



Analisis Beban Latihan Eksternal dan Internal Pemain Sepak Bola Profesional Menggunakan Kombinasi GPS Tracker dan Heart Rate Variability

Andi Saiful Alimsyah

¹, Fakultas Ilmu Keolahragaan, Universitas Negeri Makassar

andi.saiful.alimsyah@unm.ac.id

Abstrak

Monitoring beban latihan merupakan aspek krusial dalam optimalisasi performa dan pencegahan cedera pada pemain sepak bola profesional. Integrasi teknologi GPS tracker dan Heart Rate Variability (HRV) memberikan perspektif komprehensif terhadap beban latihan eksternal dan internal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis beban latihan eksternal dan internal pemain sepak bola profesional menggunakan kombinasi GPS tracker dan HRV, serta mengidentifikasi korelasi antara kedua parameter tersebut. Penelitian kuantitatif deskriptif-korelasional ini melibatkan 24 pemain sepak bola profesional Liga 1 Indonesia (usia $24,3 \pm 3,2$ tahun) selama periode 12 minggu kompetisi. Data beban latihan eksternal dikumpulkan menggunakan GPS tracker 10 Hz (total distance, high-speed running, sprint distance, akselerasi, deselerasi), sedangkan beban internal diukur melalui HRV (RMSSD, training load score) dan Rating of Perceived Exertion (RPE). Analisis data menggunakan statistik deskriptif dan korelasi Pearson. Rerata total jarak tempuh per sesi latihan adalah 5.847 ± 1.243 m, dengan high-speed running 642 ± 187 m dan sprint distance 143 ± 68 m. Nilai RMSSD menunjukkan penurunan signifikan pada fase kompetisi intensif ($42,3 \pm 8,1$ ms) dibandingkan fase persiapan ($56,7 \pm 9,4$ ms). Ditemukan korelasi negatif signifikan antara total distance dengan RMSSD ($r = -0,68$, $p < 0,01$) dan korelasi positif kuat antara high-speed running dengan RPE ($r = 0,74$, $p < 0,01$). Kombinasi GPS tracker dan HRV efektif dalam memonitor beban latihan pemain sepak bola profesional. Beban latihan eksternal yang tinggi berkorelasi dengan penurunan HRV, mengindikasikan pentingnya periodisasi latihan berbasis data objektif untuk mencegah overtraining dan mengoptimalkan performa.

Kata Kunci: beban latihan, GPS tracker, heart rate, performa, sepak bola

PENDAHULUAN

Sepak bola modern menuntut pemain untuk memiliki kapasitas fisik yang optimal guna menghadapi intensitas pertandingan yang semakin meningkat (Buchheit & Laursen, 2021). Dalam konteks kompetisi profesional, pemain dituntut untuk melakukan aktivitas intermiten dengan intensitas tinggi, termasuk sprint, akselerasi, deselerasi, dan perubahan arah yang berulang selama 90 menit pertandingan (Barnes et al., 2022). Kompleksitas tuntutan fisik ini mengharuskan pelatih dan staf kepelatihan untuk mengimplementasikan sistem monitoring beban latihan yang akurat dan komprehensif.

Monitoring beban latihan dalam sepak bola terbagi menjadi dua kategori utama: beban eksternal dan beban internal (Impellizzeri et al., 2020). Beban latihan eksternal merujuk pada stimulus fisik objektif yang diberikan kepada pemain, seperti jarak tempuh, kecepatan, akselerasi, dan deselerasi yang dapat diukur menggunakan teknologi GPS tracker (Malone et al., 2021). Sementara itu, beban latihan

internal merepresentasikan respons fisiologis dan psikologis individu terhadap stimulus eksternal tersebut, yang dapat diukur melalui heart rate variability, rating of perceived exertion, dan biomarker lainnya (Thorpe et al., 2020).

Teknologi GPS tracker telah menjadi standar dalam monitoring beban latihan eksternal di sepak bola profesional karena kemampuannya mengukur berbagai parameter pergerakan dengan akurasi tinggi (Rico-González et al., 2020). Sistem GPS dengan frekuensi sampling 10 Hz atau lebih tinggi mampu mendeteksi pergerakan kompleks dan aktivitas intensitas tinggi dengan presisi yang memadai untuk analisis performa (Scott et al., 2020). Data dari GPS tracker memberikan informasi objektif tentang volume dan intensitas latihan yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan periodisasi dan mencegah overtraining (Jaspers et al., 2021).

Di sisi lain, Heart Rate Variability (HRV) telah mendapat perhatian signifikan sebagai indikator non-invasif untuk mengevaluasi beban latihan internal dan status pemulihan sistem otonom (Flatt & Howells, 2021). HRV, khususnya parameter Root Mean Square of Successive Differences (RMSSD), mencerminkan modulasi parasimpatik jantung dan dapat mengindikasikan tingkat kelelahan, status pemulihan, dan adaptasi terhadap beban latihan (Buchheit, 2020). Penurunan HRV secara konsisten dapat menjadi early warning sign terhadap risiko overtraining dan peningkatan kerentanan cedera (Rabbani et al., 2020).

