

Peran Adaptasi Fisiologis terhadap Latihan Intensitas Tinggi (*High-Intensity Training*) dalam Optimalisasi Performa Atletik: Tinjauan Literatur

The Role of Physiological Adaptation to High-Intensity Training in Optimizing Athletic Performance: Systematic Literature Review

Dwi Widyawati¹; Ghea Farmaning Thias Putri²; Dilia Ananda Pratiwi³; Ayu Tiara Fitri⁴; Andriansyah⁵

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa^{1,2}; Stikes Bhakti Husada Cikarang³; Universitas Lampung^{4,5}

Corresponding email: dwi.widyawati@untirta.ac.id

Abstract

High-intensity training methods, such as *High-Intensity Interval Training* (HIIT) and *Sprint Interval Training* (SIT), have become increasingly popular as effective strategies for enhancing athletic performance through significant physiological adaptations. This review employs a narrative analysis of recent scientific literature (2015-2025) to examine the body's adaptation mechanisms to high-intensity training, including improvements in aerobic capacity (VO_{2max}), metabolic efficiency, lactate buffering, and mitochondrial function. The findings indicate that both HIIT and SIT can enhance cardiovascular and neuromuscular performance within relatively short training periods, particularly when tailored to individual needs. However, the body's adaptive responses vary and can be influenced by factors such as baseline fitness, age, and metabolic conditions. Therefore, evidence-based and personalized approaches are essential for optimizing training outcomes. These insights provide valuable guidance for coaches, exercise physiologists, and fitness professionals in developing targeted interventions to achieve peak physical performance.

Keywords: *High-Intensity Interval Training*, *Sprint Interval Training*, physiological adaptation, VO_{2max} , mitochondrial function.

Abstrak

Metode pelatihan intensitas tinggi, seperti *High-Intensity Interval Training* (HIIT) dan *Sprint Interval Training* (SIT), telah menjadi semakin populer sebagai strategi efektif untuk meningkatkan kinerja atletik melalui adaptasi fisiologis yang signifikan. Tinjauan ini menggunakan analisis naratif dari literatur ilmiah terbaru (2015-2025) untuk memeriksa mekanisme adaptasi tubuh terhadap pelatihan intensitas tinggi, termasuk peningkatan kapasitas aerobik (VO_{2max}), efisiensi metabolik, penyangga laktat, dan fungsi mitokondria. Temuan menunjukkan bahwa baik HIIT maupun SIT dapat meningkatkan kinerja kardiovaskular dan neuromuskular dalam periode pelatihan yang relatif singkat, terutama ketika disesuaikan dengan kebutuhan individu. Namun, respons adaptif tubuh bervariasi dan dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kebugaran dasar, usia, dan kondisi metabolik. Oleh karena itu, pendekatan berbasis bukti dan yang dipersonalisasi sangat penting untuk mengoptimalkan hasil pelatihan. Wawasan ini memberikan panduan berharga bagi pelatih, fisiolog olahraga, dan profesional kebugaran dalam mengembangkan intervensi yang ditargetkan untuk mencapai kinerja fisik puncak.

Kata kunci: pelatihan interval intensitas tinggi, pelatihan interval sprint, adaptasi fisiologis, VO_{2max} , fungsi mitokondria.

INTRODUCTION

Latihan intensitas tinggi (*High-Intensity Training* atau HIIT) telah menjadi metode utama dalam pengembangan performa atletik secara global (Hung et al., 2025; Yue et al., 2025; K. Zhang et al., 2022)

Berbagai studi internasional menunjukkan bahwa HIIT mampu memicu adaptasi fisiologis signifikan, seperti peningkatan kapasitas aerobik, efisiensi metabolik dan kekuatan otot, hal ini memperlihatkan bahwa adaptasi fisiologis memainkan peran kunci dalam optimalisasi performa atletik (Mølmen et al., 2025). Di tengah tuntutan kompetisi olahraga modern yang semakin tinggi, pemahaman terhadap mekanisme adaptasi ini menjadi kunci dalam merancang program latihan yang efektif dan efisien.

Penerapan HIIT di Indonesia mulai mendapat perhatian di kalangan pelatih dan atlet, khususnya dalam cabang olahraga yang membutuhkan kombinasi kekuatan dan daya tahan tinggi (Yudhistira et al., 2021). Namun, penelitian yang menelaah respons fisiologis atlet Indonesia terhadap latihan intensitas tinggi masih relatif terbatas; sebagai contoh, kajian terbaru baru mulai mengeksplorasi efek HIIT terhadap peningkatan $VO_2\text{max}$ pada atlet bulutangkis (Maharani et al., 2025), sementara pemahaman yang lebih luas mengenai aspek fisiologis dan biomolekuler masih jarang ditemukan (Diahputri & Sundari, 2022). Secara lokal, studi awal di Jakarta mengindikasikan bahwa atlet di klub olahraga lokal mengalami peningkatan performa yang bervariasi setelah mengikuti program latihan HIIT selama 8 minggu. Perbedaan adaptasi fisiologis dipengaruhi oleh faktor-faktor individu seperti usia, status gizi, dan tingkat kebugaran awal. Hal ini sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian terbaru yang menggabungkan *small-side games* dan *speed-endurance training* untuk memantau respons fisiologis melalui detak jantung dan tingkat kelelahan yang dirasakan (Bharlaman et al., 2024). Oleh karena itu, kajian mendalam mengenai peran adaptasi fisiologis terhadap latihan intensitas tinggi sangat diperlukan guna memberikan rekomendasi latihan yang sesuai dan dapat meningkatkan performa atletik secara signifikan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengulas tinjauan literatur terkini mengenai adaptasi fisiologis akibat latihan intensitas tinggi dan implikasinya terhadap optimalisasi performa atletik. Dengan memahami berbagai mekanisme adaptasi, diharapkan hasil tinjauan ini dapat menjadi landasan ilmiah bagi pelatih, atlet, dan praktisi olahraga dalam merancang program latihan yang lebih efektif dan berbasis bukti.

METHODS

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan pustaka sistematis dengan mengacu pada kerangka PICO untuk memastikan proses pemilihan dan sintesis studi dilakukan secara terstruktur. Sumber data utama berasal dari artikel ilmiah yang telah melalui proses peer-review dan diperoleh melalui PubMed, Scopus, serta Google Scholar, dengan bantuan CrossRef dan aplikasi Publish or Perish sebagai alat pencarian tambahan. Pencarian literatur dilakukan pada tanggal 15-20 Juni 2025. Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci dan operator Boolean sebagai berikut:

("High-Intensity Interval Training" OR HIIT OR "Sprint Interval Training" OR SIT) AND ("Physiological Adaptation" OR "Physiological Responses" OR VO₂max OR "Mitochondrial Function") AND ("Athletic Performance" OR "Sports Performance" OR "Elite Athletes")

