif, sehingga membantu menghemat glukosa darah. Efek anaboliknya yang lebih dikenal (membangun jaringan) sebagian besar dimediasi oleh IGF-1 dan menjadi lebih menonjol selama periode pemulihan (Kraemer & Ratamess, 2020). Besarnya respons dari semua hormon ini (katekolamin, kortisol, GH) sangat

bergantung pada intensitas dan durasi latihan; semakin lama dan semakin keras latihannya, semakin besar pula pelepasan hormonalnya.

Analogi: Bayangkan tubuh Anda adalah sebuah negara yang tiba-tiba harus berperang (memulai latihan). Hipotalamus adalah markas besar militer. Segera setelah perang diumumkan, markas besar mengirimkan dua jenis perintah. Perintah pertama melalui sistem komunikasi instan (sistem saraf simpatis) ke pasukan khusus (medula adrenal) untuk segera melepaskan katekolamin. Katekolamin ini bertindak seperti pasukan terjun payung: mereka tiba dengan cepat di seluruh negeri, membuka gudang-gudang logistik (hati, jaringan adiposa) untuk melepaskan pasokan bahan bakar darurat, dan membuat infrastruktur utama (jantung) bekerja dengan kapasitas maksimal. Secara bersamaan, markas besar mengirimkan perintah yang sedikit lebih lambat melalui rantai komando (sumbu HPA) yang pada akhirnya mengaktifkan kortisol, yang bertindak sebagai manajer logistik perang, memastikan bahwa pabrik-pabrik (hati) mulai memproduksi pasokan baru (glukoneogenesis) untuk upaya perang yang berkelanjutan.

8.1.1. Sekresi Katekolamin (Adrenalin dan Noradrenalin)

Katekolamin, yang terdiri dari epinefrin (adrenalin) dan norepinefrin (noradrenalin), adalah hormon garis depan dalam respons terhadap latihan. Konsentrasi norepinefrin dalam plasma mulai meningkat pada intensitas latihan sekitar 50% VO₂ max, sementara epinefrin yang lebih poten biasanya tidak meningkat secara signifikan sampai intensitas mencapai sekitar 60-75% VO₂ max (Kraemer & Ratamess, 2020). Peningkatan mereka bersifat eksponensial dengan meningkatnya intensitas lebih lanjut.

Secara kardiovaskular, katekolamin meningkatkan curah jantung dengan meningkatkan denyut jantung dan kontraktilitas miokardium. Secara metabolik, mereka adalah agen mobilisasi bahan bakar yang kuat. Di hati dan otot, mereka merangsang pemecahan glikogen menjadi glukosa (glikogenolisis). Di jaringan adiposa, mereka mengaktifkan *hormone-sensitive lipase* untuk memecah trigliserida menjadi asam lemak bebas (lipolisis) (Draper et al., 2024). Latihan ketahanan kronis dapat menumpulkan respons katekolamin terhadap latihan dengan intensitas absolut yang sama, sebuah tanda efisiensi fisiologis, tetapi respons maksimal pada intensitas puncak tetap terjaga atau bahkan meningkat.

8.1.2. Respon Kortisol terhadap Stres Latihan

Kortisol adalah hormon glukokortikoid yang disekresikan oleh korteks adrenal sebagai bagian dari respons stres umum tubuh. Perannya selama latihan sering disalahpahami. Meskipun kadar kortisol yang tinggi secara kronis bersifat merugikan, peningkatan akutnya selama latihan adalah respons adaptif dan perlu. Konsentrasi kortisol mulai meningkat selama latihan yang berkepanjangan (lebih dari 60 menit) atau selama latihan dengan intensitas tinggi (di atas 60% VO₂ max) (Hackney & Aggelidis, 2022).

Fungsi utama kortisol selama latihan adalah untuk memastikan ketersediaan bahan bakar, terutama untuk mempertahankan kadar glukosa darah. Kortisol merangsang mobilisasi asam amino dari protein jaringan (terutama otot), yang dapat digunakan oleh hati sebagai substrat untuk glukoneogenesis. Ia juga meningkatkan aktivitas enzim-enzim kunci yang terlibat dalam glukoneogenesis. Selain itu, kortisol memfasilitasi lipolisis dan memiliki efek permisif, yang berarti ia meningkatkan efek dari hormon lain seperti katekolamin (Kraemer & Ratamess, 2020). Setelah latihan, kortisol juga memainkan peran dalam mengurangi peradangan.

8.1.3. Hormon Pertumbuhan (GH) dan Latihan Intensitas Tinggi

Hormon Pertumbuhan (GH) disekresikan secara berdenyut dari kelenjar hipofisis anterior, dan latihan adalah salah satu stimulus fisiologis terkuat untuk pelepasannya. Besarnya pelepasan GH secara langsung berkaitan dengan intensitas latihan, bukan durasi. Latihan resistensi dengan periode istirahat singkat dan volume tinggi, serta latihan interval *sprint*, diketahui menghasilkan respons GH yang sangat besar (Stastny et al., 2021). Peningkatan keasaman (penurunan pH) yang terkait dengan metabolisme anaerobik tampaknya menjadi pemicu kuat untuk sekresi GH.

Selama sesi latihan itu sendiri, GH berkontribusi pada metabolisme dengan merangsang lipolisis dan menekan oksidasi karbohidrat. Namun, peran anaboliknya yang lebih dikenal luas (merangsang pertumbuhan jaringan) sebagian besar terjadi setelah latihan selesai. GH merangsang hati dan jaringan lain untuk melepaskan *Insulin-like Growth Factor 1* (IGF-1), yang merupakan mediator utama dari efek anabolik GH (Kraemer & Ratamess, 2020).

8.2. Hormon Anabolik dan Perbaikan Jaringan

Setelah sesi latihan selesai, lingkungan hormonal tubuh secara bertahap beralih dari keadaan katabolik yang dominan selama latihan menjadi keadaan anabolik yang dominan selama pemulihan. Fase anabolik ini sangat penting untuk memperbaiki kerusakan jaringan yang diinduksi oleh latihan dan untuk merangsang adaptasi jangka panjang, seperti hipertrofi otot dan remodeling tulang. Proses ini diatur oleh beberapa hormon kunci, terutama testosteron dan *Insulin-like Growth Factor 1* (IGF-1), serta dipengaruhi oleh keadaan hormonal keseluruhan, termasuk ketersediaan insulin dan kualitas tidur (Vingren, 2022).

Testosteron adalah hormon steroid anabolik utama dalam tubuh, yang diproduksi terutama di testis pada pria dan dalam jumlah yang jauh lebih kecil di ovarium dan kelenjar adrenal pada wanita. Latihan resistensi, terutama yang melibatkan kelompok otot besar, volume tinggi, dan periode istirahat sedang, telah terbukti menyebabkan peningkatan akut dan sementara pada konsentrasi testosteron. Peningkatan sementara ini, bersama dengan peningkatan sensitivitas reseptor androgen di otot, diyakini berkontribusi pada lingkungan anabolik pasca latihan (Vingren, 2022). Peran utama testosteron adalah merangsang sintesis protein otot (MPS) secara langsung, yang merupakan proses inti di balik perbaikan dan pertumbuhan otot.

Insulin-like Growth Factor 1 (IGF-1) adalah hormon polipeptida lain yang memainkan peran sentral dalam mediasi adaptasi anabolik. IGF-1 ada dalam beberapa bentuk dan bekerja melalui sistem yang kompleks. Bentuk sirkulasi utamanya diproduksi di hati sebagai respons terhadap stimulasi hormon pertumbuhan (GH) (sumbu GH-IGF-1). Namun, otot itu sendiri juga dapat menghasilkan varian IGF-1 lokal (dikenal sebagai *mechano-growth factor* atau MGF) sebagai respons langsung terhadap tegangan mekanis dari latihan. IGF-1 lokal ini bekerja secara autokrin (pada sel yang sama) dan parakrin (pada sel di sekitarnya) untuk merangsang MPS dan proliferasi sel satelit, yang sangat penting untuk hipertrofi otot (Stastny et al., 2021).

Keberhasilan proses pemulihan dan adaptasi ini tidak hanya bergantung pada hormon anabolik tetapi juga pada istirahat dan tidur yang cukup. Kualitas tidur yang buruk dapat mengganggu ritme sirkadian normal dari banyak hormon. Tidur nyenyak (tahap *slow-wave*) sangat penting karena selama periode inilah terjadi puncak pelepasan hormon pertumbuhan. Melatonin, hormon yang diproduksi oleh kelenjar pineal yang mengatur siklus tidur-bangun, juga memiliki sifat antioksidan dan anti-inflamasi yang dapat membantu proses pemulihan (O'Donnell et al., 2023). Latihan teratur umumnya

meningkatkan kualitas tidur, tetapi latihan yang terlalu intens atau terlalu dekat dengan waktu tidur dapat mengganggu pelepasan melatonin dan membuat sulit tidur, sehingga menciptakan lingkaran setan yang merusak pemulihan.

Contoh Kasus: Seorang binaragawan menyelesaikan sesi latihan kaki yang sangat berat. Tegangan mekanis dan stres metabolik selama latihan memicu pelepasan GH dan peningkatan sementara testosteron. Setelah latihan, ia mengonsumsi makanan kaya protein dan karbohidrat, yang merangsang pelepasan insulin. Insulin membantu mengisi kembali glikogen dan menghambat pemecahan protein. Selama beberapa jam berikutnya, testosteron dan IGF-1 (baik dari hati maupun yang diproduksi secara lokal di otot) merangsang jalur sintesis protein otot. Malam itu, ia memastikan untuk mendapatkan 8 jam tidur berkualitas. Selama fase tidur nyenyak, denyut GH yang besar dilepaskan, yang selanjutnya mendukung proses perbaikan dan remodeling jaringan. Kombinasi dari stimulus latihan yang tepat, nutrisi pasca latihan, dan istirahat yang cukup menciptakan lingkungan hormonal yang optimal untuk adaptasi dan pertumbuhan.

8.2.1. Peran Testosteron dalam Sintesis Protein Otot

Testosteron adalah hormon steroid yang berdifusi melintasi membran sel otot dan mengikat reseptor androgen di sitoplasma. Kompleks hormon-reseptor ini kemudian masuk ke dalam nukleus dan berikatan dengan DNA untuk memodulasi transkripsi gen, yang pada akhirnya meningkatkan sintesis protein kontraktil (aktin dan miosin) (Vingren, 2022). Selain efek genomik langsung ini, testosteron juga dapat mempromosikan anabolisme dengan meningkatkan pelepasan GH dan dengan berinteraksi dengan sistem neuromuskular untuk meningkatkan aktivitas otot.

Latihan resistensi akut dapat menyebabkan peningkatan sementara pada testosteron total dan bebas. Meskipun besarnya peningkatan ini bervariasi, dan signifikansi fungsionalnya masih diperdebatkan, diyakini bahwa lonjakan-lonjakan sementara ini, yang terjadi berulang kali dari waktu ke waktu, berkontribusi pada lingkungan anabolik keseluruhan yang mendukung hipertrofi. Kadar testosteron istirahat jangka panjang tampaknya tidak banyak berubah dengan latihan pada pria muda, tetapi latihan dapat membantu mempertahankan atau bahkan sedikit meningkatkan kadar testosteron pada pria paruh baya dan lebih tua (Riachy et al., 2020).

8.2.2. Insulin-like Growth Factor 1 (IGF-1) dalam Adaptasi

IGF-1 adalah mediator penting dari efek anabolik hormon pertumbuhan dan beban mekanis pada otot. Setelah latihan, peningkatan GH merangsang hati untuk melepaskan IGF-1 ke dalam sirkulasi, yang kemudian dapat bekerja pada otot. Namun, yang mungkin lebih penting adalah produksi IGF-1 lokal di dalam otot itu sendiri sebagai respons terhadap stimulus latihan. Varian IGF-1 spesifik otot, seperti *mechano-growth factor* (MGF), secara khusus diaktifkan oleh peregangan dan kerusakan mikro akibat latihan (Stastny et al., 2021).

IGF-1 merangsang pertumbuhan otot melalui beberapa mekanisme. Seperti testosteron, ia meningkatkan laju sintesis protein otot, terutama melalui aktivasi jalur pensinyalan Akt/mTOR. Selain itu, IGF-1 adalah mitogen yang kuat untuk sel satelit, sel punca otot yang "tertidur". IGF-1 merangsang sel-sel ini untuk aktif, berproliferasi (memperbanyak diri), dan kemudian menyatu dengan serabut otot yang ada, menyumbangkan inti barunya dan meningkatkan kapasitas serabut untuk sintesis protein lebih lanjut. Proses ini sangat mendasar bagi hipertrofi otot yang signifikan (Draper et al., 2024).

8.2.3. Pengaruh Latihan terhadap Kualitas Tidur dan Melatonin

Hubungan antara olahraga dan tidur bersifat dua arah. Latihan teratur, terutama latihan aerobik intensitas sedang, secara konsisten terbukti meningkatkan kualitas tidur, mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk tertidur (*sleep latency*), dan meningkatkan jumlah tidur gelombang lambat (*slow-wave sleep*) yang dalam dan restoratif. Peningkatan kualitas tidur ini, pada gilirannya, menciptakan lingkungan hormonal yang lebih baik untuk pemulihan, terutama melalui optimalisasi pelepasan GH nokturnal (O'Donnell et al., 2023).

Melatonin, hormon yang mengatur ritme sirkadian, biasanya dilepaskan oleh kelenjar pineal sebagai respons terhadap kegelapan. Latihan tampaknya memiliki efek kompleks pada melatonin. Latihan di siang hari dapat meningkatkan amplitudo pelepasan melatonin di malam hari, yang memperkuat sinyal tidur. Namun, latihan dengan intensitas sangat tinggi yang dilakukan terlalu dekat dengan waktu tidur dapat menunda atau menekan pelepasan melatonin sementara, berpotensi mengganggu proses tidur (Giménez et al., 2022). Oleh karena itu, waktu latihan dapat menjadi pertimbangan penting bagi individu dengan masalah tidur.

8.3. Gangguan Endokrin akibat Latihan Berlebih

Meskipun latihan fisik adalah salah satu intervensi paling ampuh untuk meningkatkan kesehatan, prinsip dosis-respons berlaku. Ada titik di mana volume dan/atau intensitas latihan yang berlebihan, dikombinasikan dengan pemulihan yang tidak memadai, dapat menyebabkan keadaan maladaptif yang dikenal sebagai sindrom *overtraining*. Sindrom ini lebih dari sekadar kelelahan; ini adalah kondisi neuro-endokrin yang kompleks yang ditandai dengan penurunan performa jangka panjang, peningkatan kelelahan, dan gangguan suasana hati. Secara endokrin, *overtraining* sering dikaitkan

dengan disregulasi sumbu hipotalamus-hipofisis (Javdaneh et al., 2022).

Pada atlet ketahanan, bentuk *overtraining* yang umum terkait dengan disregulasi sumbu hipotalamus-hipofisis-adrenal (HPA) dan hipotalamus-hipofisis-gonad (HPG). Hal ini dapat bermanifestasi sebagai penurunan responsivitas kelenjar adrenal dan gonad terhadap stimulasi hipofisis. Salah satu penanda yang sering dikutip, meskipun tidak universal, adalah penurunan rasio testosteron terhadap kortisol saat istirahat. Penurunan rasio ini menunjukkan pergeseran dari dominasi anabolik ke dominasi katabolik, yang menghambat pemulihan dan adaptasi (Bell et al., 2022).

Pada wanita, stres fisiologis gabungan dari latihan volume tinggi dan ketersediaan energi yang tidak memadai (yaitu, asupan kalori tidak mencukupi untuk mendukung pengeluaran energi) dapat secara signifikan mengganggu sumbu HPG. Penekanan fungsi hipotalamus ini dapat menyebabkan disfungsi menstruasi, mulai dari fase luteal yang memendek hingga amenorea (berhentinya menstruasi). Gangguan ini adalah komponen sentral dari apa yang secara historis dikenal sebagai *Female Athlete Triad*, yang juga mencakup ketersediaan energi yang rendah dan kepadatan mineral tulang yang rendah (osteoporosis) (Torstveit et al., 2023). Konsep ini sekarang telah diperluas menjadi model yang lebih komprehensif yang disebut *Relative Energy Deficiency in Sport* (RED-S), yang mengakui bahwa konsekuensi kesehatan dari ketersediaan energi yang rendah memengaruhi banyak sistem fisiologis (termasuk fungsi kekebalan, metabolisme, dan kesehatan kardiovaskular) pada atlet pria dan wanita.

Di sisi lain spektrum, latihan fisik yang dilakukan dengan tepat adalah alat terapi endokrin yang ampuh. Salah satu contoh paling signifikan adalah perannya dalam manajemen diabetes melitus tipe 2, suatu

kondisi yang ditandai dengan resistensi insulin. Latihan memerangi resistensi insulin melalui dua jalur utama. Secara akut, kontraksi otot merangsang penyerapan glukosa melalui jalur yang tidak bergantung pada insulin (melalui translokasi GLUT4), sehingga membantu menurunkan kadar glukosa darah. Secara kronis, latihan teratur meningkatkan sensitivitas insulin di seluruh tubuh, yang berarti lebih sedikit insulin yang dibutuhkan untuk membersihkan jumlah glukosa yang sama dari darah. Peningkatan ini dimediasi oleh adaptasi pada jalur pensinyalan insulin di dalam sel otot dan pengurangan massa lemak (Kosasih et al., 2025; Goldfarb et al., 2025).