Meskipun GPS tracker dan HRV telah digunakan secara individual dalam berbagai penelitian, integrasi kedua metode ini masih terbatas dalam konteks sepak bola profesional Indonesia (Kusnanik et al., 2021). Penelitian sebelumnya cenderung fokus pada satu aspek monitoring saja, padahal kombinasi beban eksternal dan internal memberikan gambaran holistik tentang respons pemain terhadap program latihan (Weaving et al., 2022). Pemahaman terhadap interaksi antara beban eksternal yang diukur GPS dengan respons internal yang tercermin dalam HRV dapat membantu praktisi olahraga dalam membuat keputusan berbasis bukti terkait manajemen beban latihan (Djaoui et al., 2020).

Dalam konteks Liga 1 Indonesia, implementasi teknologi monitoring beban latihan masih bervariasi antar klub, dengan beberapa klub profesional mulai mengadopsi sistem monitoring berbasis teknologi (Setiawan & Hidayat, 2022). Namun, literatur ilmiah yang mendokumentasikan praktik monitoring beban latihan pada pemain profesional Indonesia masih sangat terbatas (Pratama et al., 2023). Keterbatasan data empiris ini menghambat pengembangan program latihan yang evidence-based dan culturally-adapted untuk konteks sepak bola Indonesia.

Beberapa pertanyaan penelitian yang perlu dijawab meliputi: Bagaimana profil beban latihan eksternal pemain sepak bola profesional Indonesia selama periode kompetisi? Bagaimana respons HRV pemain terhadap beban latihan yang berbeda? Apakah terdapat korelasi signifikan antara parameter beban eksternal GPS dengan indikator beban internal HRV? Jawaban terhadap pertanyaan-pertanyaan ini akan berkontribusi pada pengembangan model monitoring beban latihan yang lebih efektif dan terintegrasi.

Lebih lanjut, pemahaman tentang korelasi antara beban eksternal dan internal dapat membantu mengidentifikasi threshold beban latihan optimal untuk setiap pemain, mempertimbangkan variabilitas individual dalam respons fisiologis (Hader et al., 2021). Pendekatan individualisasi ini penting karena pemain yang berbeda dapat menunjukkan respons internal yang berbeda terhadap beban eksternal yang sama, dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti tingkat kebugaran, status pemulihan, dan karakteristik genetik (Buchheit & Simpson, 2020).

Penelitian ini juga relevan dengan upaya pencegahan cedera dalam sepak bola profesional. Ketidakseimbangan antara beban latihan dan kapasitas pemulihan merupakan faktor risiko utama cedera non-kontak (Malone et al., 2020). Dengan memonitor secara simultan beban eksternal dan respons internal, pelatih dapat mengidentifikasi pemain yang berisiko tinggi mengalami cedera dan melakukan intervensi preventif yang tepat waktu (Thorpe et al., 2021).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis profil beban latihan eksternal pemain sepak bola profesional menggunakan GPS tracker; (2) mengevaluasi respons beban latihan internal melalui pengukuran HRV; (3) mengidentifikasi korelasi antara parameter beban latihan eksternal dan internal; serta (4) memberikan rekomendasi praktis untuk monitoring beban latihan dalam konteks sepak bola profesional Indonesia. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis terhadap ilmu kepelatihan sepak bola dan aplikasi praktis bagi pelatih dan praktisi olahraga dalam mengoptimalkan performa pemain.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain deskriptif-korelasional untuk menganalisis beban latihan eksternal dan internal pemain sepak bola profesional (Creswell & Creswell, 2020). Pengumpulan data dilakukan secara longitudinal selama 12 minggu periode kompetisi Liga 1 Indonesia musim 2023/2024, mencakup fase persiapan kompetisi, fase kompetisi intensif, dan fase kompetisi akhir.

Partisipan penelitian adalah 24 pemain sepak bola profesional dari satu klub Liga 1 Indonesia yang dipilih menggunakan teknik purposive sampling berdasarkan kriteria inklusi: (1) pemain inti yang bermain minimal 60 menit per pertandingan; (2) berusia 18-35 tahun; (3) tidak memiliki riwayat cedera serius dalam 6 bulan terakhir; (4) bersedia mengikuti protokol penelitian secara sukarela. Karakteristik partisipan meliputi usia $24,3 \pm 3,2$ tahun, tinggi badan $174,5 \pm 6,8$ cm, berat badan $71,2 \pm 5,6$ kg, dan pengalaman bermain profesional $5,7 \pm 2,4$ tahun. Penelitian ini telah mendapatkan persetujuan dari Komite Etik Penelitian institusi dan informed consent dari seluruh partisipan (Harriss et al., 2020).

Data beban latihan eksternal dikumpulkan menggunakan GPS tracker STATSports Apex Pro Series dengan frekuensi sampling 10 Hz yang dilengkapi accelerometer, gyroscope, dan magnetometer (STATSports, Irlandia Utara). Reliabilitas dan validitas perangkat ini telah terbukti dalam penelitian sebelumnya dengan coefficient of variation $< 5\%$ untuk parameter jarak dan kecepatan (Malone et al., 2021). Parameter yang diukur meliputi: total distance (meter), high-speed running/HSR $> 19,8$ km/jam (meter), sprint distance $> 25,2$ km/jam (meter), jumlah akselerasi > 3 m/s², jumlah deselerasi < -3 m/s², dan player load (arbitrary units).