Kriteria inklusi meliputi artikel berbahasa Inggris atau Indonesia, diterbitkan pada periode 2015-2025, serta berupa penelitian eksperimental, tinjauan sistematis, atau meta-analysis yang membahas adaptasi fisiologis pada populasi aktif secara fisik. Artikel dari sumber *non-peer reviewed* (misalnya editorial, komentar, abstrak konferensi, tesis) atau yang melibatkan populasi sedentari/klinis dikeluarkan. Proses identifikasi artikel mengikuti pedoman PRISMA. Total 1.126 artikel diperoleh dari pencarian awal. Seluruh artikel yang terkumpul kemudian digabungkan dalam aplikasi *Mendeley*. Proses deduplikasi dilakukan secara otomatis menggunakan fitur *duplicate removal* pada *Mendeley*,

kemudian diverifikasi kembali secara manual untuk memastikan tidak ada artikel duplikat yang tersisa. Tahap seleksi dilakukan berlapis: (1) penyaringan judul dan abstrak, (2) telaah teks penuh berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, serta (3) penentuan akhir studi yang diikuti. Setelah penyaringan, 12 artikel memenuhi kriteria dan dianalisis lebih lanjut. Analisis data dilakukan dengan pendekatan *thematic coding* untuk mengidentifikasi variabel adaptasi fisiologis yang sering muncul, seperti VO₂max, efisiensi metabolik, dan kemampuan penyangga laktat. Selanjutnya, dilakukan sintesis naratif untuk menafsirkan temuan dan menghubungkannya dengan optimalisasi performa atletik. Meskipun pencarian awal dilakukan berdasarkan tema, hasil studi yang diperoleh kemudian diorganisasi kembali menggunakan kerangka PICO untuk memperjelas pemetaan intervensi dan luaran penelitian (lihat Tabel 1).

Tabel 1. Metode PICO

Komponen	Deskripsi
P (Population)	Atlet, pelatih olahraga, atau individu yang aktif secara fisik (usia 15–45 tahun), baik laki-laki maupun perempuan, yang terlibat dalam program latihan fisik terstruktur.
I (Intervention)	Latihan Intensitas Tinggi (High-Intensity Training / HIT), termasuk <i>High-Intensity Interval Training</i> (HIIT) dan <i>Sprint Interval Training</i> (SIT), dilakukan ≥ 2 sesi/minggu selama minimal 4 minggu.
C (Comparison)	Latihan intensitas sedang tradisional (misalnya, latihan aerobik kontinu) atau kondisi awal sebelum intervensi (<i>pre-intervention baseline</i>).
O (Outcome)	Adaptasi fisiologis: peningkatan VO ₂ max, fungsi mitokondria, efisiensi metabolik, ambang laktat, dan performa atletik secara keseluruhan.

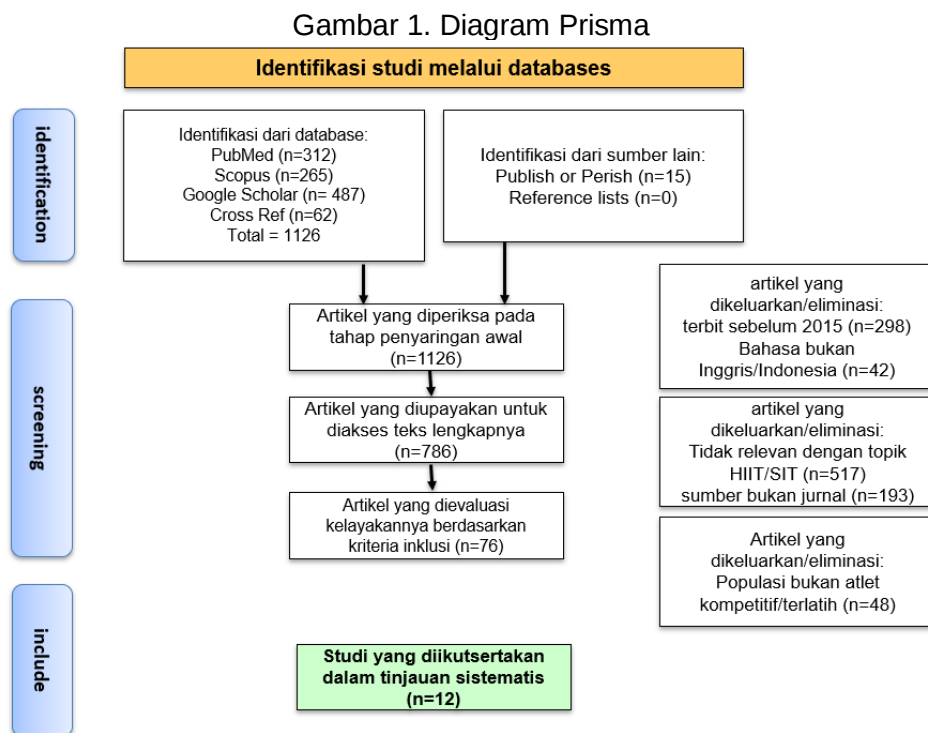
Selanjutnya, kriteria inklusi dan eksklusi yang jelas diterapkan untuk memastikan ketepatan dan relevansi hasil pencarian. Rincian kriteria inklusi dan eksklusi ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Jenis Kriteria	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Jenis Publikasi	Artikel jurnal yang telah melalui <i>peer-review</i> , penelitian eksperimental, tinjauan sistematis, dan <i>meta-analyses</i> .	Sumber yang tidak melalui <i>peer-review</i> , editorial, surat kepada editor, komentar, dan abstrak konferensi.
Bahasa	Artikel berbahasa Inggris atau Indonesia.	Artikel dalam bahasa selain Inggris atau Indonesia.
Tahun Publikasi	Diterbitkan antara tahun 2015 hingga 2025.	Diterbitkan sebelum tahun 2015.
Populasi	Penelitian yang melibatkan atlet, pelatih, atau individu yang aktif secara fisik.	Penelitian yang berfokus pada individu dengan gaya hidup sedentari atau populasi klinis yang tidak terkait dengan performa olahraga.
Intervensi	Latihan intensitas tinggi (termasuk protokol HIIT dan SIT).	Bentuk latihan lain yang tidak terkait dengan protokol latihan intensitas tinggi.

Procedure and Data Analysis

Proses identifikasi, seleksi, dan inklusi artikel dilakukan secara bertahap mengikuti pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis* (PRISMA). Diagram PRISMA digunakan untuk menggambarkan secara visual alur pencarian dan seleksi artikel mulai dari tahap identifikasi awal hingga studi akhir yang diikutsertakan dalam sintesis dengan tujuan meningkatkan transparansi, memperjelas tahapan eksklusi, serta memudahkan pembaca memahami proses penyaringan studi yang memenuhi kriteria inklusi. Diagram ini merupakan komponen penting dalam pedoman pelaporan tinjauan sistematis dan menyajikan keputusan inklusi maupun eksklusi secara ringkas, jelas, dan efisien (Selcuk, 2019).



Ket: diadopsi dari Selcuk et al.,(2019)

RESULTS

Proses seleksi artikel dilakukan secara bertahap mengikuti panduan PRISMA, dimulai dari pencarian awal di berbagai basis data hingga tahap akhir inklusi. Artikel yang ditemukan kemudian disaring menggunakan kriteria yang telah ditentukan, mencakup tahun terbit, bahasa, jenis populasi, serta fokus pada variabel fisiologis. Setelah pemeriksaan judul, abstrak, dan telaah teks lengkap, hanya penelitian yang relevan dan memenuhi standar metodologis yang dimasukkan dalam analisis. Dari proses tersebut, terkumpul 12 studi yang memenuhi kriteria dan disajikan pada Tabel 3. Penelitian-penelitian ini melibatkan beragam kelompok, mulai dari atlet elite dan kompetitif hingga individu terlatih non-elite dan rekreasional.