Contoh Kasus: Seorang pelari maraton wanita meningkatkan volume latihannya secara drastis sebagai persiapan untuk perlombaan besar, sambil secara sadar membatasi asupan kalorinya untuk mencapai "berat badan balap". Setelah beberapa minggu, ia merasa terus-menerus lelah, performa larinya menurun, dan ia melewatkan dua siklus menstruasi berturut-turut. Konsultasi medis dan tes darah mengungkapkan kadar estrogen yang sangat rendah dan kadar kortisol istirahat yang tinggi. Dia didiagnosis dengan *Female Athlete Triad/RED-S*. Intervensinya berfokus pada pengurangan volume latihan secara signifikan dan bekerja dengan ahli gizi untuk meningkatkan ketersediaan energinya. Tujuannya adalah untuk memulihkan keseimbangan hormonal dan fungsi menstruasi normal untuk melindungi kesehatan tulangnya dalam jangka panjang.

8.3.1. Sindrom Overtraining dan Ketidakseimbangan Hormon

Sindrom *overtraining* (OTS) adalah kondisi maladaptif yang kompleks akibat akumulasi stres latihan dan non-latihan yang berlebihan. Secara hormonal, OTS sering dikaitkan dengan disfungsi pada sumbu neuroendokrin utama. Dua teori utama telah diusulkan: "hipotesis monoton" menyarankan bahwa kurangnya variasi dalam stimulus latihan menyebabkan kelelahan sistem, sementara "hipotesis

sitokin" mengusulkan bahwa kerusakan otot dan stres yang berlebihan memicu respons inflamasi sistemik kronis yang mengganggu fungsi hipotalamus (Javdaneh et al., 2022).

Penanda hormonal yang paling sering diselidiki adalah rasio testosteron-kortisol (T/C). Penurunan lebih dari 30% pada rasio T/C istirahat pagi hari telah diusulkan sebagai indikator potensial dari *overtraining*, yang menandakan pergeseran ke arah katabolisme. Namun, penanda ini memiliki variabilitas individu yang tinggi dan tidak dapat diandalkan sebagai satu-satunya alat diagnostik (Bell et al., 2022). Perubahan lain mungkin termasuk penurunan sekresi katekolamin nokturnal dan respons hormon yang tumpul terhadap stimulus latihan standar.

8.3.2. Female Athlete Triad (Gangguan Makan, Amenorea, Osteoporosis)

Female Athlete Triad adalah sindrom yang saling terkait dari ketersediaan energi yang rendah (dengan atau tanpa gangguan makan), disfungsi menstruasi (amenorea), dan kepadatan mineral tulang yang rendah (osteoporosis). Akar penyebab dari Triad adalah ketersediaan energi yang tidak memadai, yang terjadi ketika asupan energi tidak cukup untuk menutupi biaya energi dari latihan dan fungsi tubuh normal. Sebagai respons terhadap defisit energi ini, tubuh masuk ke mode konservasi energi, menekan proses-proses yang "tidak penting" secara fisiologis seperti reproduksi (Torstveit et al., 2023).

Penekanan ini terjadi di tingkat hipotalamus, yang mengurangi pelepasan *gonadotropin-releasing hormone* (GnRH). Hal ini menyebabkan penurunan pelepasan *luteinizing hormone* (LH) dan *follicle-stimulating hormone* (FSH) dari hipofisis, yang pada gilirannya menyebabkan produksi estrogen oleh ovarium menurun. Keadaan hipoestrogenik (kadar estrogen rendah) ini tidak hanya

menyebabkan amenorea tetapi juga secara langsung merusak kesehatan tulang dengan meningkatkan resorpsi tulang dan mengurangi pembentukan tulang, yang pada akhirnya mengarah pada osteoporosis dan peningkatan risiko patah tulang akibat stres (Sale et al., 2021).

8.3.3. Resistensi Insulin dan Peran Olahraga dalam Manajemen Diabetes

Resistensi insulin adalah suatu kondisi di mana sel-sel tubuh (terutama di otot, hati, dan jaringan lemak) menjadi kurang responsif terhadap aksi hormon insulin. Akibatnya, pankreas harus mengeluarkan lebih banyak insulin untuk menjaga kadar glukosa darah tetap normal (hiperinsulinemia), dan pada akhirnya, mekanisme ini dapat gagal, yang mengarah pada diabetes melitus tipe 2. Latihan fisik adalah intervensi gaya hidup yang paling efektif untuk mencegah dan mengelola resistensi insulin (Goldfarb et al., 2025).

Efek menguntungkan dari olahraga bersifat dua lapis. Selama sesi latihan, kontraksi otot secara langsung merangsang translokasi transporter glukosa GLUT4 ke permukaan sel, memungkinkan penyerapan glukosa dari darah tanpa memerlukan insulin. Efek akut ini membantu menurunkan kadar glukosa darah. Secara kronis, latihan teratur meningkatkan sensitivitas insulin. Adaptasi ini melibatkan peningkatan jumlah protein pensinyalan insulin dan transporter GLUT4 di dalam sel otot, serta pengurangan lipid intramioselular yang dapat mengganggu pensinyalan insulin (Kosasih et al., 2025). Manfaat ini terjadi dengan latihan aerobik dan resistensi.

Rangkuman Bab

- Sistem endokrin mengatur respons fisiologis terhadap latihan melalui pelepasan hormon.
- Respons akut terhadap latihan bersifat katabolik, ditandai oleh peningkatan katekolamin (epinefrin, norepinefrin), kortisol, dan hormon pertumbuhan (GH) untuk memobilisasi bahan bakar energi.
- Besarnya respons hormonal akut ditentukan oleh intensitas dan durasi latihan.
- Fase pemulihan pasca latihan didominasi oleh hormon anabolik seperti testosteron dan IGF-1, yang merangsang sintesis protein otot untuk perbaikan dan adaptasi.
- Kualitas tidur yang baik sangat penting untuk pemulihan, sebagian karena pelepasan GH yang berpuncak selama tidur nyenyak.
- Sindrom *overtraining* adalah kondisi maladaptif akibat stres berlebihan, yang sering dikaitkan dengan ketidakseimbangan hormon seperti penurunan rasio testosteron/kortisol.
- *Female Athlete Triad* (atau RED-S) disebabkan oleh ketersediaan energi yang rendah, yang mengarah pada disfungsi menstruasi (amenorea) dan kesehatan tulang yang buruk (osteoporosis).
- Latihan adalah terapi yang efektif untuk resistensi insulin dan diabetes tipe 2, baik melalui efek akut (penyerapan glukosa non-insulin) maupun adaptasi kronis (peningkatan sensitivitas insulin).

Latihan Mahasiswa

Soal Esai

1. Jelaskan peran komplementer dari katekolamin dan kortisol dalam memobilisasi bahan bakar selama sesi lari jarak jauh.
2. Bandingkan dan kontraskan peran hormon pertumbuhan (GH) selama latihan dengan perannya selama periode pemulihan pasca latihan.
3. Jelaskan konsep *Female Athlete Triad*. Uraikan bagaimana ketersediaan energi yang rendah dapat menyebabkan amenorea dan osteoporosis.
4. Seorang klien dengan pradiabetes bertanya mengapa olahraga dianjurkan. Jelaskan dua mekanisme utama (satu akut, satu kronis) di mana latihan fisik dapat meningkatkan kontrol glukosa darah.
5. Apa itu sindrom *overtraining*? Jelaskan beberapa penanda hormonal potensial yang mungkin mengindikasikan bahwa seorang atlet sedang menuju kondisi ini.

Soal Pilihan Ganda

1. Hormon manakah yang dilepaskan dari medula adrenal dan berperan dalam respons "lawan atau lari" selama latihan?
 - A. Kortisol
 - B. Testosteron
 - C. Epinefrin (Adrenalin) -V-
 - D. Insulin

2. Latihan dengan intensitas tertinggi akan menghasilkan pelepasan terbesar dari hormon...
 - A. Glukagon
 - B. Hormon Pertumbuhan (GH) -V-
 - C. Aldosteron
 - D. Insulin

3. Hormon steroid anabolik utama yang merangsang sintesis protein otot adalah...
 - A. Kortisol
 - B. Testosteron -V-
 - C. Estrogen
 - D. Progesteron

4. Penurunan rasio testosteron terhadap kortisol sering dianggap sebagai penanda dari...
 - A. Adaptasi latihan yang baik
 - B. Sindrom *overtraining* -V-
 - C. Aklimatisasi panas
 - D. Peningkatan kebugaran aerobik

5. Penyebab utama dari *Female Athlete Triad* adalah...
 - A. Asupan protein yang berlebihan
 - B. Kurang tidur
 - C. Ketersediaan energi yang rendah -V-
 - D. Dehidrasi kronis

6. Latihan meningkatkan penyerapan glukosa oleh otot melalui translokasi transporter...
 - A. GLUT1
 - B. GLUT2
 - C. SGLT1
 - D. GLUT4 -V-

7. Puncak pelepasan hormon pertumbuhan secara alami terjadi selama...
 - A. Sarapan
 - B. Latihan intensitas rendah
 - C. Tidur gelombang lambat (nyenyak) -V-
 - D. Paparan cahaya terang

8. Hormon yang mengatur siklus tidur-bangun dan juga memiliki sifat antioksidan adalah...
 - A. Melatonin -V-
 - B. Serotonin
 - C. Dopamin
 - D. ACTH

9. Manakah dari berikut ini yang merupakan fungsi utama kortisol selama latihan akut?
 - A. Merangsang sintesis glikogen
 - B. Meningkatkan glukoneogenesis di hati -V-
 - C. Menurunkan denyut jantung
 - D. Meningkatkan penyerapan glukosa oleh otot

10. *Insulin-like Growth Factor 1* (IGF-1) yang diproduksi secara lokal di otot sebagai respons terhadap beban mekanis disebut...
 - A. Hormon Luteinizing
 - B. Hormon Adrenokortikotropik
 - C. *Mechano-growth factor* (MGF) -V-
 - D. Eritropoietin

Studi Kasus atau Tugas Kontekstual

1. Seorang atlet angkat besi pria berusia 25 tahun ingin memaksimalkan hipertrofi otot. Dia berlatih sangat keras 6 hari seminggu tetapi sering begadang hingga larut malam dan hanya tidur 5-6 jam. Dia juga sering melewatkan makan setelah latihan karena jadwalnya yang sibuk. Berdasarkan pemahaman Anda tentang endokrinologi olahraga, identifikasi setidaknya dua area (selain program latihannya) yang dapat dia perbaiki untuk menciptakan lingkungan hormonal yang lebih anabolik. Jelaskan mengapa saran Anda (misalnya, mengenai tidur dan nutrisi pasca latihan) penting dari perspektif hormonal.

Glosarium Bab

- **Anabolik:** Berkaitan dengan proses metabolik yang membangun molekul kompleks dari yang lebih sederhana (misalnya, sintesis protein); proses pembangunan jaringan.
- **Amenorea:** Tidak adanya periode menstruasi selama tiga siklus atau lebih, seringkali disebabkan oleh gangguan hormonal.
- **Female Athlete Triad:** Sindrom yang terdiri dari tiga komponen: ketersediaan energi rendah, amenorea, dan kepadatan mineral tulang rendah.
- **Hormon Pertumbuhan (GH):** Hormon yang dilepaskan oleh kelenjar hipofisis yang merangsang pertumbuhan, reproduksi sel, dan regenerasi; pelepasannya dirangsang oleh latihan intens.
- **IGF-1 (Insulin-like Growth Factor 1):** Hormon yang memediasi banyak efek anabolik dari GH dan beban mekanis pada jaringan seperti otot.

- **Katabolik:** Berkaitan dengan proses metabolik yang memecah molekul kompleks menjadi unit yang lebih kecil untuk melepaskan energi (misalnya, pemecahan glikogen).
- **Katekolamin:** Sekelompok hormon (terutama epinefrin dan norepinefrin) yang dilepaskan sebagai bagian dari respons stres akut ("lawan atau lari").
- **Kortisol:** Hormon steroid glukokortikoid yang dilepaskan sebagai respons terhadap stres dan berfungsi untuk meningkatkan ketersediaan bahan bakar dan memodulasi peradangan.
- **Overtraining (Sindrom):** Penurunan performa jangka panjang dan kelelahan akibat akumulasi stres latihan dan non-latihan yang tidak diimbangi dengan pemulihan yang cukup.
- **Testosteron:** Hormon steroid anabolik utama yang bertanggung jawab untuk pengembangan karakteristik seksual pria dan memainkan peran kunci dalam pertumbuhan otot.

Daftar Pustaka Bab

- Bell, L., Ruddock, A., Maden-Wilkinson, T., Hembrough, D., & Rogerson, D. (2022). The effects of periodised and non-periodised resistance training on haemodynamic and hormonal responses in trained males. *Journal of Sports Sciences*, 40(2), 193-202. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1989539>
- Draper, N., Williams, C., & Marshall, H. (2024). *Exercise Physiology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003109280>
- Giménez, M., Mar-Solís, C., Olea-Serrano, F., & de la Torre-Luque, A. (2022). The effect of physical exercise on melatonin levels: a systematic review and meta-analysis.

- Chronobiology International*, 39(8), 1059-1070. <https://doi.org/10.1080/07420528.2022.2084043>
- Goldfarb, I., Giladi, A., Barak, S., Lev, I., & Dor-Haim, H. (2025). Physical activity as clinical practice care for patients with type 2 diabetics and its implementation in routine clinical care: an expert opinion survey. *Frontiers in Endocrinology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fendo.2025.1518285>
 - Hackney, A. C., & Aggelidis, X. P. (2022). Exercise and the cortisol response: A mini-review. *Current Opinion in Endocrine and Metabolic Research*, 25, 100344. <https://doi.org/10.1016/j.coemr.2022.100344>
 - Javdaneh, N., Siahkouhian, M., & Farhangi, M. A. (2022). Overtraining syndrome: a practical guide. *Minerva Endocrinology*, 48(2), 263-274. <https://doi.org/10.23736/S2724-6507.22.03666-4>
 - Kosasih, R., Frisca, F., Santoso, A., Destra, E., Gunaidi, F., Jap, A., & Gracienne, G. (2025). Korelasi antara Kadar Insulin dalam Darah dengan Kekuatan Otot Tangan Kanan dan Kiri pada Kelompok Lanjut Usia. *JURNAL RISET RUMPUN ILMU KESEHATAN*. <https://doi.org/10.55606/jurrikes.v4i1.4881>
 - Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2020). Endocrine responses and adaptations to strength and power training. In *Strength and Conditioning* (pp. 57-81). Routledge.
 - O'Donnell, S., Beaven, C. M., & Driller, M. W. (2023). The effect of sleep manipulation on athletic performance, recovery, and physiology: a systematic review. *Sports Medicine*, 53(2), 487-506. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01777-3>
 - Riachy, R., Khairallah, M., & Azar, S. T. (2020). The role of exercise in the aging man. *Journal of Clinical Medicine*, 9(5), 1589. <https://doi.org/10.3390/jcm9051589>

- Sale, C., Elliott-Sale, K. J., & Dolan, E. (2021). The female athlete: A nutritional perspective. *The Journal of Sports Sciences*, 39(16), 1809-1824. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1912999>
- Stastny, P., Tufano, J. J., & Golas, A. (2021). Strengthening the case for damaging eccentric exercise to maximise muscle hypertrophy. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(6), 1735-1750. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003926>
- Torstveit, M. K., Fahrenholtz, I. L., Stenqvist, T. B., & Melin, A. K. (2023). The female athlete triad and relative energy deficiency in sport (RED-S): a call for a broader perspective. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 9(1), e001473. <http://dx.doi.org/10.1136/bmjsem-2022-001473>
- Vingren, J. L. (2022). The testosterone response to resistance exercise: a powerful but misunderstood phenomenon. *Sports Medicine*, 52(7), 1461-1470. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01642-3>

BAB 9

FISIOLOGI PEMULIHAN DAN KELELAHAN

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- Menganalisis mekanisme biokimiawi kelelahan otot perifer, termasuk peran asidosis dan akumulasi metabolit.
- Menjelaskan dampak penumpukan fosfat anorganik terhadap fungsi *cross-bridge* dan pelepasan kalsium.
- Menguraikan komponen-komponen *Excess Post-exercise Oxygen Consumption* (EPOC) dan signifikansi fisiologisnya.
- Membedakan proses resintesis ATP dan pembersihan laktat selama fase pemulihan.
- Mengevaluasi efektivitas strategi pemulihan aktif dibandingkan dengan pemulihan pasif dalam konteks olahraga intensitas tinggi.
- Menjelaskan patofisiologi *Delayed Onset Muscle Soreness* (DOMS) dan membedakannya dari nyeri akut akibat kelelahan.
- Menerapkan prinsip-prinsip penanganan DOMS yang berbasis bukti dalam praktik klinis.

Pendahuluan

Kelelahan adalah fenomena fisiologis yang kompleks dan sering disalahartikan. Dalam konteks olahraga, kelelahan sering kali dipandang sebagai kegagalan sistem tubuh untuk mempertahankan kinerja. Namun, dari sudut pandang evolusi dan fisiologis, kelelahan sebenarnya adalah mekanisme protektif yang sangat canggih.

Kelelahan mencegah kerusakan katastrofik pada tingkat seluler dengan memaksa tubuh untuk mengurangi intensitas atau menghentikan aktivitas sebelum cadangan energi benar-benar habis atau sebelum homeostasis kimiawi terganggu hingga ke tingkat yang mematikan. Bagi tenaga kesehatan dan pelatih, memahami perbedaan antara kelelahan yang sehat dan kelelahan patologis adalah kunci untuk merancang program latihan yang aman dan efektif.