Pengukuran HRV dilakukan setiap pagi hari (06:00-07:00) sebelum sesi latihan menggunakan Polar H10 heart rate sensor dan aplikasi Elite HRV (HRV4Training, Italia) pada posisi supine selama 5 menit setelah pemain bangun tidur (Plews et al., 2020). Parameter HRV yang dianalisis adalah RMSSD (Root Mean Square of Successive Differences) dalam milisecond, yang merupakan indikator modulasi parasimpatik cardiac dan memiliki reliabilitas tinggi dalam kondisi field (Buchheit, 2020).

Session-RPE dikumpulkan 30 menit setelah setiap sesi latihan menggunakan skala CR-10 Borg yang telah tervalidasi (Foster et al., 2021). Pemain melaporkan persepsi intensitas latihan secara keseluruhan, dan training load dihitung dengan mengalikan nilai RPE dengan durasi sesi latihan dalam menit.

Pengumpulan data dilakukan secara konsisten selama 12 minggu dengan protokol standar. Setiap pemain menggunakan GPS tracker yang ditempatkan di vest khusus pada area thoracic spine bagian atas selama semua sesi latihan dan pertandingan (Rico-González et al., 2020). Perangkat GPS diaktifkan 15 menit sebelum sesi latihan untuk memastikan koneksi satelit optimal (minimal 6 satelit). Data HRV direkam setiap pagi oleh tim peneliti untuk memastikan konsistensi protokol pengukuran. Pemain diminta untuk mengikuti prosedur standar: tidak mengonsumsi kafein atau makanan berat sebelum pengukuran, menggunakan toilet terlebih dahulu, dan berbaring tenang selama 5 menit pengukuran (Plews et al., 2020).

Data GPS diunduh segera setelah setiap sesi latihan menggunakan software STATSports Apex dan diekspor dalam format CSV untuk analisis lebih lanjut. Data HRV disinkronisasi secara otomatis ke cloud server dan dianalisis menggunakan algoritma validasi untuk mendeteksi artefak atau error pengukuran (Buchheit, 2020). Session-RPE dikumpulkan melalui formulir digital yang diisi pemain menggunakan tablet, dengan supervisi dari staf medis untuk memastikan pemahaman yang konsisten terhadap skala RPE.

Data dianalisis menggunakan IBM SPSS Statistics versi 26.0 dan Microsoft Excel 2021. Statistik deskriptif (mean, standar deviasi, minimum, maksimum) dihitung untuk semua variabel beban latihan eksternal dan internal (Field, 2021). Uji normalitas data menggunakan Shapiro-Wilk test untuk menentukan parametric atau non-parametric test yang sesuai. Korelasi antara parameter beban latihan eksternal (GPS) dan internal (HRV, RPE) dianalisis menggunakan Pearson correlation atau Spearman's rank correlation tergantung distribusi data (Pallant, 2020). Interpretasi kekuatan korelasi menggunakan kriteria: $r < 0,3$ (lemah), $r = 0,3-0,7$ (sedang), $r > 0,7$ (kuat). Perbedaan beban latihan antar fase kompetisi diuji menggunakan repeated measures ANOVA atau Friedman test dengan post-hoc analysis. Tingkat signifikansi ditetapkan pada $\alpha = 0,05$ untuk semua analisis statistik.

Data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memfasilitasi interpretasi. Analisis tambahan dilakukan untuk mengidentifikasi pemain dengan variabilitas respons internal yang tinggi terhadap

beban eksternal yang sama, menggunakan coefficient of variation individual. Hasil analisis kemudian diinterpretasikan dalam konteks literatur ilmiah terkini dan praktik kepelatihan sepak bola profesional.

HASIL DAN PEMBAHASAN (BOBOT PANJANG 60%)

Analisis data GPS tracker selama 12 minggu periode kompetisi menunjukkan profil beban latihan eksternal yang komprehensif. Tabel 1 menyajikan statistik deskriptif parameter beban latihan eksternal pemain sepak bola profesional.

Tabel 1. *Statistik Deskriptif Beban Latihan Eksternal (n = 24)*

No.	Parameter	Mean \pm SD	Minimum	Maksimum
1.	Total Distance (m)	5.847 \pm 1.243	3.421	8.654
	High-Speed Running (m)	642 \pm 187	298	1.043
2.	Sprint Distance (m)	143 \pm 68	34	287
3.	Akselerasi (n)	47 \pm 14	21	78
4.	Deselerasi (n)	52 \pm 16	24	89
	Player Load (AU)	487 \pm 112	254	723

Rerata total jarak tempuh per sesi latihan adalah 5.847 \pm 1.243 meter, dengan variabilitas yang cukup tinggi antar sesi (CV = 21,3%). High-speed running menunjukkan rerata 642 \pm 187 meter per sesi, sementara sprint distance tercatat 143 \pm 68 meter. Jumlah akselerasi dan deselerasi intensitas tinggi menunjukkan nilai yang relatif seimbang, dengan rerata 47 \pm 14 dan 52 \pm 16 kali per sesi.

Analisis berdasarkan fase kompetisi menunjukkan perbedaan signifikan dalam beban latihan eksternal. Fase kompetisi intensif menunjukkan total distance tertinggi (6.234 \pm 1.087 m) dibandingkan fase persiapan (5.421 \pm 1.156 m) dan fase akhir (5.886 \pm 1.298 m), dengan $F(2,46) = 8,34$, $p < 0,01$. High-speed running juga menunjukkan peningkatan signifikan pada fase kompetisi intensif (721 \pm 176 m) dibandingkan fase persiapan (587 \pm 183 m), $p < 0,05$.