Pada kelompok atlet elite, sejumlah studi menunjukkan peningkatan nyata pada kapasitas aerobik dan daya tahan setelah mengikuti program latihan intensitas tinggi. Misalnya, protokol HIIT 4×4 menit pada 90-95% HRmax meningkatkan $VO_2\text{max}$ antara 4-10% (Wiesinger et al., 2024), sedangkan SIT 6×30 detik *all-out* disertai istirahat 4 menit mampu memperbaiki $VO_2\text{max}$ dan kapasitas anaerob (Yuan et al., 2024). Program HIIT sprint berulang juga terbukti memperbesar kapilarisasi otot, meningkatkan $VO_2\text{max}$, dan memperkuat performa ketahanan (Bishop et al., 2019). Adaptasi lain yang tercatat mencakup peningkatan kelincahan, kemampuan sprint berulang, serta lompatan vertikal pada atlet tim putri setelah HIIT linear maupun *change-of-direction* (Stanković et al., 2024) dan peningkatan kekuatan tungkai serta daya eksplosif pada pemain basket putri melalui berbagai tipe HIIT (Čaprić et al., 2025).

Pada populasi terlatih non-elite, HIIT juga menunjukkan hasil positif meskipun peningkatannya cenderung lebih kecil dibandingkan atlet elite. Latihan ini dapat meningkatkan $VO_2\text{max}$ secara signifikan, terutama pada individu dengan tingkat kebugaran awal yang lebih rendah (Milanović et al., 2015). Selain itu, tinjauan sistematis terbaru melaporkan bahwa HIIT atau *Sprint Interval Training* (SIT) secara konsisten meningkatkan lompatan vertikal dan kapasitas aerobik pada atlet, termasuk dalam cabang olahraga seperti bola basket (X. Wang et al., 2025). Penelitian eksperimental juga menunjukkan bahwa kombinasi HIIT dan pelatihan plyometrik selama sepuluh minggu secara signifikan meningkatkan lompatan eksplosif pada pemain sepak bola usia di bawah 17 tahun (Laidi et al., 2025). Studi lain melaporkan bahwa penerapan HIIT dengan periodisasi intensitas dan volume efektif untuk memperbaiki $VO_2\text{max}$ serta ketahanan bersepeda pada pesepeda terlatih (Galán-Rioja et al., 2023). Sementara itu, penelitian pada populasi rekreasional dan individu aktif juga memperlihatkan respons adaptasi yang positif. Beberapa manfaat yang ditemukan antara lain peningkatan waktu hingga kelelahan dan efisiensi energi (Soslu et al., 2023), perbaikan $VO_2\text{max}$ dan daya tahan setelah delapan minggu HIIT (García-Pinillos et al., 2017), peningkatan ketebalan otot vastus lateralis serta kapasitas aerobik (Evangelista et al., 2025) dan perbaikan ekonomi berlari serta efisiensi biomekanik (Benhammou et al., 2025). Secara umum, hasil sintesis ini memperkuat bukti

bahwa HIIT dan SIT memberikan manfaat fisiologis yang signifikan pada berbagai kelompok populasi, meskipun besarnya perubahan dipengaruhi oleh tingkat kebugaran awal, jenis cabang olahraga, dan rancangan program latihan yang digunakan.

Tabel 3. Ringkasan Studi yang diikutsertakan dalam Tinjauan Literatur

No	Penulis & Tahun	Populasi / Olahraga	Protokol Latihan (HIIT/SIT)	Durasi Program	Variabel Utama	Hasil Utama	Desain Studi	Tingkat bukti (OCEBM 2011)	Telaah kritis (ringkas)
1	(Wiesinger et al., 2024)	Atlet ketahanan elite	HIIT 4×4 menit 90–95% HRmax	6-8 minggu	VO ₂ max, performa	↑VO ₂ max x 4-10%, ↑performa ketahanan	RCT	Level 1a	Randomisasi mengurangi bias seleksi; perlu cek blinding & attrition
2	(Yuan et al., 2024)	Atlet beregu putra	SIT 6×30 detik all-out, istirahat 4 menit	4-6 minggu	VO ₂ max, kapasitas anaerob	↑ VO ₂ max (ES 0,19–0,74), ↑ kapasitas anaerob	RCT	Level 1b	Kuat secara internal, perhatikan ukuran sampel
3	(Milanović et al., 2015)	Terlatih & non-elite	HIIT berbagai protokol vs latihan kontinu	≥ 4 minggu	VO ₂ max	↑ VO ₂ max (~5,5 mL/kg/menit), efek lebih besar pada kebugaran rendah	Systematic review & MA	Level 4	Bukti tertinggi; dipengaruhi heterogenitas studi
4	(Bishop et al., 2019)	Atlet elite ketahanan	HIIT sprint berulang (60–90% VO ₂ peak)	6 minggu	Kapilarisasi, VO ₂ max	↑ kapilarisasi otot, ↑ VO ₂ max, ↑ endurance	Pre–post	Level 1b	Tanpa kontrol eksternal; risiko bias maturasi
5	(Stanković et al., 2023)	Atlet tim olahraga putri	HIIT linear vs change-of-direction	4-6 minggu	VO ₂ max, agility	↑ VO ₂ max, ↑ agility, ↑ repeated sprint ability (RSA), ↑ lompatan vertikal	RCT	Level 1a	Desain kuat; populasi spesifik membatasi generalisasi
6	(Čaprić et al., 2025)	Pemain basket putri	HIIT tipe beragam (running-based & sport-specific)	6-8 minggu	VO ₂ max, kekuatan otot	↑ VO ₂ max, ↑ kekuatan tungkai, ↑ daya eksplosif	Systematic review	Level 1a	Bukti tinggi; dipengaruhi kualitas studi primer

7	(Eather et al., 2024)	Atlet Netball	Sesi HIIT spesifik netball (interval + drill olahraga)	Beberapa minggu	Kekuatan eksplosif, kelincahan, kapasitas daya tahan	Peningkatan kekuatan eksplosif, kelincahan, dan kapasitas daya tahan	RCT	Level 1b	Internal valid, tapi ukuran sampel kecil
8	(Galán-Rioja et al., 2023)	Pesepeda terlatih	HIIT dengan periodisasi intensitas dan volume	≥ 6 minggu	VO ₂ max, performa ketahanan	↑ VO ₂ max, ↑ daya tahan bersepeda	Systematic review	Level 1a	Meta-review; heterogenitas intervensi jadi keterbatasan
9	(Zhang et al., 2024)	Atlet judo	HIIT rasio kerja-istirahat 2:1 vs. 3:1	6 minggu	Agility, sprint, VO ₂ max	Rasio 3:1 lebih efektif meningkatkan kapasitas anaerobik dan performa motorik	RCT	Level 1b	RCT kuat; terbatas pada populasi judo mahasiswa
10	(Pérez-Castilla et al., 2023)	Atlet rekreasi	HIIT 8 minggu	8 minggu	VO ₂ max, daya tahan	↑ VO ₂ max, ↑ daya tahan	Pre-post	Level 4	Tanpa kelompok kontrol; risiko bias latihan mandiri
11	(Evangeliou et al., 2025)	Individu aktif muda	WB-HIIT 30" all-out / 10" istirahat (dua protokol berbeda)	6 minggu	Ketebalan otot, VO ₂ max	↑ ketebalan otot vastus lateralis, ↑ VO ₂ max ↑ daya tahan otot	RCT	Level 1b	RCT dengan validitas internal baik
12	(Llanos-Lago et al., 2024)	Pelari menengah dan jarak jauh	Pelari menengah/jarak jauh	bervariasi	Running economy (efisiensi biomekanik)	Program kekuatan intensitas tinggi dan plyometric meningkatkan efisiensi lari secara signifikan	Systematic review & MA	Level 1a	Bukti tertinggi; terbatas oleh kualitas studi primer