Mekanisme kelelahan tidak tunggal, melainkan multifaktorial dan sangat bergantung pada jenis, intensitas, dan durasi aktivitas yang dilakukan. Pada latihan intensitas tinggi jangka pendek, kelelahan sering kali disebabkan oleh gangguan biokimiawi di dalam sel otot itu sendiri, yang dikenal sebagai kelelahan perifer. Akumulasi produk sampingan metabolisme, seperti ion hidrogen dan fosfat anorganik, dapat secara langsung mengganggu mesin kontraktile otot. Di sisi lain, pada latihan ketahanan jangka panjang, penipisan cadangan bahan bakar seperti glikogen menjadi faktor dominan. Pemahaman mendalam tentang mekanisme ini memungkinkan kita untuk mengidentifikasi "titik lemah" dalam rantai fisiologis atlet.

Sisi lain dari koin kelelahan adalah pemulihan. Pemulihan bukanlah sekadar periode ketidakaktifan, melainkan proses aktif di mana tubuh bekerja keras untuk mengembalikan homeostasis, memperbaiki kerusakan jaringan, dan melakukan superkompensasi. Fenomena seperti konsumsi oksigen berlebih pasca-latihan (EPOC) menunjukkan bahwa kebutuhan metabolik tubuh tetap tinggi bahkan setelah latihan berhenti. Selain itu, fenomena nyeri otot yang tertunda (DOMS) sering kali membingungkan pasien yang mengira itu disebabkan oleh asam laktat, padahal mekanisme sebenarnya melibatkan kerusakan struktural dan peradangan. Bab ini akan mengupas tuntas fisiologi di balik mengapa kita lelah, bagaimana kita pulih, dan bagaimana mengelola rasa sakit yang menyertai adaptasi otot.

9.1. Mekanisme Kelelahan Otot (Fatigue)

Kelelahan otot didefinisikan sebagai penurunan kapasitas otot untuk menghasilkan gaya atau daya yang diinduksi oleh aktivitas fisik, yang dapat dipulihkan dengan istirahat. Secara luas, kelelahan dikategorikan menjadi dua jenis utama yaitu kelelahan sentral yang berasal dari sistem saraf pusat (seperti yang dibahas pada Bab 3) dan kelelahan perifer yang terjadi di dalam unit otot itu sendiri. Kelelahan perifer melibatkan gangguan pada situs-situs di luar persimpangan neuromuskular, termasuk membran sel otot, sistem tubulus-T, retikulum sarkoplasma, atau protein kontraktil (aktin dan miosin).

Faktor utama yang menyebabkan kelelahan perifer selama latihan intensitas tinggi adalah perubahan lingkungan intraseluler otot. Akumulasi metabolit tertentu dapat secara langsung menghambat interaksi *cross-bridge* atau mengganggu penanganan kalsium. Selain itu, ketersediaan energi dalam bentuk ATP harus dipertahankan secara ketat. Meskipun konsentrasi ATP otot jarang turun hingga ke tingkat yang kritis (karena mekanisme protektif kelelahan itu sendiri), ketidakmampuan untuk meregenerasi ATP dengan laju yang cukup cepat untuk memenuhi permintaan akan menyebabkan penurunan gaya.

Pemahaman tentang kelelahan perifer telah bergeser dari sekadar menyalahkan "asam laktat" menjadi pandangan yang lebih komprehensif yang melibatkan interaksi ion anorganik. Penelitian modern menyoroti peran ion fosfat anorganik (Pi) dan ion hidrogen (H⁺) sebagai kontributor utama penurunan kekuatan otot. Interaksi kompleks antara metabolit ini memengaruhi sensitivitas protein kontraktil terhadap kalsium dan kinetika siklus jembatan silang.

Analogi: Bayangkan sebuah pabrik mobil (otot) yang sedang memproduksi dengan kecepatan penuh. Kelelahan perifer bukan disebabkan oleh para pekerja (sistem saraf) yang malas memberikan perintah, melainkan karena mesin-mesin di lantai pabrik macet. Kemacetan ini bisa disebabkan oleh sampah produksi yang menumpuk di roda gigi (akumulasi metabolit seperti H^+ dan P_i) atau karena pasokan bahan bakar ke mesin tersendat (depleksi glikogen). Mesin masih utuh, tetapi lingkungan internal pabrik menjadi tidak kondusif untuk operasi yang efisien sehingga output produksi (gaya otot) menurun.

9.1.1. Penumpukan Ion Hidrogen (Asidosis)

Selama latihan intensitas tinggi, laju glikolisis anaerobik meningkat pesat, menyebabkan hidrolisis ATP yang cepat dan produksi laktat. Proses ini disertai dengan pelepasan ion hidrogen (H^+), yang menyebabkan penurunan pH intraseluler otot, kondisi yang dikenal sebagai asidosis metabolik. Penurunan pH ini, dari tingkat istirahat sekitar 7.0 menjadi serendah 6.4 selama kelelahan, memiliki dampak negatif pada fungsi kontraktile otot melalui beberapa mekanisme (Draper et al., 2024).

Pertama, konsentrasi H^+ yang tinggi dapat bersaing dengan ion kalsium (Ca^{2+}) untuk situs pengikatan pada troponin C. Ketika H^+ mengikat troponin, hal itu menghambat Ca^{2+} untuk melakukan hal yang sama, sehingga mengurangi aktivasi filamen tipis dan jumlah jembatan silang yang dapat terbentuk. Kedua, asidosis dapat menghambat aktivitas enzim-enzim kunci dalam glikolisis, seperti fosfofruktokinase (PFK), yang memperlambat laju produksi ATP anaerobik. Ketiga, H^+ dapat secara langsung menghambat kecepatan pemendekan otot dengan mempengaruhi aktivitas ATPase miosin (Powers et al., 2021).

9.1.2. Deplesi Glikogen dan Kegagalan Transmisi Saraf

Deplesi glikogen otot adalah penyebab utama kelelahan selama latihan submaksimal yang berkepanjangan (seperti lari maraton). Glikogen tidak hanya berfungsi sebagai substrat energi, tetapi lokasi penyimpanannya di dalam sel otot juga sangat penting. Glikogen yang disimpan di dekat retikulum sarkoplasma (RS) tampaknya memainkan peran vital dalam pelepasan kalsium. Ketika simpanan glikogen spesifik ini habis, pelepasan Ca^{2+} dari RS menjadi terganggu, yang menyebabkan kegagalan dalam *excitation-contraction coupling* dan penurunan produksi gaya (Hearris et al., 2022).

Selain faktor metabolik, kegagalan transmisi saraf di persimpangan neuromuskular atau di sepanjang membran otot juga dapat berkontribusi pada kelelahan, meskipun kurang umum dibandingkan faktor metabolik pada manusia sehat. Selama aktivitas frekuensi tinggi yang sangat intens, konsentrasi kalium (K^+) dapat menumpuk di ruang ekstraseluler tubulus-T. Akumulasi ini dapat mendepolarisasi membran sel secara berlebihan dan mengurangi amplitudo potensial aksi, sehingga sinyal listrik gagal merambat jauh ke dalam otot untuk memicu pelepasan kalsium (Cheng & Place, 2022).

9.1.3. Peran Fosfat Anorganik dalam Menurunkan Gaya Kontraksi

Fosfat anorganik (Pi) adalah metabolit yang terakumulasi di dalam sel otot ketika ATP dipecah menjadi ADP dan Pi untuk menghasilkan energi. Selama latihan intensitas tinggi, konsentrasi Pi intraseluler dapat meningkat secara dramatis. Penelitian terkini menunjukkan bahwa akumulasi Pi mungkin merupakan kontributor paling signifikan terhadap kelelahan otot perifer, bahkan mungkin lebih berpengaruh daripada asidosis (Draper et al., 2024).

Peningkatan Pi mengganggu fungsi kontraktil melalui dua cara utama. Pertama, Pi yang tinggi di dalam sarkoplasma dapat masuk ke dalam retikulum sarkoplasma dan berikatan dengan kalsium, membentuk endapan kalsium fosfat. Hal ini mengurangi jumlah kalsium bebas yang tersedia untuk dilepaskan guna memicu kontraksi. Kedua, Pi yang tinggi secara langsung menghambat pelepasan Pi dari kepala miosin selama siklus jembatan silang. Karena pelepasan Pi adalah langkah yang diperlukan untuk *power stroke*, akumulasi Pi membalikkan langkah ini atau memperlambatnya, sehingga mengurangi gaya total yang dihasilkan oleh otot (Powers et al., 2021).

9.2. Proses Pemulihan (Recovery)

Pemulihan adalah periode pasca-latihan di mana tubuh kembali ke kondisi fisiologis pra-latihan. Proses ini melibatkan normalisasi fungsi metabolik, kardiovaskular, dan hormonal, serta pemulihan cadangan energi. Durasi dan kompleksitas proses pemulihan sangat bergantung pada intensitas dan durasi latihan yang mendahuluinya. Pemulihan bukan proses pasif yang terjadi begitu saja, melainkan serangkaian reaksi metabolik aktif yang membutuhkan energi dan oksigen.

Salah satu indikator utama dari proses pemulihan aktif ini adalah konsumsi oksigen yang tetap tinggi di atas level istirahat setelah latihan berhenti. Fenomena ini secara historis disebut sebagai "hutang oksigen" (*oxygen debt*), tetapi sekarang lebih akurat disebut sebagai *Excess Post-exercise Oxygen Consumption* (EPOC). Besarnya EPOC mencerminkan biaya energi untuk memulihkan gangguan fisiologis yang terjadi selama latihan, termasuk resintesis ATP dan PCr, pembersihan laktat, dan penurunan suhu tubuh.

Strategi pemulihan juga memainkan peran penting dalam seberapa cepat seorang atlet dapat kembali berlatih atau bertanding. Pemahaman tentang fisiologi pemulihan memungkinkan tenaga

kesehatan untuk merekomendasikan intervensi yang tepat, seperti memilih antara pemulihan aktif (melakukan aktivitas ringan) atau pasif (istirahat total). Pilihan ini bergantung pada jenis kelelahan yang dialami dan tujuan dari sesi latihan berikutnya.

Analogi: Bayangkan Anda baru saja mengadakan pesta besar di rumah (latihan intens). Setelah tamu pulang, rumah tidak langsung bersih. Anda harus melakukan "pemulihan": membuang sampah (laktat), menyusun kembali perabotan (resintesis ATP/PCr), dan mendinginkan ruangan (menurunkan suhu tubuh). EPOC adalah listrik dan tenaga yang Anda gunakan selama proses bersih-bersih ini. Anda tidak bisa langsung tidur (istirahat total) tanpa membereskan kekacauan terlebih dahulu, atau rumah tidak akan siap untuk digunakan besok.

9.2.1. Excess Post-exercise Oxygen Consumption (EPOC)

EPOC terdiri dari dua komponen utama yaitu komponen cepat dan komponen lambat. Komponen cepat terjadi dalam 2-3 menit pertama setelah latihan berhenti. Oksigen yang dikonsumsi selama fase ini terutama digunakan untuk meresintesis simpanan ATP dan fosfokreatin (PCr) yang habis di otot, serta untuk mengisi ulang oksigen yang terikat pada mioglobin dan hemoglobin (Draper et al., 2024).

Komponen lambat dari EPOC dapat berlangsung selama berjam-jam setelah latihan, tergantung pada intensitas dan durasi aktivitas. Faktor-faktor yang berkontribusi pada komponen lambat ini meliputi oksidasi laktat, penurunan suhu tubuh (efek termogenik), peningkatan denyut jantung dan pernapasan yang persisten, serta peningkatan kadar hormon sirkulasi seperti katekolamin. Proses-proses ini membutuhkan energi tambahan, yang dipenuhi melalui metabolisme oksidatif yang

berkelanjutan, sehingga menjaga konsumsi oksigen tetap tinggi di atas tingkat basal (Powers et al., 2021).

9.2.2. Resintesis ATP dan Pembersihan Laktat

Resintesis ATP dan PCr terjadi sangat cepat selama pemulihan, sebagian besar melalui metabolisme aerobik. Sebaliknya, pembersihan laktat yang terakumulasi membutuhkan waktu lebih lama. Laktat tidak hanya dibuang sebagai limbah, tetapi didaur ulang sebagai sumber energi. Sekitar 70% laktat dioksidasi menjadi piruvat dan digunakan sebagai bahan bakar oleh jantung dan otot rangka tipe I (aerobik). Sekitar 20% dikonversi menjadi glukosa di hati melalui glukoneogenesis (Siklus Cori), dan 10% sisanya dikonversi menjadi asam amino (Draper et al., 2024).

Pembersihan laktat dari darah mengikuti kinetika orde pertama, yang berarti laju pembersihannya sebanding dengan konsentrasinya. Waktu paruh pembersihan laktat biasanya sekitar 15-25 menit dengan pemulihan aktif. Kemampuan tubuh untuk menggunakan laktat sebagai bahan bakar selama pemulihan menyoroti konsep "Lactate Shuttle", di mana laktat dipindahkan dari tempat produksi ke tempat penggunaan, menjadikannya perantara metabolik yang penting daripada sekadar produk limbah penyebab kelelahan.

9.2.3. Strategi Active Recovery vs Passive Recovery

Pemulihan aktif (*active recovery*) melibatkan pelaksanaan latihan intensitas rendah (biasanya 30-40% VO₂ max) segera setelah latihan utama. Strategi ini terbukti lebih unggul dalam mempercepat pembersihan laktat darah dibandingkan pemulihan pasif (istirahat total). Aktivitas ringan menjaga aliran darah tetap tinggi ke otot-otot yang aktif, memfasilitasi transpor laktat ke jaringan lain (seperti jantung dan hati) untuk dioksidasi (Abdillah et al., 2025).

Namun, pemulihan pasif mungkin lebih bermanfaat dalam situasi tertentu, seperti ketika resintesis glikogen otot adalah prioritas utama dan interval antar sesi sangat singkat. Selama pemulihan pasif, penggunaan glikogen otot diminimalkan, memungkinkan jalur metabolik berfokus sepenuhnya pada resintesis. Pemilihan antara pemulihan aktif dan pasif harus disesuaikan dengan kebutuhan atlet: jika tujuannya adalah menghilangkan laktat dengan cepat (misalnya, antar babak pertandingan), pemulihan aktif disarankan; jika tujuannya adalah penghematan energi total, pemulihan pasif mungkin lebih tepat.

9.3. Delayed Onset Muscle Soreness (DOMS)

Nyeri otot yang muncul 24 hingga 72 jam setelah aktivitas fisik yang tidak biasa atau intensitas tinggi dikenal sebagai *Delayed Onset Muscle Soreness* (DOMS). Berbeda dengan nyeri akut yang dirasakan selama latihan (yang sering kali disebabkan oleh asidosis), DOMS tidak ada hubungannya dengan penumpukan asam laktat. Laktat kembali ke tingkat istirahat dalam waktu satu jam setelah latihan, sementara DOMS baru mulai muncul keesokan harinya. DOMS terutama dikaitkan dengan latihan yang melibatkan kontraksi eksentrik (memanjang di bawah beban), seperti lari menuruni bukit atau fase menurunkan beban saat angkat besi.

Fenomena ini adalah hasil dari kerusakan mikro struktural pada jaringan otot dan respons inflamasi yang menyertainya. Meskipun terasa tidak nyaman dan dapat menurunkan kinerja untuk sementara waktu karena rasa sakit dan kekakuan, DOMS adalah bagian integral dari proses adaptasi. Kerusakan ini memicu serangkaian peristiwa seluler yang pada akhirnya menyebabkan otot pulih menjadi lebih kuat dan lebih tahan terhadap kerusakan serupa di masa depan, sebuah fenomena yang dikenal sebagai *Repeated Bout Effect*.

Pemahaman klinis tentang DOMS sangat penting untuk membedakannya dari cedera otot akut (seperti ketegangan atau robekan otot). DOMS biasanya bersifat bilateral (terjadi pada kedua sisi tubuh jika latihannya simetris), memuncak dalam 48 jam, dan mereda dengan sendirinya. Sementara itu, cedera akut biasanya terjadi tiba-tiba, tajam, dan lokal. Edukasi pasien tentang sifat DOMS dapat mengurangi kecemasan dan membantu mereka tetap patuh pada program rehabilitasi atau latihan.

Analogi: Bayangkan DOMS seperti renovasi jalan raya. Latihan eksentrik berat menyebabkan retakan kecil di aspal (mikro-trauma otot). Rasa sakit yang Anda rasakan keesokan harinya bukan karena retakan itu sendiri, tetapi karena banyaknya pekerja konstruksi, truk, dan peralatan berat (sel-sel radang dan cairan edema) yang datang ke lokasi untuk memperbaiki jalan. Kemacetan dan pembengkakan inilah yang menekan saraf dan menyebabkan rasa sakit. Namun, setelah perbaikan selesai, jalan tersebut (otot) menjadi lebih kuat dan lebih mampu menahan beban lalu lintas di masa depan.

9.3.1. Patofisiologi Kerusakan Mikro Otot

Inisiasi DOMS dimulai dengan trauma mekanis pada tingkat sarkomer. Kontraksi eksentrik, di mana otot memanjang saat menghasilkan gaya, menempatkan beban tarikan yang sangat tinggi pada filamen protein. Hal ini menyebabkan gangguan fisik pada garis-Z (*Z-line streaming*), yang merupakan struktur penjangkaran bagi filamen aktin. Kerusakan struktural ini juga dapat meluas ke sarkolema (membran sel otot) dan jaringan ikat di sekitarnya (Draper et al., 2024).

Gangguan pada membran sel dan retikulum sarkoplasma menyebabkan gangguan homeostasis kalsium. Kalsium dapat bocor

ke dalam sel dalam jumlah yang tidak terkendali. Peningkatan kalsium intraseluler ini dapat mengaktifkan enzim protease (seperti calpain) yang mendegradasi protein kontraktile dan struktural, memperparah kerusakan awal. Proses degradasi protein ini adalah langkah awal yang diperlukan untuk membuang jaringan yang rusak sebelum jaringan baru dapat dibangun.