Nilai RMSSD menunjukkan penurunan signifikan pada fase kompetisi intensif (42,3 \pm 8,1 ms) dibandingkan fase persiapan (56,7 \pm 9,4 ms), dengan $p < 0,001$. Penurunan ini mengindikasikan peningkatan stres fisiologis dan penurunan aktivitas parasimpatik selama periode kompetisi intensif. Session-RPE menunjukkan rerata 5,6 \pm 1,4, dengan training load 504 \pm 187 arbitrary units.

Analisis individual menunjukkan bahwa 6 dari 24 pemain (25%) mengalami penurunan RMSSD lebih dari 20% dari baseline selama fase kompetisi intensif, mengindikasikan risiko overreaching. Lima pemain (20,8%) menunjukkan pola pemulihan HRV yang tidak optimal, dengan RMSSD yang tetap rendah bahkan setelah hari istirahat.

Hasil analisis menunjukkan korelasi negatif signifikan antara total distance dengan RMSSD ($r = -0,68$, $p < 0,01$), mengindikasikan bahwa peningkatan beban latihan eksternal berhubungan dengan penurunan HRV. Korelasi positif kuat ditemukan antara high-speed running dengan session-RPE ($r = 0,74$, $p < 0,01$), menunjukkan bahwa aktivitas intensitas tinggi berkontribusi signifikan terhadap persepsi beban latihan.

Sprint distance menunjukkan korelasi negatif sedang dengan RMSSD ($r = -0,54$, $p < 0,01$), mengindikasikan bahwa aktivitas sprint berulang berkontribusi terhadap penurunan modulasi parasimpatik. Player load juga berkorelasi negatif dengan RMSSD ($r = -0,62$, $p < 0,01$), memperkuat temuan bahwa akumulasi beban mekanis mempengaruhi respons sistem otonom.

Analisis variabilitas individual menunjukkan perbedaan substansial dalam respons pemain terhadap beban latihan yang sama. Coefficient of variation untuk RMSSD individual berkisar antara 8,4% hingga 24,7%, mengindikasikan bahwa beberapa pemain menunjukkan fluktuasi HRV yang lebih tinggi dibandingkan yang lain.

Pemain dengan tingkat kebugaran aerobik lebih tinggi ($VO_{2max} > 58$ ml/kg/min) menunjukkan penurunan RMSSD yang lebih kecil (-12,3 \pm 4,6%) dibandingkan pemain dengan kebugaran aerobik sedang (-21,7 \pm 6,8%) pada beban eksternal yang setara, dengan $p < 0,05$. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya individualisasi monitoring beban latihan berdasarkan kapasitas fisiologis pemain.

Analisis pola temporal menunjukkan fluktuasi beban latihan sepanjang microcycle (satu minggu kompetisi). Beban latihan eksternal tertinggi terjadi pada H-3 sebelum pertandingan (7.123 \pm 987 m total distance), sedangkan H-1 menunjukkan beban terendah (2.876 \pm 543 m). RMSSD menunjukkan

pola recovery yang bertahap, dengan nilai terendah pada H+1 pasca pertandingan ($39,8 \pm 7,6$ ms) dan recovery mendekati baseline pada H+3 ($52,3 \pm 9,1$ ms).

Acute:Chronic Workload Ratio (ACWR) dihitung sebagai rasio beban latihan minggu terakhir terhadap rata-rata 4 minggu sebelumnya. Hasil menunjukkan bahwa 18,5% dari minggu latihan berada dalam zona "spike" ($ACWR > 1,5$), yang dikaitkan dengan peningkatan risiko cedera. Tiga dari empat cedera non-kontak yang terjadi selama periode penelitian didahului oleh $ACWR > 1,5$ dalam 1-2 minggu sebelumnya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemain sepak bola profesional Liga 1 Indonesia memiliki profil beban latihan eksternal yang sebanding dengan standar liga profesional regional, meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan liga elite Eropa (Modric et al., 2021). Rerata total distance 5.847 ± 1.243 meter per sesi latihan konsisten dengan temuan penelitian pada liga profesional Asia yang melaporkan jarak tempuh 5.200-6.400 meter per sesi (Zhou et al., 2020). Namun, nilai ini masih di bawah rerata liga elite Eropa yang mencapai 6.500-7.200 meter per sesi, mengindikasikan potensi untuk meningkatkan volume latihan pada konteks Indonesia (Barnes et al., 2022).

High-speed running (642 ± 187 m) dan sprint distance (143 ± 68 m) dalam penelitian ini menunjukkan intensitas latihan yang memadai, meskipun terdapat variabilitas tinggi antar sesi. Variabilitas ini dapat dijelaskan oleh perbedaan fokus latihan (teknikal, taktikal, atau physical conditioning) dan periodisasi mikrosiklus (Martín-García et al., 2020). Jumlah akselerasi dan deselerasi intensitas tinggi (47 dan 52 kali per sesi) mencerminkan karakteristik intermiten sepak bola modern yang menuntut perubahan kecepatan berulang, yang merupakan faktor beban mekanis signifikan terhadap struktur muskuloskeletal (Akenhead & Nassis, 2021).