Studi-studi yang dirangkum pada tabel 3 menunjukkan bahwa HIIT dan SIT secara konsisten menghasilkan adaptasi fisiologis yang signifikan pada berbagai kategori populasi. Pada kelompok atlet elite dan kompetitif, peningkatan VO_2max menjadi temuan yang paling menonjol, misalnya mencapai 4-10% setelah 6-8 minggu HIIT 4×4 menit pada 90-95% HRmax (Wiesinger et al., 2024) atau melalui protokol SIT 6×30 detik *all-out* dengan istirahat 4 menit (Yuan et al., 2024). Penelitian lain melaporkan peningkatan kapilarisasi otot (Li et al., 2020), kelincahan dan *repeated sprint ability* (Stankovic et al., 2023), serta kekuatan tungkai dan daya eksplosif (Čaprić et al., 2025). Adaptasi tersebut terbukti mendukung performa pada cabang olahraga berbasis daya tahan seperti bersepeda dan lari jarak jauh, maupun olahraga tim yang memadukan tuntutan aerobik dan anaerob secara bersamaan. Selain itu, individu terlatih non-elite serta populasi rekreasional juga menunjukkan respons adaptasi yang positif terhadap latihan intensitas tinggi, meskipun peningkatannya cenderung sedikit lebih rendah dibandingkan atlet elite. Manfaat yang sering dilaporkan meliputi peningkatan VO_2max (Milanović et al., 2015); (Pérez-Castilla et al., 2023), peningkatan efisiensi energi/metabolisme (Tian et al., 2021), serta peningkatan performa anaerobik seperti kecepatan sprint dan kemampuan eksplosif otot (Hall et al., 2023). Sejumlah studi juga menyoroti penerapan HIIT di luar konteks kompetisi, seperti pemeliharaan kebugaran selama jeda musim (Galán-Rioja et al., 2023), dukungan terhadap pemulihan, dan integrasi dalam program latihan kekuatan (Evangelista et al., 2025). Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa baik atlet elite maupun non-elite dapat memperoleh manfaat fisiologis yang signifikan melalui protokol HIIT atau SIT yang terstruktur dengan baik.

DISCUSSION

Ringkasan Adaptasi Fisiologis terhadap HIIT/SIT

Hasil telaah literatur menunjukkan adanya pola adaptasi fisiologis yang konsisten akibat penerapan HIIT dan SIT pada atlet terlatih. Adaptasi tersebut mencakup sistem kardiovaskular, metabolik, neuromuskular, hormonal, hingga aspek kognitif. Ringkasan menyeluruh dari temuan tersebut ditampilkan pada Tabel 4, yang merangkum mekanisme utama serta implikasinya terhadap peningkatan performa.

Tabel 4. Ringkasan Adaptasi Fisiologis terhadap HIIT/SIT pada Atlet Terlatih

Aspek Adaptasi	Mekanisme Utama	Temuan Utama (Literatur)	Implikasi untuk Performa Atlet
Kardiovaskular	↑Strokevolume ↑kapilarisasi otot, ↑ efisiensi transportasi O_2	Wiesinger et al. (2024); Seiler & Stöggl (2022)	Meningkatkan VO_2max dan daya tahan aerobik
Metabolik	↑ Biogenesis mitokondria, ↑ enzim oksidatif (CS, SDH), ↑ pemanfaatan lemak	MacInnis et al. (2023); Slimani et al. (2023)	Memperbaiki efisiensi energi dan mempercepat pemulihan

Neuromuskular	Rekrutmen unit motorik cepat (FT), ↑ kekuatan eksplosif dan power	Hung, Su, & Wang (2025); Pratama et al. (2021)	Penting untuk cabang olahraga eksplosif (<i>sprint</i> , lompat, permainan cepat)
Buffering capacity	↑ Toleransi terhadap akumulasi laktat & H ⁺ , ↑ pH regulation	García-Pinillos et al. (2022); Milanović et al. (2015)	Memperpanjang kemampuan melakukan kerja intensitas tinggi berulang
Adaptasi hormonal	↑ Testosteron, GH, sensitivitas insulin, ↓ kortisol kronis	Stanković et al. (2023); Yuan et al. (2024)	Mendukung hipertrofi otot, pemulihan energi, dan adaptasi metabolik
Kognitif & Psikologis	↑ Kontrol inhibisi, ↑ memori kerja, ↑ focus	Yue (2025)	Mendukung konsentrasi dan pengambilan keputusan dalam pertandingan

Tabel 4 merangkum bahwa adaptasi fisiologis akibat latihan intensitas tinggi, baik HIIT maupun SIT, bersifat multidimensional. Adaptasi ini mencakup sistem kardiovaskular, metabolik, neuromuskular, hormonal, serta aspek kognitif. Peningkatan VO₂max melalui adaptasi kardiovaskular, misalnya, telah dilaporkan secara konsisten dalam berbagai penelitian (Wiesinger et al., 2024; Seiler & Stöggl, 2022) dan menjadi dasar utama peningkatan kapasitas aerobik atlet. Dari sisi metabolik, HIIT terbukti meningkatkan biogenesis mitokondria dan aktivitas enzim oksidatif, yang mendukung efisiensi pemanfaatan energi (Slimani et al., 2023; MacInnis et al., 2023). Adaptasi neuromuskular, seperti rekrutmen serat otot tipe cepat, berkontribusi pada peningkatan kekuatan eksplosif yang penting dalam cabang olahraga berbasis kecepatan dan power (Hung, Su, & Wang, 2025; Pratama et al., 2021). Selain itu, kemampuan buffering terhadap akumulasi laktat juga meningkat, sehingga atlet lebih mampu mempertahankan performa pada aktivitas intensitas tinggi yang berulang (García-Pinillos et al., 2022; Milanović et al., 2015). Perubahan hormonal yang menguntungkan, seperti peningkatan testosteron dan sensitivitas insulin (Stanković et al., 2023; Yuan et al., 2024), turut mendukung pemulihan dan adaptasi jangka panjang.

Literatur terbaru juga menunjukkan adanya manfaat kognitif, termasuk peningkatan kontrol inhibisi dan memori kerja, yang berperan penting dalam pengambilan keputusan saat bertanding (Yue, 2025). Dengan demikian, data yang tersaji pada tabel menunjukkan bahwa HIIT tidak hanya memberikan efek fisiologis spesifik pada satu sistem tubuh, melainkan menghasilkan adaptasi komprehensif yang berkontribusi terhadap optimalisasi performa atletik secara menyeluruh. Pada bagian berikut, akan dibahas secara terperinci adaptasi yang terjadi pada masing-masing sistem fisiologis, dimulai dari adaptasi kardiovaskular.