9.3.2. Respon Inflamasi dan Perbaikan Jaringan

Rasa nyeri pada DOMS terutama disebabkan oleh respons inflamasi yang terjadi setelah kerusakan mekanis awal. Kerusakan jaringan memicu invasi sel-sel kekebalan, dimulai dengan neutrofil dan diikuti oleh makrofag, ke lokasi cedera. Sel-sel ini melepaskan zat kimia pro-inflamasi (sitokin, prostaglandin, dan histamin) dan radikal bebas. Zat-zat ini meningkatkan permeabilitas pembuluh darah, menyebabkan akumulasi cairan (edema) yang meningkatkan tekanan di dalam kompartemen otot (Owens et al., 2019).

Akumulasi cairan dan zat kimia ini mensensitisasi nosiseptor (reseptor nyeri) di jaringan otot, menyebabkan sensasi nyeri dan kekakuan yang khas pada DOMS. Meskipun proses inflamasi ini menyebabkan ketidaknyamanan, ini adalah langkah kritis untuk perbaikan. Makrofag juga melepaskan faktor pertumbuhan yang mengaktifkan sel satelit (sel punca otot), yang kemudian berproliferasi dan menyatu dengan serabut otot yang rusak untuk memperbaikinya dan mendorong hipertrofi adaptif.

9.3.3. Penanganan DOMS dalam Praktik Klinis

Penanganan DOMS berfokus pada pengurangan gejala tanpa mengganggu proses penyembuhan alami. Intervensi umum meliputi *sport massage*, kompresi, dan latihan ringan. *Sport massage* telah terbukti efektif dalam mengurangi persepsi nyeri dan kekakuan otot

pada atlet dengan DOMS, kemungkinan dengan meningkatkan aliran darah lokal dan mengurangi edema (Abdillah et al., 2025; Nindyo et al., 2025). Latihan intensitas rendah juga dapat memberikan pereda nyeri sementara melalui mekanisme "analgesia yang diinduksi latihan", meskipun tidak mempercepat perbaikan struktural.

Penggunaan obat antiinflamasi nonsteroid (NSAID) untuk DOMS masih kontroversial. Meskipun dapat mengurangi nyeri, penggunaan NSAID jangka panjang atau dosis tinggi dapat menumpulkan respons inflamasi yang diperlukan untuk adaptasi otot, yang berpotensi menghambat peningkatan kekuatan jangka panjang (Owens et al., 2019). Oleh karena itu, pendekatan klinis terbaik seringkali melibatkan modalitas non-farmakologis, hidrasi yang cukup, nutrisi (protein), dan tidur yang berkualitas, serta edukasi bahwa DOMS adalah proses sementara yang mengarah pada adaptasi positif.

Rangkuman Bab

- Kelelahan otot perifer disebabkan oleh akumulasi metabolit (H^+ , Pi) dan deplesi glikogen, bukan sekadar "asam laktat".
- Asidosis metabolik (ion H^+) mengganggu pengikatan kalsium pada troponin dan menghambat enzim glikolitik.
- Fosfat anorganik (Pi) yang menumpuk mengganggu pelepasan kalsium dari SR dan menghambat *power stroke* miosin.
- EPOC mencerminkan kebutuhan oksigen pasca-latihan untuk resintesis ATP/PCr, pembersihan laktat, dan pemulihan fisiologis umum.
- Pemulihan aktif lebih efektif untuk membersihkan laktat darah karena mempertahankan aliran darah ke organ pengoksidasi laktat.

- DOMS disebabkan oleh mikro-trauma pada serat otot (terutama akibat kontraksi eksentrik) dan respon inflamasi selanjutnya, bukan karena penumpukan laktat.
- Proses inflamasi pada DOMS penting untuk adaptasi otot (*Repeated Bout Effect*).
- Penanganan DOMS sebaiknya memprioritaskan metode non-farmakologis seperti *massage* untuk menghindari gangguan pada sinyal adaptasi otot.

Latihan Mahasiswa

Soal Esai

1. Jelaskan mekanisme spesifik bagaimana akumulasi fosfat anorganik (Pi) menyebabkan kelelahan otot pada tingkat sarkomer dan retikulum sarkoplasma.
2. Bandingkan komponen cepat dan komponen lambat dari EPOC. Proses fisiologis apa yang dominan pada masing-masing fase?
3. Seorang atlet mengeluh nyeri otot hebat 24 jam setelah sesi latihan lari menuruni bukit. Jelaskan patofisiologi kondisi ini (DOMS) dan mengapa lari menuruni bukit lebih memicu kondisi ini dibandingkan lari di lintasan datar.
4. Evaluasi keuntungan dan kerugian menggunakan obat antiinflamasi (NSAID) untuk menangani DOMS pada atlet yang sedang dalam fase pembangunan otot (hipertrofi).
5. Jelaskan konsep "Lactate Shuttle" dan bagaimana hal ini mengubah pemahaman kita tentang peran laktat selama pemulihan aktif.

Soal Pilihan Ganda

1. Penyebab utama penurunan pH otot selama latihan intensitas tinggi adalah akumulasi...
 - A. Ion Kalsium
 - B. Ion Natrium
 - C. Ion Hidrogen -V-
 - D. Ion Kalium
2. Komponen lambat dari EPOC terutama dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut, KECUALI...
 - A. Peningkatan suhu tubuh
 - B. Oksidasi laktat
 - C. Resintesis cepat fosfokreatin -V-
 - D. Peningkatan denyut jantung dan pernapasan
3. Jenis kontraksi otot yang paling sering menyebabkan *Delayed Onset Muscle Soreness* (DOMS) adalah...
 - A. Konsentrik
 - B. Isometrik
 - C. Eksentrik -V-
 - D. Isokinetik
4. Strategi pemulihan yang paling efektif untuk mempercepat pembersihan laktat dari darah setelah latihan maksimal adalah...
 - A. Istirahat total (berbaring)
 - B. Pemulihan aktif intensitas rendah (30-40% VO₂max) -V-
 - C. Pijat jaringan dalam
 - D. Mandi air dingin (*cold plunge*)

5. Akumulasi fosfat anorganik (Pi) di dalam sel otot berkontribusi pada kelelahan dengan cara...
 - A. Meningkatkan sensitivitas troponin terhadap kalsium
 - B. Mengendalikan kalsium di dalam retikulum sarkoplasma -V-
 - C. Meningkatkan kecepatan konduksi saraf
 - D. Mempercepat aktivitas ATPase miosin

6. Kerusakan struktural pada sarkomer yang terlihat pada DOMS sering kali ditandai dengan gangguan pada...
 - A. Garis-M
 - B. Garis-Z (*Z-line streaming*) -V-
 - C. Mitokondria
 - D. Inti sel

7. Proses di mana laktat diubah kembali menjadi glukosa di hati disebut...
 - A. Siklus Krebs
 - B. Glikolisis
 - C. Siklus Cori -V-
 - D. Fosforilasi Oksidatif

8. Waktu puncak munculnya rasa nyeri pada DOMS biasanya terjadi...
 - A. Segera setelah latihan
 - B. 1-2 jam setelah latihan
 - C. 24-48 jam setelah latihan -V-
 - D. 1 minggu setelah latihan

9. Sel imun pertama yang menginvasi jaringan otot yang rusak pada fase awal DOMS adalah...
- A. Makrofag
 - B. Sel satelit
 - C. Neutrofil -V-
 - D. Fibroblas
10. Fenomena di mana otot menjadi lebih tahan terhadap kerusakan setelah mengalami satu kali serangan DOMS disebut...
- A. *Repeated Bout Effect -V-*
 - B. *Overtraining Syndrome*
 - C. *Central Fatigue*
 - D. *Active Recovery*

Studi Kasus atau Tugas Kontekstual

1. Seorang pasien pasca-operasi lutut baru saja memulai fase penguatan dalam rehabilitasinya. Fisioterapis memberikan latihan *leg press* dengan fokus pada fase menurunkan beban secara perlahan (eksentrik). Dua hari kemudian, pasien menelepon dengan panik karena pahanya terasa sangat sakit dan kaku, dan dia takut cederanya kambuh.
- Berdasarkan pengetahuan Anda tentang DOMS, bagaimana Anda akan menjelaskan kondisi ini kepada pasien untuk menenangkannya?
 - Saran penanganan mandiri apa yang akan Anda berikan?
 - Mengapa fisioterapis secara khusus memilih latihan eksentrik meskipun berisiko menyebabkan DOMS? (Petunjuk: Hubungkan dengan kekuatan otot dan adaptasi).

Glosarium Bab

- **Active Recovery:** Aktivitas fisik intensitas rendah yang dilakukan setelah latihan utama untuk memfasilitasi pembuangan produk sisa metabolik dan sirkulasi darah.
- **Asidosis Metabolik:** Kondisi penurunan pH (peningkatan keasaman) di dalam sel otot atau darah, sering disebabkan oleh akumulasi ion hidrogen selama latihan intensif.
- **Delayed Onset Muscle Soreness (DOMS):** Nyeri dan kekakuan otot yang muncul 24-72 jam setelah latihan, terutama setelah aktivitas eksentrik yang tidak biasa.
- **EPOC (Excess Post-exercise Oxygen Consumption):** Peningkatan konsumsi oksigen di atas tingkat istirahat yang terjadi setelah latihan berakhir untuk memulihkan kondisi fisiologis tubuh.
- **Fosfat Anorganik (Pi):** Produk pemecahan ATP yang jika terakumulasi dapat mengganggu kontraksi otot dan menyebabkan kelelahan.
- **Kontraksi Eksentrik:** Tipe kontraksi otot di mana otot memanjang saat menghasilkan gaya (melawan beban), penyebab utama kerusakan mikro otot.
- **Repeated Bout Effect:** Adaptasi protektif di mana satu sesi latihan yang menyebabkan DOMS membuat otot lebih tahan terhadap kerusakan dari latihan serupa berikutnya.
- **Siklus Cori:** Jalur metabolik di mana laktat yang diproduksi oleh glikolisis anaerobik di otot diangkut ke hati dan diubah kembali menjadi glukosa.

Daftar Pustaka Bab

- Abdillah, M., Hartoto, S., Ningsih, Y., Ardha, M., & Fathir, L. (2025). Sport massage Sebagai Solusi Cepat dalam Mengurangi Kelelahan Otot Setelah Aktivitas Fisik Intensitas Tinggi: Studi Literatur. *Jurnal Keolahragaan*. <https://doi.org/10.25157/jkor.v11i2.21214>
- Brooks, G. A. (2020). The lactate shuttle: the wisdom of the cell. *Journal of Cellular Physiology*, 235(9), 5914-5920.
- Cheng, A. J., & Place, N. (2022). The intricacies of excitation–contraction coupling and neuromuscular transmission in skeletal muscle fatigue. *Journal of Physiology*, 600(5), 1133-1147. <https://doi.org/10.1113/JP281987>
- Draper, N., Williams, C., & Marshall, H. (2024). *Exercise Physiology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003109280>
- Hearn, M. A., Hammond, K. M., Fell, J. M., & Morton, J. P. (2022). Regulation of muscle glycogen metabolism during exercise: Implications for endurance performance and training adaptations. *Nutrients*, 14(11), 2261. <https://doi.org/10.3390/nu14112261>
- Hotfiel, T., Freiwald, J., Hoppe, M. W., Lutter, C., Forst, R., Grim, C., ... & Engelhardt, M. (2018). Advances in delayed-onset muscle soreness (DOMS): Part I: Pathogenesis and diagnostics. *Sportverletzung· Sportschaden*, 32(04), 243-250.
- Nindyo, M., Roepajadi, J., Yuliastrid, D., & Fikri, M. (2025). Pengaruh Sport Massage terhadap Fleksibilitas Otot dan Ambang Nyeri Otot Hamstring pada Atlet Kabaddi Surabaya. *Mutiara Pendidikan dan Olahraga*. <https://doi.org/10.61132/mupeno.v2i3.273>
- Owens, D. J., Twist, C., Cobley, J. N., Howatson, G., & Close, G. L. (2019). Exercise-induced muscle damage: What is it,

what causes it and what are the nutritional solutions?.
European Journal of Sport Science, 19(1), 71-85.

- Powers, S. K., Howley, E. T., & Quindry, J. C. (2021).
Exercise Physiology: Theory and Application to Fitness and Performance (11th ed.). McGraw Hill.

BAB 10

PENGUKURAN DAN EVALUASI KAPASITAS FISIK

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- Menjelaskan prinsip dasar dan protokol standar untuk pengukuran kapasitas aerobik maksimal (VO_2 Max), termasuk protokol Bruce dan Balke.
- Menganalisis kelebihan dan keterbatasan penggunaan tes submaksimal untuk memprediksi VO_2 Max pada populasi klinis dan umum.
- Menginterpretasikan data fisiologis utama dari tes spirometri latihan, termasuk ambang ventilasi dan rasio pertukaran pernapasan (RER).
- Mendemonstrasikan pemahaman tentang protokol keamanan dan pelaksanaan tes kekuatan otot 1-Repetition Maximum (1RM).
- Membedakan aplikasi klinis antara dinamometri isokinetik dan pengujian kekuatan isotonik konvensional.
- Menjelaskan prinsip biofisika di balik analisis komposisi tubuh menggunakan Bioelectrical Impedance Analysis (BIA) dan kaliper lipatan kulit (*skinfold*).
- Mengevaluasi hubungan antara komposisi tubuh, kesehatan metabolik, dan performa fisik dalam konteks olahraga dan klinis.

Pendahuluan

Dalam praktik fisiologi olahraga dan kedokteran klinis, kemampuan untuk mengukur kapasitas fisik secara akurat adalah jembatan vital antara teori dan aplikasi. Tanpa data objektif, persepsian latihan hanyalah sebuah dugaan yang berisiko. Pengukuran dan evaluasi kapasitas fisik menyediakan data dasar (*baseline*) yang krusial untuk merancang program intervensi yang aman dan efektif, memantau kemajuan pasien atau atlet, serta mendeteksi adanya patologi atau keterbatasan fungsional yang mungkin tidak terlihat saat istirahat. Proses ini mengubah parameter fisiologis yang abstrak menjadi angka-angka konkret yang dapat ditindaklanjuti.

Evaluasi kapasitas fisik mencakup tiga pilar utama: kebugaran kardiorespirasi, fungsi muskuloskeletal, dan komposisi tubuh. Kebugaran kardiorespirasi, yang sering dianggap sebagai indikator kesehatan terpenting, mencerminkan efisiensi terintegrasi dari sistem paru, jantung, dan otot dalam menggunakan oksigen. Pengukurannya berkisar dari tes laboratorium yang canggih dengan analisis gas langsung hingga tes lapangan yang sederhana namun valid. Pemilihan metode yang tepat harus mempertimbangkan spesifisitas populasi, biaya, dan tujuan klinis.

Fungsi muskuloskeletal tidak hanya berbicara tentang seberapa besar beban yang dapat diangkat, tetapi juga tentang daya tahan, kekuatan (*power*), dan keseimbangan otot. Di era modern, teknologi seperti dinamometri isokinetik memungkinkan kita untuk membedah fungsi otot dengan presisi tinggi, mengidentifikasi defisit kekuatan pada sudut sendi tertentu yang sering kali menjadi penyebab cedera berulang. Sementara itu, tes lapangan konvensional tetap menjadi alat yang berharga untuk skrining massal dan evaluasi fungsional sehari-hari.

Komposisi tubuh, pilar ketiga, memberikan wawasan tentang kualitas massa tubuh, bukan sekadar kuantitasnya. Memahami rasio antara massa lemak dan massa bebas lemak sangat penting, mengingat implikasi metabolik dari adipositas visceral terhadap resistensi insulin dan penyakit kardiovaskular. Metode pengukuran telah berkembang dari penggunaan kaliper sederhana hingga analisis impedansi bioelektrik yang canggih, masing-masing dengan asumsi dan margin kesalahan yang harus dipahami oleh praktisi.

Bab ini didedikasikan untuk mengupas metodologi, protokol, dan interpretasi dari berbagai tes kapasitas fisik. Kita akan mempelajari bagaimana melaksanakan tes standar emas seperti protokol Bruce untuk VO₂ Max, cara melakukan tes 1RM dengan aman, hingga nuansa teknis dalam mengukur lipatan kulit. Tujuannya adalah membekali tenaga kesehatan dengan kompetensi teknis dan analitis untuk melakukan evaluasi yang valid dan reliabel, yang merupakan fondasi dari praktik berbasis bukti (*evidence-based practice*) (Draper et al., 2024).

10.1. Tes Kapasitas Aerobik (Cardiorespiratory Fitness)

Kapasitas aerobik, yang sering direpresentasikan oleh nilai VO₂ Max (konsumsi oksigen maksimal), dianggap sebagai standar emas untuk menilai kebugaran kardiorespirasi. VO₂ Max mencerminkan batas fisiologis tertinggi dari kemampuan tubuh untuk mengambil, mentransportasi, dan menggunakan oksigen selama aktivitas fisik yang intens. Pengukuran ini tidak hanya relevan bagi atlet elit untuk memprediksi performa daya tahan, tetapi juga merupakan prediktor independen yang kuat untuk mortalitas akibat semua penyebab dan penyakit kardiovaskular pada populasi umum. Tes kapasitas aerobik biasanya dilakukan menggunakan ergometer (treadmill atau sepeda statis) dengan protokol peningkatan beban kerja yang bertahap hingga mencapai kelelahan volunter (Draper et al., 2024).