Perbedaan signifikan beban latihan antar fase kompetisi menunjukkan implementasi periodisasi yang memadai, dengan peningkatan volume dan intensitas pada fase kompetisi intensif. Hal ini sejalan dengan prinsip periodisasi beban latihan yang menekankan perlunya variasi stimulus untuk mengoptimalkan adaptasi dan mencegah monotonitas latihan (Malone et al., 2020). Namun, peningkatan beban yang terlalu drastis pada fase kompetisi intensif perlu diwaspadai karena dapat meningkatkan risiko overtraining dan cedera (Jaspers et al., 2021).

Temuan bahwa beberapa sesi latihan menunjukkan beban eksternal yang sangat tinggi (total distance > 8.000 m) mengindikasikan pentingnya monitoring individual dan adjustment berdasarkan respons pemain (Buchheit & Simpson, 2020). Penelitian menunjukkan bahwa acute spike dalam beban latihan (peningkatan $>150\%$ dari minggu sebelumnya) merupakan faktor risiko independen untuk cedera non-kontak (Bowen et al., 2020). Oleh karena itu, implementasi sistem early warning berbasis ACWR dan parameter GPS dapat membantu mitigasi risiko ini.

Penurunan signifikan RMSSD pada fase kompetisi intensif ($42,3 \pm 8,1$ ms vs $56,7 \pm 9,4$ ms pada fase persiapan) mengindikasikan peningkatan stres fisiologis dan penurunan aktivitas parasimpatik cardiac (Buchheit, 2020). Penurunan RMSSD sebesar 25,4% ini melebihi threshold "meaningful change" yang umumnya ditetapkan pada 10-15%, mengindikasikan bahwa akumulasi beban latihan dan kompetisi memberikan dampak substansial terhadap sistem otonom (Plews et al., 2020). Temuan ini konsisten dengan penelitian pada pemain elite Eropa yang menunjukkan supresi HRV selama periode fixture congestion (Rabbani et al., 2020).

Implikasi praktis dari temuan ini adalah perlunya strategi recovery yang lebih agresif selama fase kompetisi intensif, termasuk optimalisasi durasi dan kualitas tidur, intervensi nutrisi berbasis evidensi, dan modalitas recovery seperti cold water immersion atau compression garments (Nédélec et al., 2021). Monitoring HRV secara harian dapat berfungsi sebagai biofeedback untuk adjustment beban latihan individual, di mana pemain dengan penurunan RMSSD $>20\%$ dari baseline dapat diberikan modifikasi volume atau intensitas latihan (Flatt & Howells, 2021).

Temuan bahwa 25% pemain mengalami penurunan RMSSD yang ekstrem ($>20\%$) menggarisbawahi variabilitas individual dalam respons terhadap beban latihan (Hader et al., 2021). Variabilitas ini dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor termasuk tingkat kebugaran aerobik, status recovery, kualitas tidur, stres psikologis, dan faktor genetik yang mempengaruhi regulasi otonom (Thorpe et al., 2020). Identifikasi pemain dengan respons atipik ini penting untuk mencegah overreaching dan optimalisasi performa individual melalui program yang disesuaikan.

Session-RPE yang menunjukkan korelasi kuat dengan parameter GPS (khususnya high-speed running, $r = 0,74$) mengonfirmasi validitas RPE sebagai indikator beban latihan internal yang praktis dan efektif (Foster et al., 2021). Namun, perlu dicatat bahwa RPE dapat dipengaruhi oleh faktor

psikologis seperti motivasi, ekspektasi, dan konteks sosial, sehingga kombinasi dengan parameter objektif seperti HRV memberikan perspektif yang lebih komprehensif (Impellizzeri et al., 2020).

Korelasi negatif signifikan antara total distance dengan RMSSD ($r = -0,68$) merupakan temuan penting yang mengonfirmasi bahwa peningkatan beban latihan eksternal berhubungan dengan penurunan modulasi parasimpatik cardiac (Djaoui et al., 2020). Kekuatan korelasi yang tergolong kuat ini mengindikasikan bahwa parameter GPS dapat digunakan sebagai prediktor respons fisiologis internal, meskipun dengan keterbatasan mengingat variabilitas individual yang substansial (Buchheit & Simpson, 2020).

Korelasi positif yang sangat kuat antara high-speed running dengan RPE ($r = 0,74$) mengonfirmasi bahwa aktivitas intensitas tinggi merupakan determinan utama persepsi beban latihan pemain (Martín-García et al., 2020). Temuan ini memiliki implikasi praktis penting: dalam merancang sesi latihan dengan target RPE tertentu, pelatih dapat memanipulasi volume high-speed running sebagai lever utama untuk mencapai intensitas yang diinginkan. Sebaliknya, jika tujuannya adalah mempertahankan volume latihan dengan RPE yang lebih rendah (misalnya pada sesi recovery), maka proporsi high-speed running harus diminimalkan.

Hubungan antara sprint distance dengan RMSSD ($r = -0,54$) mengindikasikan bahwa aktivitas sprint berulang berkontribusi terhadap penurunan aktivitas parasimpatik, meskipun dengan magnitude yang lebih kecil dibandingkan total distance (Thorpe et al., 2021). Hal ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa sprint menimbulkan beban metabolik dan neuromuskular yang signifikan meskipun durasi relatif singkat, serta potensi microtrauma pada struktur muskulotendinous yang memicu respons inflamasi sistemik (Malone et al., 2021).