Efektivitas HIIT dalam Meningkatkan Performa Fisik Atletik

Latihan interval intensitas tinggi (HIIT) kini menjadi sorotan utama dalam dunia olahraga karena keampuhannya dalam meningkatkan performa fisik, baik dari segi kapasitas aerobik

maupun anaerobik. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa metode latihan ini secara efektif mampu meningkatkan $VO_2\text{max}$, mengoptimalkan efisiensi energi, menambah kekuatan otot, dan meningkatkan toleransi tubuh terhadap penumpukan laktat. Manfaat komprehensif ini menjadikan HIIT sebagai strategi latihan yang sangat relevan untuk para atlet di berbagai cabang olahraga. Peningkatan signifikan pada $VO_2\text{max}$, yang dilaporkan mencapai 4-10% oleh (Wiesinger et al., 2024) dan studi lainnya, terbukti memberikan keunggulan kompetitif yang nyata, khususnya bagi atlet olahraga ketahanan. Adaptasi fisiologis ini didukung oleh perubahan struktural pada otot, seperti peningkatan kepadatan kapiler dan aktivitas mitokondria, yang pada akhirnya akan mempercepat transfer oksigen dan mengoptimalkan metabolisme energi (Li et al., 2020).

Adaptasi Fisiologis terhadap HIIT: Perspektif Klasik Fisiologi Olahraga

Jika ditinjau dari kacamata fisiologi olahraga konvensional, efektivitas latihan HIIT sangat selaras dengan prinsip *fundamental Overload* (beban berlebih) dan Superkompensasi. Konsep yang dipopulerkan oleh para ahli seperti Matveyev dan Bompa ini pada dasarnya menyatakan bahwa ketika tubuh diberikan rangsangan latihan yang melebihi kapasitas normalnya, tubuh akan memicu serangkaian respons adaptif. Proses adaptasi ini, yang terjadi setelah fase pemulihan yang cukup, akan menghasilkan peningkatan kapasitas fungsional pada sistem kardiovaskular, pernapasan, dan otot rangka. Dukungan ilmiah untuk teori ini diperoleh dari studi (Batterson et al., 2023) yang menunjukkan bahwa HIIT selama dua minggu secara signifikan meningkatkan aktivitas enzim mitokondrial seperti siktrat sintetase dan protein mitokondrial (misalnya SIRT3 dan Kompleks I), yang menunjukkan peningkatan kapasitas oksidatif serta efisiensi energi pada tingkat sel otot. Sejalan dengan itu, meta-analisis terkini menunjukkan bahwa pendekatan HIIT yang menerapkan prinsip overload secara terstruktur mampu meningkatkan parameter performa atlet secara signifikan termasuk $VO_2\text{max}$, power, ambang batas laktat, dan kecepatan *time-trial* dibanding pelatihan intensitas sedang (Z. Wang & Wang, 2024).

Di sisi lain, prinsip reversibilitas sangat penting dalam fisiologi olahraga. Adaptasi positif yang diperoleh melalui HIIT dapat menurun secara cepat apabila stimulus dihentikan, sebagaimana ditunjukkan dalam tinjauan sistematis terbaru pada atlet endurance yang melaporkan penurunan $VO_2\text{max}$, ambang laktat, dan kapasitas metabolik hanya dalam 3-4 minggu penghentian latihan (Barbieri et al., 2024). Oleh karena itu, penyusunan periodisasi latihan yang terencana dengan baik menjadi sangat krusial agar manfaat fisiologis dari HIIT tidak hanya dapat dipertahankan, tetapi juga terus ditingkatkan dalam jangka panjang.

Mekanisme Peningkatan $VO_2\text{max}$ Berdasarkan Model Fisiologis

Untuk memahami lebih dalam bagaimana $VO_2\text{max}$ meningkat, kita dapat merujuk pada Persamaan Fick ($VO_2 = Q \times a-vO_2 \text{ diff}$). Pada intinya, model ini menjelaskan bahwa

peningkatan volume oksigen maksimal dapat dicapai melalui dua jalur utama: peningkatan curah jantung (Q), yaitu volume darah yang dipompa oleh jantung, atau melalui peningkatan perbedaan oksigen arteri-vena ($a-vO_2$ difference), yang mencerminkan kemampuan otot untuk menyerap oksigen dari darah secara lebih efisien. Dalam studi yang dilakukan oleh (Ito et al., 2024), ditemukan bahwa latihan HIIT intensif selama delapan minggu dapat memicu adaptasi kardiorespirasi yang signifikan. Adaptasi tersebut meliputi peningkatan $VO_2\max$, hipertrofi ventrikel kiri, dan kemampuan respirasi maksimal saat melakukan latihan dengan intensitas tinggi. Temuan ini menguatkan peran sistem kardiovaskular dalam mendukung respons adaptif otot dan daya tahan (Ko et al., 2025). Studi tersebut menemukan bahwa program HIIT pada atlet remaja berhasil meningkatkan fraksi ejeksi ventrikel kiri dan volume sekuncup, yang secara langsung menandakan adanya peningkatan kemampuan jantung dalam memompa darah. Data terbaru menunjukkan bahwa HIIT selama dua minggu secara signifikan meningkatkan ekspresi protein mitokondrial kunci, seperti citrat sintase dan SIRT3, terutama dalam subfraksi mitokondria pada otot rangka manusia (Batterson et al., 2023). Selain itu, proteome otot mengalami penyusunan ulang proteostatik dan adaptasi metabolik yang mendukung kapasitas oksidatif, seperti yang ditunjukkan oleh studi modifikasi proteome dan acetylome setelah HIIT (Hostrup et al., 2022). Temuan ini memperkuat peran penting HIIT dalam meningkatkan efisiensi ekstraksi dan pemanfaatan oksigen di tingkat otot, yang diukur dengan perbedaan arteriovenosa ($a-vO_2$ diff).

Merujuk pada teori klasik yang dikemukakan oleh Hill dan Lupton (1923), kapasitas aerobik sangat ditentukan oleh kemampuan sistem sirkulasi dalam mengantarkan dan menggunakan oksigen. HIIT terbukti meningkatkan kepadatan kapiler otot serta efisiensi ventilasi paru. Studi oleh (Jensen et al., 2004), melaporkan bahwa HIIT selama delapan minggu secara signifikan meningkatkan kapilarisasi otot dan kapasitas aerobik pada atlet siklus. Selain itu, (Ito et al., 2024) menemukan bahwa HIIT memperbaiki ventilasi paru, termasuk laju ventilasi saat inisiasi latihan intens, serta memicu adaptasi kardiovaskular yang mendukung peningkatan efisiensi sistem pernapasan. Hal ini dibuktikan dalam riset terkini oleh (Pérez-Castilla et al., 2023), yang melaporkan bahwa 5 minggu HIIT berhasil meningkatkan $VO_2\max$ dan daya tahan (waktu hingga kelelahan), serta keterampilan spesifik olahraga pada atlet rekreasi bola basket. Maka, dapat disimpulkan bahwa berbagai teori dan bukti penelitian menegaskan bahwa HIIT mendorong $VO_2\max$ melalui kombinasi adaptasi sentral (melibatkan jantung dan paru-paru) serta adaptasi perifer (melibatkan otot dan sistem pembuluh darah). Kombinasi inilah yang menjadikan HIIT sebagai metode yang sangat ampuh untuk meningkatkan kapasitas aerobik atlet secara menyeluruh.