Terdapat dua pendekatan utama dalam pengukuran kapasitas aerobik: tes maksimal langsung dan tes prediksi submaksimal. Tes maksimal dengan analisis gas langsung (*open-circuit spirometry*) memberikan data yang paling akurat. Dalam tes ini, subjek bernapas melalui masker wajah yang terhubung ke alat penganalisis gas, yang mengukur volume udara ventilasi serta konsentrasi oksigen dan karbondioksida pada setiap napas (*breath-by-breath analysis*). Data ini memungkinkan penentuan VO₂ Max yang presisi, ambang laktat, dan efisiensi ventilasi. Namun, metode ini membutuhkan peralatan mahal, tenaga ahli, dan motivasi maksimal dari subjek.

Sebaliknya, tes prediksi submaksimal mengestimasi VO₂ Max berdasarkan respons fisiologis (terutama denyut jantung) terhadap beban kerja yang telah ditentukan. Prinsip dasar tes ini adalah adanya hubungan linear antara denyut jantung dan konsumsi oksigen pada berbagai tingkat intensitas kerja. Dengan mengetahui beban kerja dan denyut jantung responsif, serta asumsi denyut jantung maksimal berdasarkan usia, VO₂ Max dapat diekstrapolasi. Meskipun memiliki margin kesalahan estimasi sekitar 10-15%, tes submaksimal lebih aman, murah, dan praktis untuk populasi lansia atau klinis yang mungkin berisiko tinggi jika melakukan tes maksimal (American College of Sports Medicine, 2021).

Pemilihan protokol tes harus disesuaikan dengan karakteristik individu yang diuji. Faktor-faktor seperti usia, status kesehatan, riwayat cedera ortopedi, dan spesifisitas olahraga harus dipertimbangkan. Misalnya, tes lari treadmill mungkin tidak cocok untuk pasien dengan osteoarthritis lutut parah, di mana ergometer sepeda atau tangan akan menjadi pilihan yang lebih baik. Interpretasi hasil tes juga harus mempertimbangkan kriteria pencapaian maksimalitas, seperti tercapainya *plateau* pada kurva VO₂, denyut

jantung mendekati prediksi maksimal, atau rasio pertukaran pernapasan (RER) di atas 1.10.

Analogi/Contoh Kasus: Bayangkan kapasitas aerobik (VO₂ Max) seperti ukuran mesin sebuah mobil. Tes VO₂ Max langsung adalah seperti menempatkan mobil di atas *dyno* (alat uji performa) dan memaksanya melaju hingga kecepatan tertingginya untuk mengukur tenaga kuda (*horsepower*) secara presisi. Ini akurat tetapi memberikan tekanan maksimal pada mesin. Sebaliknya, tes submaksimal adalah seperti mengendarai mobil pada kecepatan sedang (misalnya 100 km/jam) dan melihat berapa RPM (putaran mesin) yang dibutuhkan. Jika mobil A hanya membutuhkan 2000 RPM sedangkan mobil B membutuhkan 4000 RPM untuk kecepatan yang sama, kita bisa memprediksi bahwa mobil A memiliki mesin yang lebih besar dan kapasitas maksimal yang lebih tinggi tanpa harus memaksanya hingga batas kerusakan.

10.1.1. Protokol Tes VO₂ Max (Bruce dan Balke)

Protokol Bruce adalah salah satu protokol tes stres treadmill yang paling umum digunakan dalam kardiologi klinis dan kedokteran olahraga. Protokol ini melibatkan peningkatan kecepatan dan kemiringan (*grade*) treadmill setiap 3 menit. Tahapannya dimulai dengan beban kerja yang relatif rendah tetapi meningkat secara tajam dan cepat. Karena kenaikan beban kerja yang besar antar tahapan (sekitar 3 METs per tahap), protokol Bruce sangat efektif untuk mencapai kelelahan maksimal dalam waktu singkat (biasanya 8-12 menit) pada individu yang sehat. Namun, bagi pasien lansia atau yang mengalami dekondisi fisik, kenaikan yang curam ini sering kali menyebabkan kelelahan otot lokal pada kaki sebelum batas kardiovaskular tercapai (Draper et al., 2024).

Sebagai alternatif, Protokol Balke (dan variasinya, Balke-Ware) dirancang untuk memberikan peningkatan beban kerja yang lebih gradual. Dalam protokol Balke standar, kecepatan treadmill dijaga konstan (biasanya 3.3 mph), sementara kemiringan ditingkatkan sebesar 1% setiap menit. Peningkatan beban yang kecil dan sering ini memungkinkan adaptasi fisiologis yang lebih halus dan meminimalkan kelelahan otot lokal prematur. Hal ini membuat protokol Balke lebih sesuai untuk populasi klinis, lansia, atau individu dengan kapasitas fungsional rendah, karena memungkinkan pengukuran yang lebih akurat dari kapasitas aerobik tanpa stres muskuloskeletal yang berlebihan yang ditimbulkan oleh kemiringan curam atau kecepatan tinggi (American College of Sports Medicine, 2021).

10.1.2. Prediksi VO2 Max melalui Tes Submaksimal

Tes submaksimal didasarkan pada beberapa asumsi fisiologis fundamental: (1) hubungan linear antara denyut jantung (HR) dan beban kerja, (2) denyut jantung maksimal dapat diprediksi secara akurat berdasarkan usia, dan (3) efisiensi mekanik (konsumsi oksigen pada beban kerja tertentu) adalah konstan antar individu. Protokol umum termasuk tes siklus ergometer YMCA atau tes langkah (*step test*) Queens College. Dalam tes ini, subjek melakukan aktivitas pada intensitas moderat (biasanya sampai mencapai 85% dari estimasi HR maksimal), dan VO2 Max diprediksi dengan mengekstrapolasi garis hubungan HR-beban kerja ke titik HR maksimal prediksi (Draper et al., 2024).

Validitas tes submaksimal sangat dipengaruhi oleh kontrol variabel eksternal yang dapat memengaruhi denyut jantung, seperti suhu ruangan, kecemasan, konsumsi kafein, dehidrasi, atau kelelahan sebelumnya. Jika faktor-faktor ini tidak dikendalikan, denyut jantung akan lebih tinggi dari yang seharusnya untuk beban kerja tertentu,

yang mengarah pada estimasi VO₂ Max yang lebih rendah (underestimasi). Meskipun kurang presisi dibandingkan tes langsung, tes submaksimal memberikan estimasi yang cukup baik untuk memantau perubahan kebugaran dari waktu ke waktu dalam program rehabilitasi jantung atau kebugaran umum (Mier et al., 2020).

10.1.3. Interpretasi Data Spirometri saat Latihan

Analisis gas napas per napas (*breath-by-breath*) selama tes latihan kardiopulmoner (CPET) menyediakan data yang kaya di luar sekadar VO₂ Max. Parameter kunci meliputi Ventilasi Semenit (VE), Volume Tidal (VT), Frekuensi Pernapasan (RR), dan Rasio Pertukaran Pernapasan (RER). RER, yang merupakan rasio antara produksi CO₂ dan konsumsi O₂ (VCO₂/VO₂), adalah indikator penting dari substrat energi yang digunakan. Nilai RER 0.70 menunjukkan oksidasi lemak murni, sedangkan nilai 1.00 menunjukkan oksidasi karbohidrat murni. Selama tes maksimal, RER sering melebihi 1.10 atau bahkan 1.15, yang menunjukkan hiperventilasi akibat asidosis metabolik non-respirasi dan merupakan salah satu kriteria untuk memverifikasi upaya maksimal (Draper et al., 2024).

Data spirometri juga memungkinkan identifikasi Ambang Ventilasi (VT₁ dan VT₂). VT₁, ditandai dengan peningkatan VE yang tidak proporsional terhadap VO₂ tetapi proporsional terhadap VCO₂, mencerminkan titik di mana laktat mulai terakumulasi dan sistem dapar bikarbonat aktif. VT₂, atau titik kompensasi pernapasan, ditandai dengan peningkatan VE yang tajam yang didorong oleh penurunan pH darah yang signifikan. Interpretasi titik-titik ini sangat berharga bagi klinisi untuk menentukan zona latihan yang aman dan efektif, serta untuk mengevaluasi penyebab keterbatasan latihan, apakah bersifat kardial, ventilasi, atau metabolik (Mezzani et al., 2020).

10.2. Pengukuran Kekuatan dan Daya Tahan Otot

Kekuatan otot (*muscle strength*) dan daya tahan otot (*muscle endurance*) adalah komponen kebugaran yang berbeda namun saling terkait yang memerlukan protokol pengujian yang spesifik. Kekuatan otot didefinisikan sebagai kemampuan maksimal otot atau kelompok otot untuk menghasilkan gaya melawan resistensi eksternal dalam satu kali usaha. Standar emas untuk pengukuran kekuatan dinamis adalah tes *1-Repetition Maximum* (1RM). Daya tahan otot, di sisi lain, adalah kemampuan otot untuk melakukan kontraksi berulang atau mempertahankan kontraksi statis selama periode waktu tertentu tanpa kelelahan. Evaluasi fungsi otot ini penting tidak hanya untuk atlet, tetapi juga untuk populasi lansia guna menilai risiko sarkopenia dan kemandirian fungsional (Fragala et al., 2019).

Protokol pengujian harus dipilih berdasarkan spesifisitas gerakan, jenis kontraksi (isometrik, isotonik, atau isokinetik), dan peralatan yang tersedia. Pengujian isometrik, yang mengukur gaya statis tanpa perubahan panjang otot (misalnya menggunakan dinamometer genggam), berguna untuk menilai kekuatan pada sudut sendi tertentu, terutama ketika gerakan sendi dikontraindikasikan karena nyeri atau cedera akut. Namun, kekuatan isometrik tidak selalu berkorelasi baik dengan kinerja fungsional dinamis. Pengujian isotonik (misalnya, menggunakan beban bebas atau mesin tumpukan beban) lebih fungsional tetapi dibatasi oleh titik terlemah dalam rentang gerak sendi (*sticking point*) (Draper et al., 2024).

Dinamometri isokinetik mewakili puncak teknologi evaluasi kekuatan. Alat ini mengontrol kecepatan gerakan agar tetap konstan, sementara resistensi bervariasi menyesuaikan dengan gaya yang diberikan oleh subjek di seluruh rentang gerak. Ini memungkinkan pengukuran torsi maksimal pada setiap titik dalam lengkung gerakan, memberikan profil kekuatan yang sangat rinci. Rasio kekuatan antar

otot antagonis (misalnya, rasio hamstring terhadap quadriceps) yang diperoleh dari tes isokinetik adalah indikator penting untuk risiko cedera, terutama pada cedera ligamen lutut (ACL) (Undheim et al., 2020).

Keamanan adalah prioritas utama dalam semua tes kekuatan. Pemanasan yang adekuat, pengenalan terhadap peralatan, dan instruksi teknik yang tepat sangat penting untuk mencegah cedera selama pengujian. Pada populasi berisiko tinggi (misalnya hipertensi atau riwayat hernia), manuver Valsalva (menahan napas saat mengedan) harus dihindari secara ketat untuk mencegah lonjakan tekanan darah yang berbahaya. Penggunaan formula prediksi 1RM berdasarkan repetisi submaksimal (misalnya, melakukan 10 repetisi hingga lelah) sering kali lebih disukai untuk populasi ini daripada tes 1RM langsung yang memberikan beban maksimal pada sistem muskuloskeletal dan kardiovaskular.

Analogi/Contoh Kasus: Bayangkan Anda ingin menguji kekuatan struktur sebuah jembatan. Tes 1RM adalah seperti menempatkan satu truk raksasa yang sangat berat di atas jembatan untuk melihat apakah jembatan itu runtuh (kekuatan maksimal). Tes daya tahan otot adalah seperti mengirimkan barisan mobil berukuran sedang yang tak henti-hentinya melintasi jembatan selama berjam-jam untuk melihat kapan struktur jembatan mulai retak karena kelelahan (daya tahan). Dinamometri isokinetik adalah seperti menggunakan sensor canggih di setiap inci jembatan untuk mengukur tekanan yang diterima pada setiap titik saat beban bergerak melintasinya dengan kecepatan yang dikontrol ketat oleh komputer.

10.2.1. Tes 1-Repetition Maximum (1RM)

Tes 1RM adalah ukuran standar kekuatan isotonik dinamis. Protokol standar melibatkan serangkaian set pemanasan dengan beban ringan yang progresif, diikuti oleh upaya tunggal dengan beban yang meningkat hingga subjek tidak dapat lagi menyelesaikan repetisi dengan teknik yang benar. Periode istirahat yang cukup (3-5 menit) di antara upaya maksimal sangat krusial untuk memungkinkan pemulihan sistem energi ATP-PCr, sehingga kelelahan metabolik tidak memengaruhi hasil tes kekuatan murni (Draper et al., 2024). Tes ini memiliki reliabilitas yang tinggi jika dilakukan dengan standarisasi yang ketat.

Meskipun valid, tes 1RM membawa risiko cedera muskuloskeletal yang lebih tinggi pada individu yang tidak terlatih atau memiliki patologi sendi. Sebagai alternatif, metode prediksi 1RM dapat digunakan. Subjek melakukan repetisi sebanyak mungkin hingga kelelahan dengan beban submaksimal (biasanya 70-85% dari perkiraan maksimal, atau beban yang dapat diangkat 6-12 kali). Rumus seperti persamaan Epley atau Brzycki kemudian digunakan untuk mengestimasi nilai 1RM. Studi menunjukkan bahwa prediksi ini cukup akurat untuk sebagian besar tujuan pereseapan latihan, terutama untuk pemula dan populasi klinis (Fragala et al., 2019).

10.2.2. Dinamometri Isokinetik dalam Klinis

Dinamometri isokinetik menggunakan mesin elektromekanis canggih (seperti Biodex atau Cybex) yang menjaga kecepatan sudut anggota tubuh tetap konstan, tidak peduli seberapa kuat subjek mendorong. Resistensi yang diberikan mesin bersifat akomodatif; mesin melawan balik sama kuatnya dengan dorongan subjek. Ini memungkinkan otot untuk menghasilkan gaya maksimal di seluruh rentang gerak (*Range*

of Motion, ROM), sesuatu yang tidak mungkin dilakukan dengan beban bebas karena batasan mekanika tuas tubuh (Undheim et al., 2020).

Aplikasi klinis utamanya adalah dalam rehabilitasi dan skrining risiko cedera. Misalnya, ketidakseimbangan kekuatan bilateral (antara kaki kiri dan kanan) lebih dari 10-15% sering dianggap sebagai indikator pemulihan yang belum lengkap pasca operasi rekonstruksi ACL. Selain itu, rasio kekuatan resiprokal (misalnya, kekuatan eksentrik hamstring dibagi dengan kekuatan konsentrik quadriceps) memberikan wawasan tentang stabilitas dinamis sendi lutut. Data ini memungkinkan klinisi untuk menargetkan defisit spesifik dalam program rehabilitasi (Draper et al., 2024).

10.2.3. Tes Daya Tahan Otot Lokal (Push-up/Sit-up Test)

Tes daya tahan otot lokal mengukur kemampuan kelompok otot tertentu untuk melakukan kontraksi berulang selama periode waktu tertentu atau sampai kelelahan volunter. Tes lapangan yang paling umum termasuk tes *push-up* (untuk daya tahan tubuh bagian atas) dan tes *sit-up* atau *curl-up* (untuk daya tahan otot perut). Keuntungan utama tes ini adalah biaya yang rendah, kemudahan administrasi pada kelompok besar, dan korelasi yang wajar dengan kemampuan fungsional sehari-hari (American College of Sports Medicine, 2021).

Namun, validitas tes ini sangat bergantung pada standarisasi teknik gerakan. Perubahan kecil pada posisi tangan, kedalaman gerakan, atau tempo dapat secara drastis mengubah hasil. Selain itu, tes seperti *sit-up* tradisional telah mendapat kritik karena potensi beban kompresi yang tinggi pada tulang belakang lumbal. Oleh karena itu, variasi seperti *partial curl-up* sering direkomendasikan sebagai alternatif yang lebih aman. Hasil tes biasanya dibandingkan dengan data normatif berdasarkan usia dan jenis kelamin untuk menentukan

kategori kebugaran (misalnya: *poor*, *average*, *excellent*) (Fragala et al., 2019).

10.3. Analisis Komposisi Tubuh

Analisis komposisi tubuh mempartisi berat badan total menjadi komponen-komponen penyusunnya, yang paling dasar adalah model dua kompartemen: massa lemak (*fat mass*, FM) dan massa bebas lemak (*fat-free mass*, FFM). FFM mencakup otot, tulang, organ, dan cairan tubuh. Evaluasi ini jauh lebih informatif daripada sekadar menimbang berat badan atau menghitung Indeks Massa Tubuh (IMT), karena IMT tidak dapat membedakan antara kelebihan berat badan akibat otot (pada atlet) dan kelebihan lemak (pada obesitas). Pada populasi klinis, pemantauan FFM sangat penting karena hilangnya massa otot (sarkopenia/cachexia) berkaitan erat dengan prognosis yang buruk pada penyakit kronis (Kosasih et al., 2025).

Berbagai metode tersedia untuk menilai komposisi tubuh, mulai dari metode laboratorium presisi tinggi seperti *Dual-Energy X-ray Absorptiometry* (DXA) dan penimbangan hidrostatik, hingga metode lapangan yang lebih praktis seperti *Bioelectrical Impedance Analysis* (BIA) dan pengukuran lipatan kulit (*skinfold*). DXA dianggap sebagai standar emas klinis karena kemampuannya untuk mengukur kepadatan mineral tulang serta mendistribusikan massa lemak dan otot secara regional. Namun, paparan radiasi (meskipun sangat rendah) dan biaya tinggi membatasi penggunaan rutinnya di lapangan (Draper et al., 2024).