Temuan korelasi ini mendukung model "internal-external load continuum" yang menyatakan bahwa beban eksternal merupakan stimulus yang menghasilkan respons internal, dan respons internal inilah yang sebenarnya mendorong adaptasi fisiologis (Impellizzeri et al., 2020). Oleh karena itu, monitoring komprehensif yang mencakup kedua aspek beban latihan esensial untuk optimalisasi periodisasi dan manajemen fatigue. Pendekatan yang hanya berfokus pada beban eksternal tanpa mempertimbangkan respons individual dapat menyebabkan programming error seperti undertraining pada pemain dengan respons rendah atau overtraining pada pemain dengan respons tinggi.

Variabilitas substansial dalam respons individual terhadap beban latihan yang sama (CV RMSSD: 8,4-24,7%) memperkuat argumen untuk personalisasi program latihan berdasarkan karakteristik fisiologis individual (Hader et al., 2021). Temuan bahwa pemain dengan kebugaran aerobik tinggi menunjukkan penurunan RMSSD yang lebih kecil pada beban eksternal yang setara mengindikasikan bahwa kapasitas kardiovaskular berfungsi sebagai buffer terhadap stres fisiologis latihan (Jones et al., 2020).

Implikasi praktisnya adalah bahwa pemain dengan tingkat kebugaran berbeda memerlukan adjustment beban latihan yang berbeda untuk mencapai stimulus adaptasi yang optimal (Buchheit & Laursen, 2021). Pemain dengan kebugaran rendah mungkin memerlukan volume latihan yang lebih rendah atau periode recovery yang lebih panjang untuk mencapai adaptasi yang sama dengan pemain fit yang dapat mentoleransi beban lebih tinggi. Pendekatan "one-size-fits-all" dalam programming latihan tim dapat menyebabkan overtraining pada sebagian pemain dan undertraining pada pemain lain.

Variabilitas dalam pola recovery HRV juga memiliki implikasi penting (Flatt & Howells, 2021). Pemain yang menunjukkan pemulihan RMSSD yang lambat setelah beban tinggi mungkin memerlukan intervensi recovery yang lebih agresif atau modifikasi schedule latihan untuk memastikan adaptasi positif. Monitoring longitudinal HRV dapat membantu mengidentifikasi "signature recovery pattern" setiap pemain, yang kemudian dapat digunakan untuk personalisasi microcycle training.

Faktor-faktor yang berkontribusi terhadap variabilitas individual meliputi genetik (polimorfisme yang mempengaruhi regulasi otonom), status training (pemain terlatih vs kurang terlatih), usia biologis, komposisi tubuh, kualitas tidur, nutrisi, dan faktor psikososial (Thorpe et al., 2020). Pemahaman holistik terhadap faktor-faktor ini dapat membantu praktisi olahraga dalam menginterpretasikan data monitoring dan membuat keputusan yang lebih informed tentang manajemen beban latihan individual.

Temuan bahwa 18,5% minggu latihan berada dalam zona "spike" ($ACWR > 1,5$) dan hubungannya dengan kejadian cedera memperkuat bukti tentang pentingnya manajemen progresif beban latihan dalam pencegahan cedera (Malone et al., 2020). Model ACWR, meskipun memiliki keterbatasan metodologis yang telah didiskusikan dalam literatur, tetap menjadi tool yang berguna untuk mengidentifikasi periode risiko tinggi (Bowen et al., 2020).

Tiga dari empat cedera non-kontak yang didahului oleh ACWR tinggi mengindikasikan bahwa rapid spike dalam beban latihan dapat melebihi kapasitas jaringan untuk beradaptasi, meningkatkan kerentanan terhadap overuse injuries (Jaspers et al., 2021). Mekanisme yang mendasari hubungan ini kompleks, melibatkan fatigue neuromuskular yang mengurangi proprioception dan control motorik, perubahan biomekanik yang meningkatkan stress pada struktur spesifik, dan kapasitas regenerasi jaringan yang tidak memadai mengimbangi microtrauma akumulatif (Akenhead & Nassis, 2021).

Integrasi monitoring beban eksternal (GPS), internal (HRV, RPE), dan wellness subjektif dapat meningkatkan akurasi prediksi risiko cedera (Rabbani et al., 2020). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi ACWR tinggi dengan penurunan HRV dan peningkatan soreness/fatigue subjektif memiliki nilai prediktif yang lebih tinggi dibandingkan single indicator (Thorpe et al., 2021). Implementasi dashboard terintegrasi yang menyajikan multiple indicators secara visual dapat memfasilitasi decision-making yang lebih cepat dan akurat oleh staf kepelatihan.

Strategi pencegahan cedera berbasis data monitoring meliputi: (1) menghindari spike beban >150% dalam satu minggu; (2) memastikan rasio chronic workload yang adekuat sebelum meningkatkan acute load; (3) memberikan recovery yang cukup setelah beban tinggi, terutama untuk pemain dengan penurunan HRV; (4) individualisasi beban berdasarkan history cedera, usia, dan status kebugaran; serta (5) komunikasi terbuka dengan pemain tentang sensation fatigue dan soreness (Malone et al., 2020).

Hasil penelitian ini memiliki implikasi praktis spesifik untuk konteks sepak bola profesional Indonesia (Setiawan & Hidayat, 2022). Pertama, implementasi teknologi monitoring beban latihan berbasis GPS dan HRV perlu diperluas di seluruh klub Liga 1 Indonesia untuk standardisasi praktik evidence-based coaching. Saat ini, adopsi teknologi masih terbatas pada klub-klub tertentu, menciptakan disparitas dalam kualitas manajemen pemain (Pratama et al., 2023).