Perspektif Neuroscience: Implikasi HIIT terhadap Sistem Neuromuskular

Dari perspektif neuromuskular, tinjauan ilmiah terbaru menyatakan bahwa HIIT secara efektif meningkatkan rekrutmen dan sinkronisasi unit motorik khususnya serabut *fast-twitch*

serta meningkatkan kecepatan tembakan motorik dan efisiensi transmisi sinyal *neuromuscular* (Aslam et al., 2025). Fenomena ini didukung oleh bukti empiris bahwa HIIT mampu meningkatkan kemampuan lompatan eksplosif dan kemampuan *sprint* (Stankovic et al., 2023), serta relatif lebih efektif dibandingkan SIT dalam meningkatkan tinggi lompatan dan daya tahan (Pierros & Spyrou, 2023). Lebih lanjut, pendekatan *neuroscience* juga mengungkap bahwa latihan intensitas tinggi dapat memodifikasi aktivitas di korteks motorik. Secara spesifik, latihan ini memperkuat konektivitas antara korteks sensorimotor dengan medula spinalis, yang berujung pada peningkatan koordinasi gerak, reaktivitas otot, dan pemangkasan waktu reaksi atlet, faktor-faktor yang sangat menentukan dalam cabang olahraga berbasis kecepatan (K. Zhang et al., 2022).

Rasio Kerja-Istirahat dalam HIIT sebagai Kunci Spesifikasi Adaptasi

Aspek krusial dalam perancangan program HIIT adalah penentuan rasio kerja-istirahat. Penyesuaian rasio ini dapat memandu adaptasi fisiologis apakah fokus ke peningkatan kapasitas aerobik atau pada kekuatan anaerobik. Contohnya, studi pada atlet remaja Taekwondo menunjukkan bahwa rasio HIIT 1:4 (kerja:istirahat) secara signifikan lebih efektif meningkatkan $VO_2\text{max}$ dan kapasitas anaerobik dibanding rasio 1:2 atau 1:8 (Seo et al., 2019). Oleh karena itu, program HIIT harus dirancang secara spesifik, dengan mempertimbangkan tuntutan cabang olahraga, periodisasi latihan, serta karakteristik unik setiap atlet. Sebagai kesimpulan, bukti-bukti ilmiah terkini secara konsisten menunjukkan bahwa HIIT adalah strategi pelatihan yang efisien dan multifaset. Metode ini dapat diadopsi oleh pelatih dan praktisi olahraga sebagai alat yang ampuh untuk mengoptimalkan performa atletik di berbagai disiplin olahraga.

Future Directions

Meskipun banyak penelitian telah menunjukkan efektivitas latihan intensitas tinggi (HIIT) dalam meningkatkan performa atletik, masih ada beberapa pertanyaan yang belum terjawab. Salah satu isu utama adalah pemahaman yang kurang mengenai durasi dan intensitas HIIT yang paling optimal untuk berbagai kategori atlet, terutama berdasarkan usia, jenis kelamin, dan latar belakang kebugaran. Selain itu, interaksi antara adaptasi fisiologis dan psikologis akibat latihan intensitas tinggi juga belum banyak diteliti. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa faktor-faktor seperti stres, motivasi, dan kelelahan mental dapat memengaruhi hasil adaptasi fisik, tetapi bukti ilmiahnya masih terbatas. Variabilitas genetik individu juga menjadi tantangan dalam mempersonalisasi protokol HIIT agar lebih tepat. Penggunaan teknologi pelacakan performa berbasis data real-time dalam HIIT masih merupakan area yang perlu diteliti lebih lanjut.

Jika dilihat dari variabel utama dalam penelitian sebelumnya, beberapa keterbatasan spesifik juga terlihat. Peningkatan $VO_2\text{max}$ sering dilaporkan, namun sebagian besar studi menggunakan sampel kecil atau populasi tertentu sehingga hasilnya sulit digeneralisasi.

Penelitian mengenai kapasitas anaerob dan kelincahan umumnya dilakukan dalam waktu singkat, sehingga efek jangka panjang belum jelas. Studi tentang kekuatan otot dan daya ledak menunjukkan hasil positif, tetapi kebanyakan menggunakan desain pre-post tanpa kelompok kontrol. Sementara itu, peningkatan efisiensi lari masih jarang diteliti dan hanya pada cabang olahraga tertentu. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu menggunakan desain yang lebih kuat, dengan jumlah sampel lebih besar, durasi intervensi lebih panjang, serta melibatkan berbagai cabang olahraga untuk meningkatkan generalisasi. Kajian yang mengintegrasikan pengukuran fisiologis, performa olahraga spesifik, serta faktor psikologis dan genetik juga penting untuk memahami efek HIIT secara menyeluruh. Dengan demikian, efektivitas HIIT dapat dipahami tidak hanya dari kapasitas aerobik dan anaerob, tetapi juga dari aspek kekuatan, kelincahan, pemulihan, dan efisiensi gerak, sehingga menghasilkan rekomendasi latihan yang lebih aplikatif, personal, efisien, dan berbasis bukti.

CONCLUSION AND SUGGESTION

Secara keseluruhan, kemampuan latihan HIIT dalam meningkatkan performa atletik didasari oleh adaptasi fisiologis yang komprehensif, mencakup peningkatan $VO_2\text{max}$, efisiensi metabolisme, kekuatan otot, hingga kapasitas anaerobik. Landasan ilmiahnya pun kokoh, didukung oleh teori-teori fisiologi olahraga klasik serta diperkuat oleh wawasan mutakhir dari bidang ilmu saraf (*neuroscience*). Secara spesifik, HIIT terbukti mampu merangsang sistem neuromuskular dan mengasah konektivitas motorik, sebuah aspek yang sangat vital bagi cabang olahraga yang bertumpu pada kecepatan dan daya ledak. Menimbang temuan-temuan ini, para pelatih dan praktisi olahraga sangat dianjurkan untuk menyusun program HIIT yang dipersonalisasi, misalnya dengan menyesuaikan durasi sprint (20-40 detik) dan interval istirahat (1:2 atau 1:3) berdasarkan tingkat kebugaran atlet, menggunakan uji $VO_2\text{max}$ atau heart rate reserve sebagai acuan intensitas, serta mengadaptasi bentuk latihan (lari, bersepeda, atau *sport-specific drills*) sesuai cabang olahraga yang digeluti. Program tersebut idealnya dirancang dengan mempertimbangkan secara cermat karakteristik unik setiap atlet, tuntutan spesifik dari cabang olahraganya, serta pengaturan rasio kerja-istirahat yang paling optimal. Kendati demikian, riset di masa depan masih sangat dibutuhkan untuk mengeksplorasi lebih jauh dampak jangka panjang dari penerapan HIIT, khususnya dengan meninjau variabel seperti usia dan jenis kelamin. Di samping itu, penelitian mengenai integrasi teknologi latihan berbasis data juga menjadi area yang sangat menjanjikan untuk meningkatkan presisi dan personalisasi adaptasi latihan bagi setiap atlet. Secara keseluruhan, efektivitas HIIT dalam meningkatkan performa atletik terutama dimediasi oleh adaptasi fisiologis yang komprehensif, mencakup peningkatan kapasitas aerobik ($VO_2\text{max}$), kapasitas anaerob, kekuatan otot, serta efisiensi metabolisme, sehingga menegaskan mekanisme fisiologis sebagai kunci utama keberhasilan intervensi ini.