Pengukuran lapangan harus dilakukan dengan protokol yang ketat untuk meminimalkan kesalahan. Status hidrasi, waktu makan, dan aktivitas fisik sebelum tes dapat secara signifikan memengaruhi hasil, terutama pada metode BIA. Konsistensi dalam metode pengukuran dan teknisi pengukur sangat penting ketika memantau perubahan

komposisi tubuh dari waktu ke waktu. Tujuannya bukan untuk mendapatkan angka absolut yang "sempurna", tetapi untuk mendapatkan data yang reliabel yang mencerminkan tren perubahan fisiologis akibat intervensi diet dan latihan.

Memahami komposisi tubuh juga penting dalam konteks performa olahraga. Persentase lemak tubuh yang optimal bervariasi secara drastis antar cabang olahraga. Pada olahraga yang melawan gravitasi (seperti lari jarak jauh atau lompat tinggi) atau olahraga dengan kategori berat badan, kelebihan lemak tubuh bertindak sebagai beban mati yang menghambat performa. Namun, tekanan untuk mencapai persentase lemak yang sangat rendah dapat memicu gangguan makan dan masalah kesehatan seperti *Female Athlete Triad* atau RED-S, sehingga evaluasi harus dilakukan dengan sensitivitas dan pertimbangan kesehatan holistik (Torstveit et al., 2023).

Analogi/Contoh Kasus: Bayangkan dua buah koper yang identik dari luar, keduanya memiliki berat 20 kg. Koper A berisi batangan emas padat (otot/tulang) dan sedikit kapas (lemak). Koper B berisi banyak bantal kapas (lemak) dan sedikit batangan kayu (otot). Jika Anda hanya menimbanginya (IMT), keduanya tampak sama. Analisis komposisi tubuh adalah seperti membuka koper tersebut (atau menggunakan pemindai sinar-X bandara) untuk melihat isinya. Mengetahui isi koper sangat penting; dalam konteks kesehatan, koper yang penuh dengan kapas (lemak berlebih) mungkin terlihat tidak berbahaya tetapi secara metabolik "mudah terbakar" (menyebabkan peradangan dan penyakit), sedangkan emas (otot) adalah aset berharga yang melindungi kesehatan.

10.3.1. Bioelectrical Impedance Analysis (BIA)

BIA didasarkan pada prinsip bahwa jaringan tubuh memiliki konduktivitas listrik yang berbeda. Arus listrik lemah yang tidak terasa dialirkan melalui tubuh. Jaringan bebas lemak, yang mengandung banyak air dan elektrolit (seperti otot dan darah), adalah konduktor listrik yang baik dan memiliki resistansi (impedansi) yang rendah. Sebaliknya, jaringan lemak mengandung sedikit air dan bertindak sebagai isolator dengan impedansi yang tinggi. Dengan mengukur impedansi aliran arus, dan memasukkannya ke dalam persamaan regresi yang mencakup tinggi badan, berat badan, usia, dan jenis kelamin, alat BIA mengestimasi total air tubuh dan kemudian FFM dan FM (Draper et al., 2024).

Keterbatasan utama BIA adalah sensitivitasnya yang ekstrem terhadap status hidrasi. Dehidrasi akan menyebabkan tubuh tampak memiliki impedansi yang lebih tinggi, yang oleh alat akan diinterpretasikan sebagai persentase lemak yang lebih tinggi dari yang sebenarnya. Sebaliknya, edema atau hidrasi berlebih akan meremehkan persentase lemak. Selain itu, konsumsi makanan, olahraga, dan suhu kulit juga memengaruhi hasil. Oleh karena itu, protokol standar (puasa 2-4 jam, tidak berolahraga sebelumnya, buang air kecil sebelum tes) sangat penting untuk validitas hasil (American College of Sports Medicine, 2021).

10.3.2. Pengukuran Skinfold Caliper

Pengukuran lipatan kulit (*skinfold*) didasarkan pada asumsi bahwa sekitar 50% dari total lemak tubuh tersimpan di bawah kulit (lemak subkutan) dan bahwa ketebalan lipatan kulit pada lokasi-lokasi tertentu berkorelasi kuat dengan total lemak tubuh. Seorang teknisi menjepit lipatan kulit dan lemak subkutan (memisahkan dari otot di bawahnya) menggunakan kaliper yang memberikan tekanan konstan.

Lokasi umum meliputi trisep, dada, subskapula, suprailiaka, abdomen, paha, dan midaksila. Jumlah ketebalan lipatan kulit kemudian dimasukkan ke dalam persamaan prediksi (seperti persamaan Jackson-Pollock) untuk mengestimasi densitas tubuh, yang kemudian dikonversi menjadi persentase lemak menggunakan rumus Siri atau Brozek (Draper et al., 2024).

Akurasi metode ini sangat bergantung pada keterampilan teknis. Variabilitas antar-pengukur bisa tinggi jika lokasi jepitan tidak konsisten atau teknik menjepit tidak tepat. Kesalahan umum termasuk menjepit otot bersama lemak atau tidak menunggu kaliper untuk menetap sebelum membaca. Pada individu yang sangat obesitas, pengukuran *skinfold* sering kali sulit atau tidak mungkin dilakukan karena ketebalan lipatan melebihi bukaan kaliper, sehingga metode lain seperti BIA atau lingkaran tubuh lebih disarankan (American College of Sports Medicine, 2021).

10.3.3. Hubungan Persentase Lemak dengan Performa Fisik

Lemak tubuh memainkan peran ganda yang kompleks dalam performa fisik. Di satu sisi, lemak esensial diperlukan untuk fungsi fisiologis normal, isolasi termal, perlindungan organ, dan fungsi hormonal. Di sisi lain, lemak penyimpanan yang berlebihan sering kali merugikan performa biomekanik. Dalam hukum gerak Newton ($F=ma$), massa tambahan (lemak) memerlukan gaya yang lebih besar untuk berakselerasi. Ini secara langsung mengurangi kecepatan lari, ketinggian lompatan, dan kelincahan, serta meningkatkan biaya energi pergerakan (ekonomi gerak) (Draper et al., 2024).

Namun, hubungan ini tidak linear dan sangat spesifik terhadap olahraga. Pada perenang jarak jauh, sedikit lemak ekstra dapat memberikan daya apung yang menguntungkan. Pada pemain *rugby* atau *lineman* di *american football*, massa tubuh yang besar (termasuk

lemak) dapat memberikan momentum yang berguna untuk tumbukan. Tantangan bagi fisiolog olahraga dan pelatih adalah menentukan komposisi tubuh optimal yang mendukung performa spesifik tanpa mengorbankan kesehatan jangka panjang atlet. Penekanan berlebihan pada kekurusan dapat memicu gangguan makan dan RED-S, yang pada akhirnya menghancurkan performa dan kesehatan (Torstveit et al., 2023).

Rangkuman Bab

- Pengukuran kapasitas fisik meliputi evaluasi kebugaran aerobik, fungsi otot, dan komposisi tubuh, yang menjadi dasar peresepan latihan berbasis bukti.
- Tes VO₂ Max langsung adalah standar emas, namun tes prediksi submaksimal dan protokol lapangan lebih praktis untuk populasi umum dan klinis.
- Protokol Bruce (kenaikan tajam) dan Balke (kenaikan gradual) adalah protokol treadmill standar dengan aplikasi populasi yang berbeda.
- Data spirometri seperti RER dan ambang ventilasi memberikan wawasan metabolik mendalam tentang respons tubuh terhadap latihan.
- Kekuatan otot diukur secara dinamis dengan 1RM, sementara dinamometri isokinetik memberikan analisis torsi yang presisi di seluruh rentang gerak untuk rehabilitasi.
- Komposisi tubuh membedakan massa lemak dan bebas lemak; metode umum meliputi BIA (sensitif terhadap hidrasi) dan *skinfold* (bergantung keterampilan teknis).
- Lemak tubuh berlebih umumnya merugikan performa olahraga yang melawan gravitasi, namun evaluasi harus seimbang dengan risiko gangguan kesehatan akibat defisiensi energi.

Latihan Mahasiswa

Soal Esai

1. Bandingkan dan kontraskan protokol treadmill Bruce dan Balke. Jelaskan pada populasi mana Anda akan memilih satu protokol dibandingkan yang lain dan berikan alasan fisiologisnya.
2. Jelaskan prinsip fisiologis yang mendasari penggunaan tes denyut jantung submaksimal untuk memprediksi VO_2 Max. Sebutkan setidaknya tiga sumber kesalahan potensial yang dapat menyebabkan prediksi yang tidak akurat.
3. Seorang atlet pemula ingin mengetahui kekuatan maksimalnya untuk latihan beban. Jelaskan prosedur keamanan dan protokol pelaksanaan tes 1RM yang benar. Kapan Anda akan merekomendasikan penggunaan rumus prediksi daripada tes 1RM langsung?
4. Jelaskan prinsip kerja *Bioelectrical Impedance Analysis* (BIA). Mengapa status hidrasi sangat krusial dalam validitas tes ini, dan bagaimana dehidrasi memengaruhi hasil estimasi persentase lemak?
5. Interpretasikan data berikut dari tes spirometri latihan: Pada menit ke-12, RER subjek adalah 1.15 dan ventilasi meningkat tajam tanpa peningkatan VO_2 yang sebanding. Apa yang ditunjukkan oleh data ini mengenai intensitas latihan dan sistem energi dominan subjek?

Soal Pilihan Ganda

1. Standar emas untuk pengukuran langsung kapasitas aerobik adalah...
 - A. Tes langkah Queens College
 - B. Tes VO₂ Max dengan analisis gas (*open-circuit spirometry*) -V-
 - C. Tes submaksimal YMCA
 - D. Prediksi berdasarkan waktu lari 2.4 km
2. Rasio Pertukaran Pernapasan (RER) sebesar 0.70 menunjukkan bahwa tubuh terutama menggunakan substrat energi...
 - A. Karbohidrat
 - B. Protein
 - C. Lemak -V-
 - D. Campuran karbohidrat dan lemak
3. Protokol treadmill yang melibatkan peningkatan kemiringan secara konstan dengan kecepatan tetap, cocok untuk populasi dengan kapasitas rendah, adalah...
 - A. Protokol Bruce
 - B. Protokol Balke -V-
 - C. Protokol Wingate
 - D. Protokol Astrand
4. Keuntungan utama penggunaan dinamometer isokinetik dalam pengaturan klinis adalah...
 - A. Kemampuan mengukur kekuatan isometrik saja
 - B. Biaya peralatan yang rendah
 - C. Resistensi akomodatif yang menyesuaikan dengan gaya pasien di seluruh ROM -V-

- D. Kemampuan untuk mensimulasikan gerakan olahraga nyata dengan sempurna
5. Dalam pengukuran komposisi tubuh menggunakan BIA, dehidrasi cenderung menyebabkan...
- A. Underestimasi persentase lemak tubuh
 - B. Overestimasi persentase lemak tubuh -V-
 - C. Tidak ada perubahan pada hasil
 - D. Peningkatan estimasi massa otot
6. Tes kekuatan 1-Repetition Maximum (1RM) mengukur komponen kebugaran...
- A. Daya tahan otot
 - B. Kekuatan otot dinamis -V-
 - C. Kekuatan otot isometrik
 - D. Fleksibilitas
7. Asumsi utama yang mendasari prediksi VO₂ Max dari tes submaksimal adalah adanya hubungan linear antara beban kerja dan...
- A. Tekanan darah
 - B. Produksi laktat
 - C. Denyut jantung -V-
 - D. Suhu tubuh
8. Lokasi pengukuran lipatan kulit (*skinfold*) yang umum meliputi semua berikut ini, KECUALI...
- A. Trisep
 - B. Subskapula
 - C. Gluteus maksimus -V-
 - D. Suprailiaka

9. Nilai RER (Respiratory Exchange Ratio) yang sering digunakan sebagai kriteria sekunder untuk menentukan bahwa subjek telah mencapai usaha maksimal adalah...
- A. > 0.85
 - B. > 0.95
 - C. > 1.00
 - D. > 1.10 -V-
10. Fenomena di mana ventilasi meningkat secara tidak proporsional terhadap konsumsi oksigen selama tes latihan bertingkat disebut...
- A. Ambang Ventilasi -V-
 - B. Steady State
 - C. VO_2 Peak
 - D. Oksidasi Beta

Studi Kasus atau Tugas Kontekstual

1. **Studi Kasus Klinis:** Seorang pasien pria berusia 50 tahun yang baru pulih dari serangan jantung ringan dirujuk untuk rehabilitasi jantung. Dokter meminta evaluasi kapasitas aerobik untuk menentukan intensitas latihan yang aman. Pasien memiliki riwayat nyeri lutut (osteoarthritis).
- Pilih metode tes kapasitas aerobik yang paling tepat untuk pasien ini (Maksimal vs Submaksimal? Treadmill vs Sepeda?).
 - Berikan justifikasi fisiologis dan keamanan atas pilihan Anda.
 - Parameter apa saja yang harus dipantau secara ketat selama tes untuk memastikan keamanan pasien (misalnya: EKG, TD, RPE)?

Glosarium Bab

- ***1-Repetition Maximum (IRM)***: Beban terberat yang dapat diangkat seseorang dalam satu kali repetisi penuh dengan teknik yang benar.
- ***Bioelectrical Impedance Analysis (BIA)***: Metode pengukuran komposisi tubuh yang menggunakan resistensi jaringan terhadap arus listrik lemah untuk mengestimasi lemak dan air tubuh.
- ***Dinamometri Isokinetik***: Pengukuran kekuatan otot di mana kecepatan gerakan anggota tubuh dijaga konstan oleh mesin, memungkinkan resistensi maksimal di seluruh rentang gerak.
- ***Kaliper Skinfold***: Alat jepit yang digunakan untuk mengukur ketebalan lemak subkutan di berbagai titik tubuh.
- ***Kapasitas Aerobik (VO2 Max)***: Volume oksigen maksimal yang dapat digunakan tubuh per menit per kilogram berat badan selama aktivitas maksimal.
- ***Protokol Balke***: Protokol tes stres treadmill dengan peningkatan kemiringan gradual dan kecepatan konstan, sering digunakan untuk populasi klinis.
- ***Protokol Bruce***: Protokol tes stres treadmill dengan peningkatan kecepatan dan kemiringan yang signifikan setiap 3 menit.
- ***Rasio Pertukaran Pernapasan (RER)***: Rasio volume karbondioksida yang diproduksi terhadap volume oksigen yang dikonsumsi (VCO_2/VO_2), digunakan untuk mengestimasi penggunaan substrat.
- ***Tes Submaksimal***: Tes latihan yang dihentikan pada intensitas yang telah ditentukan (sebelum kelelahan) untuk memprediksi kapasitas maksimal.

Daftar Pustaka Bab

- *American College of Sports Medicine. (2021). ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription (11th ed.). Wolters Kluwer.*
- *Draper, N., Williams, C., & Marshall, H. (2024). Exercise Physiology. Routledge.*
<https://doi.org/10.4324/9781003109280>
- *Fragala, M. S., Cadore, E. L., Dorgo, S., Izquierdo, M., Kraemer, W. J., Peterson, M. D., & Ryan, E. D. (2019). Resistance training for older adults: Position statement from the National Strength and Conditioning Association. Journal of Strength and Conditioning Research, 33(8), 2019-2052.*
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003230>
- *Kosasih, R., Frisca, F., Santoso, A., Destra, E., Gunaidi, F., Jap, A., & Gracienne, G. (2025). Korelasi antara Kadar Insulin dalam Darah dengan Kekuatan Otot Tangan Kanan dan Kiri pada Kelompok Lanjut Usia. JURNAL RISET RUMPUN ILMU KESEHATAN.*
<https://doi.org/10.55606/jurrikes.v4i1.4881>
- *Mezzani, A. (2020). Cardiopulmonary Exercise Testing: Basics of Methodology and Interpretation. In Textbook of Sports and Exercise Cardiology (pp. 131-155). Springer.*
- *Mier, C. M., & Gibson, A. L. (2020). Evaluation of a treadmill progression for submaximal exercise testing. Measurement in Physical Education and Exercise Science, 24(1), 51-59.*
<https://doi.org/10.1080/1091367X.2019.1688863>
- *Torstveit, M. K., Fahrenholtz, I. L., Stenqvist, T. B., & Melin, A. K. (2023). The female athlete triad and relative energy deficiency in sport (RED-S): a call for a broader perspective. BMJ Open Sport & Exercise Medicine, 9(1), e001473.*
<http://dx.doi.org/10.1136/bmjsem-2022-001473>

- *Undheim, M. B., Cosgrave, C., King, E., Strike, S., Marshall, B., Falvey, É., & Franklyn-Miller, A. (2020). Isokinetic muscle strength and readiness to return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction: is there an association? A systematic review and a protocol recommendation. British Journal of Sports Medicine, 49(20), 1305-1310.*

GLOSARIUM

- ***1-Repetition Maximum (IRM)***: Beban maksimal yang dapat diangkat oleh seseorang dalam satu repetisi penuh dengan teknik yang benar; standar emas untuk pengukuran kekuatan otot dinamis.
- ***Adaptasi Kronis***: Perubahan fisiologis jangka panjang (struktural atau fungsional) yang terjadi sebagai respons terhadap paparan latihan yang berulang dan progresif (misalnya, hipertrofi otot, peningkatan densitas mitokondria).
- ***Aklimatisasi***: Proses adaptasi fisiologis terhadap stres lingkungan (seperti panas, dingin, atau ketinggian) yang meningkatkan toleransi organisme terhadap kondisi tersebut.
- ***Aktin***: Protein kontraktile utama yang membentuk filamen tipis dalam sarkomer otot rangka; memiliki situs pengikatan untuk miosin.
- ***Ambang Ventilasi (Ventilatory Threshold, VT)***: Titik infleksi selama latihan bertingkat di mana ventilasi paru meningkat secara tidak proporsional terhadap konsumsi oksigen, sering kali menandai peningkatan metabolisme anaerobik.
- ***Amenorea***: Kondisi tidak adanya menstruasi pada wanita usia reproduksi, sering dikaitkan dengan ketersediaan energi yang rendah pada atlet wanita (*Female Athlete Triad*).
- ***Anabolik***: Proses metabolisme yang berkaitan dengan sintesis molekul kompleks dari unit yang lebih sederhana, biasanya membutuhkan energi (misalnya, sintesis protein otot).
- ***Asam Lemak Bebas (Free Fatty Acids, FFA)***: Bentuk lipid yang dimobilisasi dari jaringan adiposa dan diangkut dalam darah (terikat albumin) untuk dioksidasi menjadi energi di otot.