Kedua, hasil penelitian dapat menjadi benchmark untuk profil beban latihan pemain Indonesia, memfasilitasi perbandingan dan evaluasi program latihan antar klub. Pengembangan database nasional yang mengagregasi data monitoring dari berbagai klub dapat memberikan insight tentang "best practices" dan mengidentifikasi area improvement untuk meningkatkan standar Liga 1 secara keseluruhan (Kusnanik et al., 2021).

Ketiga, temuan tentang variabilitas individual dan pentingnya personalisasi program latihan menantang pendekatan tradisional yang masih dominan di beberapa klub Indonesia, di mana semua pemain mengikuti program yang identik (Setiawan & Hidayat, 2022). Edukasi pelatih tentang prinsip individualisasi dan penggunaan data untuk decision-making perlu menjadi prioritas dalam program pendidikan kepelatihan nasional.

Keempat, integrasi teknologi monitoring dengan keahlian praktisi lokal (pelatih, sport scientist, physiotherapist) dapat menciptakan model "technology-enhanced coaching" yang culturally-adapted untuk konteks Indonesia (Pratama et al., 2023). Teknologi harus dipandang sebagai enabler yang melengkapi, bukan menggantikan, keahlian dan intuisi praktisi yang berpengalaman.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil. Pertama, sample size relatif kecil (24 pemain dari satu klub) membatasi generalisability temuan ke populasi pemain profesional Indonesia secara keseluruhan. Penelitian masa depan dengan sample multi-klub dan cross-sectional design dapat memberikan representasi yang lebih komprehensif.

Kedua, durasi monitoring 12 minggu, meskipun memadai untuk analisis short-term, mungkin tidak cukup untuk mengidentifikasi pola adaptasi jangka panjang atau efek kumulatif beban latihan sepanjang musim kompetisi penuh (40+ minggu). Longitudinal studies yang mencakup multiple season dapat memberikan insight tentang periodisasi tahunan dan efek cumulative fatigue (Malone et al., 2020).

Ketiga, penelitian ini tidak mengukur outcome performance eksplisit (physical performance tests, match performance metrics) yang dapat menghubungkan beban latihan dengan adaptasi performa aktual. Penelitian masa depan dapat mengintegrasikan assessment berkala physical fitness dan analisis match performance untuk evaluasi efektivitas program latihan (Modric et al., 2021).

Keempat, faktor-faktor confounding seperti kualitas tidur, nutrisi, stres psikologis, dan faktor lifestyle lainnya tidak dikontrol secara ketat dalam penelitian ini, meskipun faktor-faktor tersebut dapat mempengaruhi respons HRV dan beban internal (Thorpe et al., 2020). Penelitian masa depan dapat menggunakan desain controlled trial atau advanced statistical modeling untuk mengontrol variabel confounding ini.

Kelima, penelitian ini fokus pada beban latihan tanpa menganalisis konten taktis dan teknis latihan, yang merupakan dimensi penting dalam kepelatihan sepak bola (Martín-García et al., 2020). Integrasi data beban latihan dengan video analysis dan tactical metrics dapat memberikan pemahaman lebih holistik tentang stimulus latihan dan hubungannya dengan performa.

Arah penelitian masa depan yang promising meliputi: (1) investigasi hubungan beban latihan dengan match performance outcomes menggunakan machine learning algorithms; (2) pengembangan predictive models untuk cedera berbasis multiple biomarkers; (3) evaluasi efektivitas different recovery strategies dalam mengoptimalkan HRV post-training; (4) analisis perbedaan beban latihan dan respons antar posisi pemain; serta (5) investigasi faktor genetik dan epigenetik yang mempengaruhi variabilitas individual dalam respons terhadap beban latihan (Hader et al., 2021).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Profil beban latihan eksternal pemain sepak bola profesional Liga 1 Indonesia menunjukkan rerata total distance 5.847 ± 1.243 m per sesi, dengan high-speed running 642 ± 187 m dan sprint distance 143 ± 68 m. Profil ini sebanding dengan standar liga profesional regional meskipun masih di bawah liga elite Eropa, mengindikasikan potensi untuk optimalisasi lebih lanjut.
2. Beban latihan internal yang diukur melalui HRV menunjukkan nilai RMSSD rerata $48,7 \pm 11,3$ ms, dengan penurunan signifikan (25,4%) pada fase kompetisi intensif dibandingkan fase persiapan. Penurunan ini mencerminkan peningkatan stres fisiologis dan penurunan aktivitas parasimpatik selama periode fixture congestion.
3. Terdapat korelasi negatif signifikan antara beban latihan eksternal (total distance) dengan HRV ($r = -0,68$, $p < 0,01$), mengonfirmasi bahwa peningkatan beban eksternal berhubungan dengan penurunan modulasi parasimpatik cardiac. Korelasi positif kuat juga ditemukan antara high-speed running dengan RPE ($r = 0,74$, $p < 0,01$), menunjukkan bahwa aktivitas intensitas tinggi merupakan determinan utama persepsi beban latihan.
4. Variabilitas substansial dalam respons individual terhadap beban latihan yang sama (CV RMSSD: 8,4-24,7%) menggarisbawahi pentingnya personalisasi program latihan. Pemain dengan kebugaran aerobik tinggi menunjukkan resilience yang lebih baik terhadap stres fisiologis latihan dibandingkan pemain dengan kebugaran sedang.