REFERENCES

- Akter, S., Rahman, M. M., Rouyard, T., Aktar, S., Nsashiya, R. S., & Nakamura, R. (2024). A systematic review and network meta-analysis of population-level interventions to tackle smoking behaviour. *Nature Human Behaviour*, 8(12), 2367–2391. <https://doi.org/10.1038/s41562-024-02002-7>
- Aslam, S., Habyarimana, J. D. D., & Bin, S. Y. (2025). Neuromuscular adaptations to resistance training in elite versus recreational athletes. *Frontiers in Physiology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1598149>
- Barbieri, A., Fuk, A., Gallo, G., Gotti, D., Meloni, A., La Torre, A., Filipas, L., & Codella, R. (2024). Cardiorespiratory and metabolic consequences of detraining in endurance athletes. *Frontiers in Physiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1334766>
- Batterson, P. M., McGowan, E. M., Stierwalt, H. D., Ehrlicher, S. E., Newsom, S. A., & Robinson, M. M. (2023). Two weeks of *High-Intensity Interval Training* increases skeletal muscle mitochondrial respiration via complex-specific remodeling in sedentary humans. *Journal of Applied Physiology*, 134(2), 339–355. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00467.2022>
- Benhammou, S., Clemente, F. M., Mourot, L., & Belkadi, A. (2025). Physiological and Biomechanical Responses Induced by a Continuous Test and an Intermittent Test in Middle-Distance Runners. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 20(5), 638–643. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2024-0350>
- Bharlaman, M. B. F., Kusuma, I. D. M. A. W., Kusnanik, N. W., Prianto, D. A., & Pranoto, A. (2024). Physiological adaptations in small-side games combined with speed-endurance training: analyzing heart rate and rate of perceived exertion. *Pedagogy of Physical Culture and Sports*, 28(5), 407–414. <https://doi.org/10.15561/26649837.2024.0509>
- Bishop, D. J., Botella, J., Genders, A. J., Lee, M. J.-C., Saner, N. J., Kuang, J., Yan, X., & Granata, C. (2019). High-Intensity Exercise and Mitochondrial Biogenesis: Current Controversies and Future Research Directions. *Physiology*, 34(1), 56–70. <https://doi.org/10.1152/physiol.00038.2018>
- BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation. (2023). Home-based *High-Intensity Interval Training* improves cardiorespiratory fitness: A systematic review and meta-analysis, 15, Article 166. <https://doi.org/10.1186/s13102-023-00777-2>
- Čaprić, I., Stanković, M., Bojić, I., Katanić, B., Jelaska, I., Pezelj, L., Masanovic, B., Stefanica, V., & Govindasamy, K. (2025). Effects of Different Types of *High-Intensity Interval Training* (HIIT) on Physical Performance in Female Basketball Players—A Systematic Review. *Life*, 15(8), 1180. <https://doi.org/10.3390/life15081180>
- Diahputri, N. M. N., & Sundari, L. P. R. (2022). Respons Fisiologis dan Biomolekuler Pada High Intensity Interval Training (HIIT). *Jurnal Kesehatan Terpadu*, 6(2), 79–84. <https://jurnal.undhirabali.ac.id/index.php/kesehatan/article/view/2385>
- Eather, N., Stansfield, K., Babic, M., & Lubans, D. R. (2024). The Development and Evaluation of Netball-Specific *High-Intensity Interval Training* Sessions: The Netball-HIIT Study. *Sports*, 12(1), 34. <https://doi.org/10.3390/sports12010034>
- Evangelista, A. L., de Camargo, J. B. B., Rica, R. L., Carnevali Júnior, L. C., Mallett, G. S., Bullo, V., Bergamin, M., Gobbo, S., & Bocalini, D. S. (2025). Different whole body HIIT protocols do not promote different muscle thickness and functional adaptations among healthy physically active subjects. *Frontiers in Sports and Active Living*, 6. <https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1513030>
- Galán-Rioja, M. Á., Gonzalez-Ravé, J. M., González-Mohino, F., & Seiler, S. (2023). Training Periodization, Intensity Distribution, and Volume in Trained Cyclists: A Systematic Review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 18(2), 112–122. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2022-0302>
- García-Pinillos, F., Cámara-Pérez, J. C., Soto-Hermoso, V. M., & Latorre-Román, P. Á. (2017). A High Intensity Interval Training (HIIT)-Based Running Plan Improves Athletic Performance by Improving Muscle Power. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(1), 146–153. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001473>
- Gastin, P. B. (2001). Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Medicine*, 31(10), 725–741. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131100-00003>
- Gibbs KD, Loveless J, Crane S. A guide to using technological applications to facilitate systematic reviews. *Worldviews Evid Based Nurs*. 2022 Dec;19(6):442-449. doi: 10.1111/wvn.12611. Epub 2022 Nov 15. PMID: 36380454; PMCID: PMC11465921.
- Haller, N., Stöggli, T., Strepp, T., Blumkaitis, J., Schmuttermair, A. C., Kilzer, F., & Wiesinger, H.-P. (2022). *High-Intensity Interval Training* in elite athletes: A meta-analysis of effects on VO₂max. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 54(2022), 272. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000878432.17738.98>
- Hall, A. J., Aspe, R. R., Craig, T. P., Kavaliuskas, M., Babraj, J., & Swinton, P. A. (2023). The Effects of *Sprint Interval Training* on Physical Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis.