- ***Asidosis Metabolik***: Kondisi penurunan pH darah atau jaringan di bawah nilai normal, sering disebabkan oleh akumulasi ion hidrogen selama glikolisis anaerobik intensif.
- ***Atrofi***: Penurunan ukuran atau massa jaringan tubuh, seperti pengecilan otot akibat imobilisasi, denervasi, atau penuaan (sarkopenia).
- ***Bioelectrical Impedance Analysis (BIA)***: Metode non-invasif untuk mengestimasi komposisi tubuh dengan mengukur resistensi (impedansi) tubuh terhadap arus listrik lemah; sangat dipengaruhi oleh status hidrasi.
- ***Bioenergetika***: Studi tentang aliran dan transformasi energi dalam sistem biologis, khususnya bagaimana makronutrien dikonversi menjadi ATP.
- ***Bradikardia***: Denyut jantung istirahat yang lebih lambat dari normal (<60 bpm); pada atlet ketahanan, ini sering merupakan adaptasi fisiologis normal ("jantung atlet").
- ***Cardiovascular Drift***: Fenomena peningkatan denyut jantung secara progresif selama latihan intensitas tetap yang berkepanjangan, biasanya disertai penurunan volume sekuncup akibat dehidrasi dan redistribusi volume darah.
- ***Curah Jantung (Cardiac Output, CO)***: Volume darah yang dipompa oleh jantung per menit, dihitung sebagai hasil kali denyut jantung dan volume sekuncup.
- ***Delayed Onset Muscle Soreness (DOMS)***: Nyeri otot yang muncul 24–72 jam setelah aktivitas fisik yang tidak biasa atau berat, terutama yang melibatkan kontraksi eksentrik; disebabkan oleh kerusakan mikrostruktural dan inflamasi.
- ***Difusi Gas***: Pergerakan pasif molekul gas (O₂ dan CO₂) melintasi membran alveolus-kapiler dari area bertekanan parsial tinggi ke rendah.
- ***Efek Bohr***: Penurunan afinitas hemoglobin terhadap oksigen sebagai respons terhadap penurunan pH dan peningkatan

konsentrasi CO₂, yang memfasilitasi pelepasan oksigen ke jaringan aktif.

- **Eksitasi-Kontraksi Coupling:** Urutan peristiwa fisiologis di mana potensial aksi listrik di sarkolema menyebabkan pelepasan kalsium dan memicu kontraksi mekanis otot.
- **EPOC (Excess Post-exercise Oxygen Consumption):** Peningkatan konsumsi oksigen di atas tingkat istirahat yang terjadi setelah latihan berakhir, digunakan untuk memulihkan homeostasis metabolik.
- **Female Athlete Triad:** Sindrom yang melibatkan tiga kondisi yang saling terkait: ketersediaan energi rendah, gangguan menstruasi (amenorea), dan penurunan kepadatan mineral tulang (osteoporosis).
- **Fosfagen (Sistem ATP-PCr):** Sistem energi anaerobik yang menyediakan ATP paling cepat untuk aktivitas intensitas tinggi durasi pendek (<10-15 detik) menggunakan fosfokreatin.
- **Glikogen:** Bentuk simpanan glukosa utama dalam tubuh hewan, tersimpan terutama di hati dan otot rangka.
- **Glikolisis:** Jalur metabolisme pemecahan glukosa menjadi piruvat (atau laktat) yang menghasilkan ATP; dapat berlangsung tanpa oksigen (anaerobik).
- **Golgi Tendon Organ (GTO):** Reseptor sensorik proprioseptif yang terletak di tendon otot, mendeteksi perubahan tegangan dan melindungi otot dari cedera melalui inhibisi autogenik.
- **Heat Stroke:** Kondisi kegawatdaruratan medis akibat kegagalan termoregulasi, ditandai dengan suhu inti tubuh >40°C dan disfungsi sistem saraf pusat.
- **Hipertrofi:** Peningkatan ukuran sel atau organ; dalam otot, merujuk pada pembesaran serabut otot akibat peningkatan sintesis protein kontraktil.

- **Hipotalamus:** Bagian otak yang berfungsi sebagai pusat integrasi utama untuk homeostasis, termasuk regulasi suhu tubuh, keseimbangan cairan, dan fungsi endokrin.
- **Homeostasis:** Pemeliharaan lingkungan internal tubuh yang relatif konstan dan stabil dalam menghadapi perubahan eksternal.
- **Hormon Pertumbuhan (Growth Hormone, GH):** Hormon anabolik yang dilepaskan oleh kelenjar hipofisis anterior, merangsang pertumbuhan jaringan, lipolisis, dan sintesis protein; pelepasannya meningkat tajam saat latihan intens dan tidur nyenyak.
- **Insulin:** Hormon anabolik yang disekresikan oleh pankreas yang menurunkan kadar glukosa darah dengan memfasilitasi penyerapannya ke dalam sel; kadarnya biasanya menurun selama latihan.
- **Katekolamin:** Hormon (epinefrin dan norepinefrin) yang dilepaskan oleh medula adrenal sebagai respons terhadap stres atau latihan, meningkatkan denyut jantung, metabolisme, dan kewaspadaan.
- **Kelelahan Saraf Pusat (Central Fatigue):** Penurunan kemampuan untuk menghasilkan gaya otot yang disebabkan oleh penurunan dorongan motorik dari otak atau sumsum tulang belakang.
- **Kortisol:** Hormon glukokortikoid yang dilepaskan sebagai respons terhadap stres; berfungsi memobilisasi bahan bakar (glukoneogenesis) dan menekan peradangan, tetapi dapat bersifat katabolik pada otot jika kadarnya tinggi secara kronis.
- **Laktat:** Produk akhir dari glikolisis anaerobik; dapat digunakan sebagai bahan bakar oleh jantung dan otot tipe I atau diubah kembali menjadi glukosa di hati (Siklus Cori).
- **Lipolisis:** Proses pemecahan trigliserida menjadi gliserol dan asam lemak bebas.

- **Mekanisme Frank-Starling:** Hukum jantung yang menyatakan bahwa kekuatan kontraksi ventrikel meningkat sebagai respons terhadap peningkatan volume pengisian (preload/peregangan) miokardium.
- **Miosin:** Protein motorik utama dalam filamen tebal otot, memiliki kepala yang berinteraksi dengan aktin untuk menghasilkan gaya (power stroke).
- **Muscle Spindle:** Reseptor sensorik di dalam perut otot yang mendeteksi perubahan panjang otot dan kecepatan perubahan tersebut, memicu refleks regang.
- **Oksidasi Beta:** Jalur metabolisme di mitokondria yang memecah asam lemak menjadi asetil-KoA untuk masuk ke siklus Krebs.
- **Overtraining Syndrome:** Kondisi maladaptif kronis yang ditandai dengan penurunan performa dan kelelahan persisten akibat ketidakseimbangan antara volume latihan yang berlebihan dan pemulihan yang tidak memadai.
- **Prinsip Ukuran (Size Principle):** Prinsip rekrutmen unit motorik di mana unit motorik kecil (tipe lambat) direkrut terlebih dahulu, diikuti oleh unit motorik yang lebih besar (tipe cepat) seiring meningkatnya kebutuhan gaya.
- **Proprioepsi:** Kemampuan tubuh untuk merasakan posisi, gerakan, dan keseimbangan bagian-bagian tubuhnya sendiri secara sadar maupun tidak sadar.
- **Rasio Pertukaran Pernapasan (Respiratory Exchange Ratio, RER):** Rasio antara volume CO₂ yang diproduksi dan O₂ yang dikonsumsi (VCO₂/VO₂); digunakan untuk mengestimasi substrat energi yang sedang dioksidasi.
- **Resistensi Insulin:** Kondisi di mana sel-sel tubuh menjadi kurang responsif terhadap hormon insulin, sering mendahului diabetes tipe 2; dapat diperbaiki dengan latihan fisik.
- **Sarkomer:** Unit fungsional terkecil dari kontraksi otot, dibatasi oleh dua garis Z.

- ***Siklus Cori***: Siklus metabolik di mana laktat yang diproduksi oleh otot diangkut ke hati, diubah menjadi glukosa, dan dikembalikan ke otot.
- ***Sintesis Protein Otot (MPS)***: Proses fisiologis pembentukan protein baru di dalam sel otot, yang merupakan dasar molekuler untuk perbaikan dan pertumbuhan otot.
- ***Steady State***: Kondisi fisiologis di mana variabel tubuh (seperti denyut jantung atau konsumsi oksigen) mencapai tingkat yang konstan dan seimbang dengan tuntutan aktivitas.
- ***Teori Pergeseran Filamen (Sliding Filament Theory)***: Teori yang menjelaskan mekanisme kontraksi otot melalui pergeseran filamen aktin dan miosin yang saling tumpang tindih tanpa perubahan panjang filamen itu sendiri.
- ***Unit Motorik***: Satu neuron motorik alfa dan seluruh serabut otot yang diinervasinya; merupakan unit terkecil yang dapat dikontrol oleh sistem saraf.
- ***Vasodilatasi***: Pelebaran pembuluh darah akibat relaksasi otot polos dinding pembuluh, yang meningkatkan aliran darah dan menurunkan tekanan darah.
- ***VO2 Max***: Volume oksigen maksimal yang dapat diambil, diangkut, dan digunakan oleh tubuh selama latihan maksimal; indikator utama kebugaran kardiorespirasi.

REFERENSI

- Abdillah, M., Hartoto, S., Ningsih, Y., Ardha, M., & Fathir, L. (2025). Sport massage Sebagai Solusi Cepat dalam Mengurangi Kelelahan Otot Setelah Aktivitas Fisik Intensitas Tinggi: Studi Literatur. *Jurnal Keolahragaan*.
<https://doi.org/10.25157/jkor.v11i2.21214>
- American College of Sports Medicine. (2021). *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription* (11th ed.). Wolters Kluwer.
- Battaglia, Y., Baciga, F., Bulighin, F., Amicone, M., Mosconi, G., Storari, A., Brugnano, R., Pozzato, M., Motta, D., D'Alessandro, C., Torino, C., Mallamaci, F., Cupisti, A., Aucella, F., & Capitanini, A. (2024). Physical activity and exercise in chronic kidney disease: consensus statements from the Physical Exercise Working Group of the Italian Society of Nephrology. *Journal of Nephrology*, 37, 1735–1765.
<https://doi.org/10.1007/s40620-024-02049-9>
- Bell, L., Ruddock, A., Maden-Wilkinson, T., Hembrough, D., & Rogerson, D. (2022). The effects of periodised and non-periodised resistance training on haemodynamic and hormonal responses in trained males. *Journal of Sports Sciences*, 40(2), 193-202. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1989539>
- Belval, L. N., Hosokawa, Y., Adams, W. M., Bragdon, E. E., Chiampas, G., Jardine, J., ... & Stearns, R. L. (2022). ACSM expert consensus statement: The diagnosis and management of exercise-associated muscle cramps. *Current Sports Medicine Reports*, 21(5), 170-181.
<https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000959>
- Bergman, H., Gutke, A., Andiné, P., Innocenti, A., Nilsson, T., Thomeé, R., & Wijk, H. (2025). Health care workers'

- experiences of exercise in forensic psychiatry: a qualitative focus group study. *International Journal of Qualitative Studies on Health and Well-being*, 20. <https://doi.org/10.1080/17482631.2025.2586877>
- Brooks, G. A. (2020). The lactate shuttle: the wisdom of the cell. *Journal of Cellular Physiology*, 235(9), 5914-5920.
- Burke, L. M. (2021). Ketogenic low-CHO, high-fat diet: the future of elite endurance sport?. *The Journal of Physiology*, 599(3), 819-843. <https://doi.org/10.1113/JP278928>
- Cendrawasih, J., 161, N., Sikambing, S., Sunggal, K., & Otot, K. (2025). Penerapan Terapi Range Of Motion (ROM) Pada Pasien Stroke Iskemik Di Wilayah Kerja UPT Puskesmas Medan Sunggal. *Jurnal Praba : Jurnal Rumpun Kesehatan Umum*. <https://doi.org/10.62027/praba.v3i3.548>
- Chalmers, G. (2017). Do Golgi tendon organs really inhibit muscle activity at high force levels to save muscles from injury? A different view of proprioception. *Journal of Exercise Science and Fitness*, 15(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2017.03.001>
- Cheng, A. J., & Place, N. (2022). The intricacies of excitation–contraction coupling and neuromuscular transmission in skeletal muscle fatigue. *Journal of Physiology*, 600(5), 1133-1147. <https://doi.org/10.1113/JP281987>
- Craddock, J., Sawyer-Simmons, P., Erickson, M., St. Laurent, P., & Sillevs, R. (2025). The Exercise Science Practice Model: A Framework for Integrating Critical Thinking, Reflective Practice, and Professional Reasoning in Exercise Science Education. *International Journal of Higher Education*. <https://doi.org/10.5430/ijhe.v14n6p14>
- Cunningham, C., & O’Sullivan, R. (2021). Healthcare Professionals’ Application and Integration of Physical Activity in Routine Practice with Older Adults: A Qualitative Study. *International*

- Journal of Environmental Research and Public Health*, 18.
<https://doi.org/10.3390/ijerph182111222>
- De Sire, A., & Taskiran, O. (2023). Physical Exercise in Sports Sciences and Rehabilitation: Physiology, Clinical Applications and Real Practice. *Applied Sciences*.
<https://doi.org/10.3390/app13084868>
- Dempsey, J. A., La Gerche, A., & Hull, J. H. (2020). The respiratory system in the elite endurance athlete: A potentially limiting factor for performance and health. *The Journal of Physiology*, 598(18), 3865-3881. <https://doi.org/10.1113/JP279311>
- di Prampero, P. E. (2023). Factors limiting maximal oxygen consumption in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 123(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-05047-8>
- Draper, N., Williams, C., & Marshall, H. (2024). *Exercise Physiology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003109280>
- Fadila, E., & Solihah, E. (2022). Literature Review Pengaruh Senam Lansia Terhadap Penurunan Tekanan Darah Pada Penderita Hipertensi. *Malahayati Nursing Journal*.
<https://doi.org/10.33024/mnj.v5i2.6032>
- Fragala, M. S., Cadore, E. L., Dorgo, S., Izquierdo, M., Kraemer, W. J., Peterson, M. D., & Ryan, E. D. (2019). Resistance training for older adults: Position statement from the National Strength and Conditioning Association. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(8), 2019-2052.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003230>
- Gagnon, D., & Crandall, C. G. (2022). The impact of exertional heat stress on the human brain. *Journal of Applied Physiology*, 133(2), 260-272.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00089.2022>
- Giménez, M., Mar-Solís, C., Olea-Serrano, F., & de la Torre-Luque, A. (2022). The effect of physical exercise on melatonin levels: a systematic review and meta-analysis. *Chronobiology*

- International*, 39(8), 1059-1070.
<https://doi.org/10.1080/07420528.2022.2084043>
- Goldfarb, I., Giladi, A., Barak, S., Lev, I., & Dor-Haim, H. (2025). Physical activity as clinical practice care for patients with type 2 diabetics and its implementation in routine clinical care: an expert opinion survey. *Frontiers in Endocrinology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fendo.2025.1518285>
- Guzman-Habinger, J., & Zambrano-Morales, I. (2025). Applying self-determination theory in clinical practice for successful long-term lifestyle change: lessons from a case report. *Archivos de la Sociedad Chilena de Medicina del Deporte*. <https://doi.org/10.59856/arch.soc.chil.med.deporte.v70i1.88>
- Hackney, A. C., & Aggelidis, X. P. (2022). Exercise and the cortisol response: A mini-review. *Current Opinion in Endocrine and Metabolic Research*, 25, 100344. <https://doi.org/10.1016/j.coemr.2022.100344>
- Havenith, G. (2021). Human thermoregulation in occupational and sports settings. *Comprehensive Physiology*, 11(2), 1649-1690. <https://doi.org/10.1002/cphy.c200021>
- Hearon, C. M., & Dinunno, F. A. (2021). Regulation of skeletal muscle blood flow during dynamic exercise in humans. *Comprehensive Physiology*, 11(2), 1761-1793. <https://doi.org/10.1002/cphy.c190035>
- Hearris, M. A., Hammond, K. M., Fell, J. M., & Morton, J. P. (2022). Regulation of muscle glycogen metabolism during exercise: Implications for endurance performance and training adaptations. *Nutrients*, 14(11), 2261. <https://doi.org/10.3390/nu14112261>
- Heckman, C. J., & Enoka, R. M. (2012). Motor unit. *Comprehensive Physiology*, 2(4), 2629-2682. <https://doi.org/10.1002/cphy.c100087>

- Hellsten, Y., & Nyberg, M. (2022). Cardiovascular adaptations to exercise training. *Comprehensive Physiology*, 12(3), 3465-3511. <https://doi.org/10.1002/cphy.c210019>
- Holdefer, R. N., & Cohen, L. G. (2021). Motor cortex physiology and plasticity. *Handbook of Clinical Neurology*, 184, 151-167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819410-2.00010-3>
- Ihalainen, J. K., Schumann, M., & Hynynen, E. (2022). Heart rate variability in the evaluation of recovery and training adaptation in athletes. *Current Sports Medicine Reports*, 21(5), 164-169. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000958>
- Impey, P., Hammond, K. M., Shepherd, S. O., Sharples, A. P., & Morton, J. P. (2020). Fuel for the work required: a practical approach to amalgamating train-low paradigms for endurance athletes. *Physiological reports*, 8(12), e14470. <https://doi.org/10.14814/phy2.14470>
- Ioannou, L. G., Tsoutsoubi, L., & Flouris, A. D. (2021). Human physiological responses to exercising in the heat and treatment of exertional heat stress. *Comprehensive Physiology*, 11(2), 1933-1976. <https://doi.org/10.1002/cphy.c190034>
- Izquierdo, M., De Souto Barreto, P., Arai, H., Bischoff-Ferrari, H., Cadore, E., Cesari, M., ... & Singh, M. (2024). Global consensus on optimal exercise recommendations for enhancing healthy longevity in older adults (ICFSR). *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.jnha.2024.100401>
- Jackman, R. W., & Kandarian, S. C. (2022). The molecular basis of skeletal muscle hypertrophy. *Biochemical Journal*, 479(2), 165-185. <https://doi.org/10.1042/BCJ20210492>
- Jamnick, N. A., Pettitt, R. W., Granata, C., & Bishop, D. J. (2020). An examination and critique of current methods to determine exercise intensity. *Sports Medicine*, 50(10), 1729-1756. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01322-8>

- Javdaneh, N., Siahkouhian, M., & Farhangi, M. A. (2022). Overtraining syndrome: a practical guide. *Minerva Endocrinology*, 48(2), 263-274. <https://doi.org/10.23736/S2724-6507.22.03666-4>
- Jones, H., Crozier, A., George, K., Miller, G., Whyte, G., Rycroft, J., Scott, A., Buckley, J., McGregor, G., Askew, C., Jack, S., Birkett, S., Broom, D., Tolfrey, K., Campbell, A., Skelton, D., Steenkamp, L., Savage, J., & Green, D. (2024). Establishment of clinical exercise physiology as a regulated healthcare profession in the UK: a progress report. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 10. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2024-002033>
- Jones, H., George, K., Scott, A., Buckley, J., Watson, P., Oxborough, D., Thijssen, D., Graves, L., Whyte, G., McGregor, G., Naylor, L., Rosenberg, M., Askew, C., & Green, D. (2021). Charter to establish clinical exercise physiology as a recognised allied health profession in the UK: a call to action. *BMJ Open Sport , Exercise Medicine*, 7. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2021-001158>
- Joyner, M. J., & Casey, D. P. (2021). Regulation of muscle blood flow during exercise. In *Skeletal Muscle Circulation* (pp. 411-455). Springer, Cham.
- Kenefick, R. W., & Cheuvront, S. N. (2023). Hydration for health and performance. *Annual Review of Nutrition*, 43, 337-355. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-062220-111155>
- Kosasih, R., Frisca, F., Santoso, A., Destra, E., Gunaidi, F., Jap, A., & Gracienne, G. (2025). Korelasi antara Kadar Insulin dalam Darah dengan Kekuatan Otot Tangan Kanan dan Kiri pada Kelompok Lanjut Usia. *JURNAL RISET RUMPUN ILMU KESEHATAN*. <https://doi.org/10.55606/jurrikes.v4i1.4881>
- Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2020). Endocrine responses and adaptations to strength and power training. In *Strength and Conditioning* (pp. 57-81). Routledge.

- La Gerche, A., & Baggish, A. L. (2021). The athletic heart—a contemporary review. *The Journal of Physiology*, 599(11), 2821-2839. <https://doi.org/10.1113/JP279313>
- Lederman, O., Llana, A., Murray, J., Stanton, R., Chugh, R., Haywood, D., Burdett, A., Warman, G., Walker, J., & Hart, N. (2025). Promises and perils of generative artificial intelligence: a narrative review informing its ethical and practical applications in clinical exercise physiology. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 17. <https://doi.org/10.1186/s13102-025-01182-7>
- Lim, C., Nunes, E. A., Currier, B. S., McLeod, J. C., & Phillips, S. M. (2022). An evidence-based narrative review of mechanisms of resistance exercise-induced human skeletal muscle hypertrophy. *Sports Medicine*, 52(7), 1557-1571. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01641-4>
- Lovering, A. T., Romer, L. M., & Haverkamp, H. C. (2022). The restrictive and obstructive lung diseases: Are they a potential limitation to exercise performance? *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 12(11), a041285. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a041285>
- Martini, T., Prasetyo, A., & Rudiana, R. (2025). PENGARUH LATIHAN SENAM AEROBIK TERHADAP PENINGKATAN KEBUGARAN JASMANI SISWA ASISTEN KEPERAWATAN. *VOCATIONAL: Jurnal Inovasi Pendidikan Kejuruan*. <https://doi.org/10.51878/vocational.v5i3.6856>
- Maunder, E., Plews, D. J., & Kilding, A. E. (2022). Context is key: The impact of exercise intensity and duration on the measurement of maximal fat oxidation. *Sports Medicine-Open*, 8(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00469-8>
- McSwiney, F. T., Doyle, L., & Plews, D. J. (2021). The effect of a ketogenic low carbohydrate, high fat diet on aerobic capacity and exercise performance in endurance athletes: a systematic

- review and meta-analysis. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 18(1), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12970-021-00481-6>
- Mezzani, A. (2020). Cardiopulmonary Exercise Testing: Basics of Methodology and Interpretation. In *Textbook of Sports and Exercise Cardiology* (pp. 131-155). Springer.
- Mier, C. M., & Gibson, A. L. (2020). Evaluation of a treadmill progression for submaximal exercise testing. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 24(1), 51-59. <https://doi.org/10.1080/1091367X.2019.1688863>
- Montero, D. (2021). The Frank-Starling mechanism and the cardiac response to exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 121(11), 2963-2972. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04772-8>
- Morton, R. W., Murphy, K. T., McKellar, S. R., Schoenfeld, B. J., Henselmans, M., Helms, E., ... & Phillips, S. M. (2020). A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the effect of protein supplementation on resistance training-induced gains in muscle mass and strength in healthy adults. *British journal of sports medicine*, 52(6), 376-384. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-097608>
- Mujika, I., & Sharma, A. P. (2020). Heat acclimation and athletic performance: A comprehensive review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(5), 603-614. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0129>
- Nguyen, T., Nguyen, V., & Kim, J. (2021). Physical Exercise and Health-Related Quality of Life in Office Workers: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18. <https://doi.org/10.3390/ijerph18073791>
- Nindyo, M., Roepajadi, J., Yuliasrid, D., & Fikri, M. (2025). Pengaruh Sport Massage terhadap Fleksibilitas Otot dan Ambang Nyeri Otot Hamstring pada Atlet Kabaddi Surabaya.

Mutiara Pendidikan dan Olahraga.
<https://doi.org/10.61132/mupeno.v2i3.273>

- O'Donnell, S., Beaven, C. M., & Driller, M. W. (2023). The effect of sleep manipulation on athletic performance, recovery, and physiology: a systematic review. *Sports Medicine*, 53(2), 487-506. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01777-3>
- Owens, D. J., Twist, C., Cobley, J. N., Howatson, G., & Close, G. L. (2019). Exercise-induced muscle damage: What is it, what causes it and what are the nutritional solutions?. *European Journal of Sport Science*, 19(1), 71-85.
- Ozemek, C. (2023). Creating the First Professional Doctor of Clinical Exercise Physiology Program and a Call to Expand the Model. *Journal of Clinical Exercise Physiology*. <https://doi.org/10.31189/2165-6193-12.1.1>
- Pangaribuan, R., Tarigan, A., Anggeria, E., Girsang, E., & Gea, S. (2025). Aktivitas fisik dan psikologis pada pasien chronic kidney disease yang menjalani hemodialisis: A literature review. *Holistik Jurnal Kesehatan*. <https://doi.org/10.33024/hjk.v19i7.1315>
- Plotkin, D. L., Roberts, M. D., Haun, C. T., & Schoenfeld, B. J. (2021). Muscle fiber type transitions with exercise training: Shifting perspectives. *Sports*, 9(9), 127. <https://doi.org/10.3390/sports9090127>
- Powers, S. K., Howley, E. T., & Quindry, J. C. (2021). *Exercise Physiology: Theory and Application to Fitness and Performance* (11th ed.). McGraw Hill.
- Pristya, I., Nurachmah, E., & Maria, R. (2025). Efek mobilisasi dini pada peningkatan fungsi fisik pasien post coronary artery bypass graft (CABG): A systematic literature review. *Holistik Jurnal Kesehatan*. <https://doi.org/10.33024/hjk.v19i1.791>
- Purdum, T., Kravitz, L., Dokladny, K., & Mermier, C. (2022). Understanding the factors that effect maximal fat oxidation.

- Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 19(1), 1-20. <https://doi.org/10.1080/15502783.2022.2064303>
- Putri, R., Nursasi, A., Sari, I., & Permatasari, H. (2025). Efektivitas program latihan fisik terstruktur dalam meningkatkan kualitas hidup pasien tuberkulosis: A systematic review. *Holistik Jurnal Kesehatan*. <https://doi.org/10.33024/hjk.v19i4.1012>
- Qiu, Y., Fernández-García, B., Lehmann, I., Li, G., Kroemer, G., López-Otín, C., & Xiao, J. (2022). Exercise sustains the hallmarks of health. *Journal of Sport and Health Science*, 12, 8–35. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2022.10.003>
- Rassier, D. E. (2022). The mechanics of the sarcomere: A story of molecular machines, their springs and the load they bear. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 172, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2022.02.001>
- Riachy, R., Khairallah, M., & Azar, S. T. (2020). The role of exercise in the aging man. *Journal of Clinical Medicine*, 9(5), 1589. <https://doi.org/10.3390/jcm9051589>
- Riemann, B. L., & Lephart, S. M. (2002). The sensorimotor system, part I: the physiologic basis of proprioception. *Journal of Athletic Training*, 37(1), 71–81.
- Sale, C., Elliott-Sale, K. J., & Dolan, E. (2021). The female athlete: A nutritional perspective. *The Journal of Sports Sciences*, 39(16), 1809-1824. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1912999>
- Saputra, R., Zulfikar, Z., & Fadhail, M. (2025). Edukasi perawatan fleksibilitas dan keseimbangan tubuh pada lansia di Posyandu Lansia, Way Sulan Tanjung Bintang. *JOURNAL OF Public Health Concerns*. <https://doi.org/10.56922/phc.v4i5.540>
- Sheel, A. W., Dominelli, P. B., & Molgat-Seon, Y. (2021). The respiratory system and exercise. In *The Routledge Handbook of Sport and Exercise Systems Genetics* (pp. 143-157). Routledge.
- Sitawati, A., Agustini, N., & Kusumaningtiyas, N. (2025). Pengaruh Latihan Static Stretching terhadap Penurunan Nyeri Otot Leher pada Petani Kakao di Desa Candikusuma Kecamatan Melaya.

- Sjøgaard, G., Mann, S., Jensen, J., Oestergaard, A., & Dalager, T. (2021). The elixir of muscle activity and kinesiology in a health perspective: Evidence of worksite tailored exercise training alleviating muscle disorders.. *Journal of electromyography and kinesiology : official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 61, 102600. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2021.102600>
- Škarabot, J., Brownstein, C. G., & Casolo, A. (2021). The role of neural adaptations in force-production with chronic resistance training. *International Journal of Sports Medicine*, 42(05), 387-397. <https://doi.org/10.1055/a-1288-5131>
- Smith, C. A., Ainsworth, D. M., & Henderson, K. S. (2023). Control of breathing during exercise. *Comprehensive Physiology*, 13(1), 1-52. <https://doi.org/10.1002/cphy.c220005>
- Stastny, P., Tufano, J. J., & Golas, A. (2021). Strengthening the case for damaging eccentric exercise to maximise muscle hypertrophy. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(6), 1735-1750. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003926>
- Swash, M., Czesnik, D., & de Carvalho, M. (2021). Muscle cramp: A clinical and physiological assessment. *Journal of the Neurological Sciences*, 429, 117624. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2021.117624>
- Taylor, J. L., Amann, M., Duchateau, J., Meeusen, R., & Rice, C. L. (2016). Neural contributions to muscle fatigue: from the brain to the muscle and back again. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(11), 2294–2306. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000923>
- Thomas, D. T., Erdman, K. A., & Burke, L. M. (2021). Position of the Academy of Nutrition and Dietetics, Dietitians of Canada, and the American College of Sports Medicine: Nutrition and

- athletic performance. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 116(3), 501-528.
- Tipton, M. J., & Costello, J. T. (2024). Human responses to exercise in cold environments. *Physiological Reviews*, 104(1), 321-365. <https://doi.org/10.1152/physrev.00009.2023>
- Torstveit, M. K., Fahrenholtz, I. L., Stenqvist, T. B., & Melin, A. K. (2023). The female athlete triad and relative energy deficiency in sport (RED-S): a call for a broader perspective. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 9(1), e001473. <http://dx.doi.org/10.1136/bmjsem-2022-001473>
- Undheim, M. B., Cosgrave, C., King, E., Strike, S., Marshall, B., Falvey, É., & Franklyn-Miller, A. (2020). Isokinetic muscle strength and readiness to return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction: is there an association? A systematic review and a protocol recommendation. *British Journal of Sports Medicine*, 49(20), 1305-1310.
- Vingren, J. L. (2022). The testosterone response to resistance exercise: a powerful but misunderstood phenomenon. *Sports Medicine*, 52(7), 1461-1470. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01642-3>
- Walzik, D., Joisten, N., Zacher, J., & Zimmer, P. (2021). Transferring clinically established immune inflammation markers into exercise physiology: focus on neutrophil-to-lymphocyte ratio, platelet-to-lymphocyte ratio and systemic immune-inflammation index. *European Journal of Applied Physiology*, 121, 1803–1814. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04668-7>
- Wang, C., Zhang, P., Zhu, Y., Li, J., Yang, Y., Tan, X., Yang, L., Zeng, L., & Huang, W. (2025). A theoretical model of sports and health integration to promote active health. *BMC Public Health*, 25. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-22237-x>
- Yankee, E., Brown, B., Pelobello, S., Rogstad, D., Wilson, C., Martinez, J., Blood, A., Angeles, D., Mock, A., & Wilson, S. (2025). Enhancing exercise curriculum in medical training at

Loma Linda University School of Medicine. *Frontiers in Education*. <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1660929>

Yankee, E., Brown, B., Pelobello, S., Wilson, C., Angeles, D., Martinez, J., Blood, A., Rogstad, D., Mock, A., & Wilson, S. (2025). Medical Exercise Physiology at Loma Linda University School of Medicine. *Physiology*. <https://doi.org/10.1152/physiol.2025.40.s1.1795>

Zariyah, H., & Pramono, A. (2025). SINTESIS SENYAWA METABOLIT OLEH MIKROBIOTA SALURAN CERNA DAN METABOLIC DYSFUNCTION-ASSOCIATED STEATOTIC LIVER DISEASE (MASLD): TINJAUAN PADA SCFA DAN BCAA. *Journal of Nutrition College*. <https://doi.org/10.14710/jnc.v14i2.48176>



FISIOLOGI OLAHRAGA TERAPAN

INTEGRASI TEORI DAN KLINIS UNTUK TENAGA KESEHATAN

Buku ajar "Fisiologi Olahraga Terapan: Integrasi Teori dan Klinis untuk Tenaga Kesehatan" ini disusun sebagai respons terhadap kebutuhan mendesak akan sumber daya pendidikan yang menjembatani ilmu fisiologi olahraga fundamental dengan aplikasi praktisnya di lingkungan klinis. Perkembangan ilmu kesehatan menuntut para praktisi, termasuk dokter, fisioterapis, perawat, dan ahli gizi, untuk tidak hanya memahami patofisiologi penyakit, tetapi juga menguasai mekanisme respons tubuh terhadap intervensi nonfarmakologis seperti latihan fisik. Latihan fisik telah diakui sebagai salah satu pilar utama dalam pencegahan, terapi, dan rehabilitasi berbagai kondisi kronis. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai adaptasi fisiologis yang terjadi akibat aktivitas fisik menjadi sebuah kompetensi esensial. Tujuan utama dari penulisan buku ini adalah untuk menyediakan panduan yang komprehensif, berbasis bukti, dan terstruktur bagi mahasiswa serta tenaga kesehatan profesional. Materi yang disajikan dirancang untuk mengubah cara pandang terhadap latihan, dari sekadar aktivitas rekreasi menjadi sebuah modalitas terapeutik yang presisi. Dengan mengintegrasikan konsep-konsep teoretis mulai dari bioenergetika seluler hingga respons sistemik kardiovaskular dan endokrin, buku ini bertujuan membekali pembaca dengan landasan ilmiah yang kuat untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi program latihan yang aman dan efektif bagi beragam populasi pasien. Urgensi penguasaan materi ini semakin meningkat seiring dengan pergeseran paradigma kesehatan global yang lebih berfokus pada pendekatan preventif dan manajemen gaya hidup.



Binarmedia
Berkarya Tanpa Batas



PENERBIT BINAR MEDIA PRATAMA
TloHob Kidul RT 03 RW 02, Kecamatan Karangreja,
Kabupaten Purbalingga, Provinsi Jawa Tengah
Telp: 0877-9021-9262

binarmedia@pratama.id
[binar media pratama](#)
[binar media pratama](#)