- Journal of Strength & Conditioning Research*, 37(2), 457–481. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004257>
- Hostrup, M., Lemming, A. K., Stocks, B., Gonzalez-Franquesa, A., Larsen, J. K., Quesada, J. P., Thomassen, M., Weinert, B. T., Bangsbo, J., & Deshmukh, A. S. (2022). *High-Intensity Interval Training* remodels the proteome and acetylome of human skeletal muscle. *ELife*, 11. <https://doi.org/10.7554/eLife.69802>
- Hung, C.-H., Su, C.-H., & Wang, D. (2025). The Role of *High-Intensity Interval Training* (HIIT) in Neuromuscular Adaptations: Implications for Strength and Power Development—A Review. *Life*, 15(4), 657. <https://doi.org/10.3390/life15040657>
- ilanović, Z., et al. (2023). High-load HIIT improves explosive strength and sprint performance in trained athletes. *Biology of Sport*, 40(2), 435–443.
- Ito, G., Feeley, M., Sawai, T., Nakata, H., Otsuki, S., Nakahara, H., & Miyamoto, T. (2024). *High-Intensity Interval Training* improves respiratory and cardiovascular adjustments before and after initiation of exercise. *Frontiers in Physiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1227316>
- Jensen, L., Bangsbo, J., & Hellsten, Y. (2004). Effect of high intensity training on capillarization and presence of angiogenic factors in human skeletal muscle. *The Journal of Physiology*, 557(2), 571–582. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.057711>
- Ko, J.-M., So, W.-Y., & Park, S.-E. (2025). Narrative Review of *High-Intensity Interval Training*: Positive Impacts on Cardiovascular Health and Disease Prevention. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*, 12(4), 158. <https://doi.org/10.3390/jcdd12040158>
- Laidi, A., Melki, H., Djerioui, M., & Salem, L. (2025). Experimental Study on How 10 weeks of Combined Height Interval Intensity Training (HIIT) and Plyometric Training Can Affect Explosive Power in U17 Football Players. *Слобожанський Науково-Спортивний Вісник*, 29(1), 3–13. <https://doi.org/10.15391/sns.v.2025-1.01>
- Li, J., Li, Y., Atakan, M. M., Kuang, J., Hu, Y., Bishop, D. J., & Yan, X. (2020). The Molecular Adaptive Responses of Skeletal Muscle to High-Intensity Exercise/Training and Hypoxia. *Antioxidants*, 9(8), 656. <https://doi.org/10.3390/antiox9080656>
- Llanos-Lagos, C., Ramirez-Campillo, R., Moran, J., & Sáez de Villarreal, E. (2024). Effect of Strength Training Programs in Middle- and Long-Distance Runners' Economy at Different Running Speeds: A Systematic Review with Meta-analysis. *Sports Medicine*, 54(4), 895–932. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01978-y>
- Liu Y, Abdullah BB, Abu Saad HB. Effects of *High-Intensity Interval Training* on strength, speed, and endurance performance among racket sports players: A systematic review. *PLoS One*. 2024 Jan 5;19(1):e0295362. doi:10.1371/journal.pone.0295362. PMID: 38180964; PMCID: PMC10769056.
- Maharani, Sukendro, & Yanto, A. H. (2025). Pengaruh Latihan High Intensity Interval Training (HIIT) terhadap Peningkatan VO2MAX pada Atlet Bulutangkis PB Tunas Jaya Kasturi Kota Jambi. *SPRINTER: Jurnal Ilmu Olahraga*, 6(1), 121–126. <https://doi.org/10.46838/spr.v6i1.708>
- Milanović, Z., Sporiš, G., & Weston, M. (2015). Effectiveness of *High-Intensity Interval Training* (HIT) and Continuous Endurance Training for VO2max Improvements: A Systematic Review and Meta-Analysis of Controlled Trials. *Sports Medicine*, 45(10), 1469–1481. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0365-0>
- Mølmen, K. S., Almquist, N. W., & Skattebo, Ø. (2025). Effects of Exercise Training on Mitochondrial and Capillary Growth in Human Skeletal Muscle: A Systematic Review and Meta-Regression. *Sports Medicine*, 55(1), 115–144. <https://doi.org/10.1007/s40279-024-02120-2>
- Nature, S. (2024). Effects of high-intensity training on jumping performance among athletes: A meta-analysis. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83161-5>
- Pérez-Castilla, A., García-Pinillos, F., Miras-Moreno, S., Ramirez-Campillo, R., García-Ramos, A., & Ruiz-Alias, S. A. (2023). Selective Effect of Different High-Intensity Running Protocols on Resistance Training Performance. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 37(6), e369–e375. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004392>
- Pereira PE, Esteves G, Carvas N, Azevedo PH. Effects of high-intensity interval and moderate-intensity continuous training on the anaerobic threshold of highly trained athletes in endurance sports: a systematic review with meta-analysis. *J Sports Med Phys Fitness*. 2024 Sep;64(9):898-907. doi: 10.23736/S0022-4707.24.15855-0. Epub 2024 Jun 6. PMID: 38842374
- Pierros, T., & Spyrou, K. (2023). Effects of *High-Intensity Interval Training* versus *Sprint Interval Training* during the second wave of COVID-19 lockdown on soccer players. *Apunts Sports Medicine*, 58(218), 100414. <https://doi.org/10.1016/j.apunsm.2023.100414>
- Rønnestad, B. R., et al. (2023). *Sprint Interval Training* improves anaerobic performance in trained cyclists. *European Journal of Sport Science*, 23(2), 200–208.
- Selcuk, A. A. (2019). A Guide for Systematic Reviews: PRISMA. *Turkish Archives of Otorhinolaryngology*, 57(1), 57–58. <https://doi.org/10.5152/tao.2019.4058>
- Seo, M.-W., Lee, J.-M., Jung, H. C., Jung, S. W., & Song, J. K. (2019). Effects of Various Work-to-rest Ratios during *High-Intensity Interval Training* on Athletic Performance in Adolescents. *International*

- Journal of Sports Medicine*, 40(08), 503–510. <https://doi.org/10.1055/a-0927-6884>
- Soslu, R., Uysal, A., Devrilmez, M., Can Çuvalcıoğlu, İ., Doğan, A. A., Karaburgu, S., & Taş, M. (2023). Effects of *High-Intensity Interval Training* program on pituitary function in basketball players: a randomized controlled trial. *Frontiers in Physiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1219780>
- Stankovic, M., Djordjevic, D., Trajkovic, N., & Milanovic, Z. (2023). Effects of *High-Intensity Interval Training* (HIIT) on Physical Performance in Female Team Sports: A Systematic Review. *Sports Medicine - Open*, 9(1), 78. <https://doi.org/10.1186/s40798-023-00623-2>
- Stanković, M., Trajković, N., Mačak, D., Đorđević, D., Lazić, A., & Milanović, Z. (2024). Effects of linear and change of direction *High-Intensity Interval Training* on physical performance of elite female soccer players. *Biology of Sport*, 41(4), 31–39. <https://doi.org/10.5114/biolsport.2024.134761>
- Stögggl, T. L., Strepp, T., Wiesinger, H.-P., & Haller, N. (2024). A training goal-oriented categorization model of *High-Intensity Interval Training*. *Frontiers in Physiology*, 15, Article 1414307. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1414307>
- Tian, S., Mou, H., Fang, Q., Zhang, X., Meng, F., & Qiu, F. (2021). Comparison of the Sustainability Effects of High-Intensity Interval Exercise and Moderate-Intensity Continuous Exercise on Cognitive Flexibility. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9631. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189631>
- Wang, X., Soh, K. G., Samsudin, S., Li, L., Liu, C., Sun, M., & Ma, S. (2025). Effects of high-intensity training on jumping performance among athletes: a systematic review with meta-analysis. *Scientific Reports*, 15(1), 1763. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83161-5>
- Wang, Z., & Wang, J. (2024). The effects of *High-Intensity Interval Training* versus moderate-intensity continuous training on athletes' aerobic endurance performance parameters. *European Journal of Applied Physiology*, 124(8), 2235–2249. <https://doi.org/10.1007/s00421-024-05532-0>
- Wiesinger, H.-P., Hopkins, W. G., Haller, N., Blumkaitis, J., Strepp, T., & Stögggl, T. L. (2024). Meta-analyses of the effects of *High-Intensity Interval Training* in elite athletes — part II: relationships between the mean effects on various performance measures. *Frontiers in Physiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1486570>
- Yuan, Y., Soh, K. G., Qi, F., Bashir, M., & Zhao, N. (2024). Effects of *High-Intensity Interval Training* on selected indicators of physical fitness among male team-sport athletes: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE*, 19(11), e0310955. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0310955>
- Yudhistira, D., Suherman, W. S., Wiratama, A., Wijaya, U. K., Paryadi, P., Faruk, M., Hadi, H., Siregar, S., Jufrianis, J., & Pratama, K. W. (2021). Content Validity of the HIIT Training Program in Special Preparations to Improve the Dominant Biomotor Components of Kumite Athletes. *International Journal of Human Movement and Sports Sciences*, 9(5), 1051–1057. <https://doi.org/10.13189/saj.2021.090527>
- Yue, T., Su, H., Cheng, M.-Y., Wang, Y., Bao, K., & Qi, F. (2025). *High-Intensity Interval Training* Improves Inhibitory Control and Working Memory in Healthy Young Adults. *Journal of Human Kinetics*. <https://doi.org/10.5114/jhk/194498>
- Zhang, K., Jan, Y.-K., Liu, Y., Zhao, T., Zhang, L., Liu, R., Liu, J., & Cao, C. (2022). Exercise Intensity and Brain Plasticity: What's the Difference of Brain Structural and Functional Plasticity Characteristics Between Elite Aerobic and Anaerobic Athletes? *Frontiers in Human Neuroscience*, 16. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.757522>
- Zhang, Z., Xie, L., Ji, H., Chen, L., Gao, C., He, J., Lu, M., Yang, Q., Sun, J., & Li, D. (2024). Effects of different work-to-rest ratios of *High-Intensity Interval Training* on physical performance and physiological responses in male college judo athletes. *Journal of Exercise Science & Fitness*, 22(3), 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2024.03.009>