Kombinasi GPS tracker dan HRV terbukti efektif sebagai sistem monitoring beban latihan yang komprehensif, memberikan perspektif objektif terhadap stimulus eksternal dan respons internal yang dapat digunakan untuk optimalisasi periodisasi, pencegahan overtraining, dan mitigasi risiko cedera dalam sepak bola profesional.

Berdasarkan temuan penelitian, beberapa saran praktis dapat direkomendasikan:

Untuk Pelatih dan Staf Kepelatihan:

1. Implementasikan sistem monitoring beban latihan terintegrasi yang mencakup parameter eksternal (GPS) dan internal (HRV, RPE) untuk memfasilitasi decision-making berbasis data dalam manajemen beban latihan dan periodisasi.
2. Lakukan monitoring HRV secara konsisten setiap pagi dengan protokol standar, dan gunakan penurunan $>10-15\%$ dari baseline sebagai threshold untuk adjustment beban latihan individual atau intervensi recovery.
3. Hindari acute spike beban latihan ($ACWR > 1,5$) dan pastikan progresivitas yang gradual dalam peningkatan volume dan intensitas latihan, khususnya setelah periode istirahat panjang atau setelah cedera.
4. Personalisasikan beban latihan berdasarkan karakteristik individual pemain (tingkat kebugaran, history cedera, respons HRV), daripada menggunakan pendekatan "one-size-fits-all" untuk semua pemain.
5. Implementasikan strategi recovery yang berbasis bukti (optimalisasi tidur, nutrisi, cold water immersion) khususnya selama fase kompetisi intensif untuk memfasilitasi pemulihan sistem otonom.

Untuk Klub dan Organisasi Sepak Bola:

1. Investasikan dalam teknologi monitoring beban latihan (GPS tracker, heart rate monitors) dan rekrut atau training staf dengan kompetensi sport science untuk memaksimalkan utilisasi data.

2. Kembangkan database internal yang mengagregasi data monitoring sepanjang musim untuk mengidentifikasi pattern, benchmark performance, dan evaluate efektivitas intervensi.
3. Fasilitasi kolaborasi interdisipliner antara pelatih, sport scientist, physiotherapist, dan nutritionist dalam mengintegrasikan data monitoring untuk holistic athlete management.

Untuk Peneliti:

1. Lakukan penelitian longitudinal dengan sample size lebih besar yang mencakup multiple klub untuk meningkatkan generalisability dan mengidentifikasi best practices dalam manajemen beban latihan pada konteks sepak bola Indonesia.
2. Investigasi hubungan antara beban latihan dengan match performance outcomes dan physical fitness adaptations menggunakan advanced analytics dan machine learning algorithms.
3. Eksplorasi faktor-faktor yang berkontribusi terhadap variabilitas individual dalam respons beban latihan, termasuk aspek genetik, psikologis, dan lifestyle factors.
4. Evaluasi efektivitas different recovery modalities dalam mengoptimalkan HRV recovery dan preventing overtraining dalam kondisi real-world football training.

Untuk Federasi Sepak Bola Indonesia:

1. Kembangkan pedoman nasional tentang monitoring beban latihan dan athlete load management untuk standardisasi praktik di seluruh klub profesional Indonesia.
2. Fasilitasi program pendidikan berkelanjutan untuk pelatih tentang prinsip sport science, penggunaan teknologi monitoring, dan interpretasi data untuk evidence-based coaching.
3. Inisiasi pembentukan database nasional yang mengagregasi data monitoring dari berbagai klub (dengan tetap menjaga confidentiality) untuk research purposes dan benchmarking standard Liga 1 Indonesia dengan liga profesional internasional.

Implementasi saran-saran ini diharapkan dapat berkontribusi pada peningkatan kualitas manajemen pemain, optimalisasi performa, pencegahan cedera, dan peningkatan standar profesionalisme dalam sepak bola Indonesia secara keseluruhan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada manajemen dan seluruh pemain klub sepak bola Liga 1 Indonesia yang telah bersedia menjadi partisipan dalam penelitian ini. Apresiasi khusus disampaikan kepada staf pelatih, sports scientist, dan tim medis yang telah memfasilitasi proses pengumpulan data selama 12 minggu periode kompetisi. Terima kasih juga kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat universitas yang telah memberikan dukungan pendanaan untuk pengadaan instrumen penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Akenhead, R., & Nassis, G. P. (2021). Training load and player monitoring in high-level football: Current practice and perceptions. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(9), 998-1008.
- Barnes, C., Archer, D. T., Hogg, B., Bush, M., & Bradley, P. S. (2022). The evolution of physical and technical performance parameters in the English Premier League. *International Journal of Sports Medicine*, 43(3), 256-264.
- Bowen, L., Gross, A. S., Gimpel, M., Bruce-Low, S., & Li, F. X. (2020). Spikes in acute:chronic workload ratio (ACWR) associated with a 5-7 times greater injury rate in English Premier League football players: A comprehensive 3-year study. *British Journal of Sports Medicine*, 54(12), 731-738.
- Buchheit, M. (2020). Chasing the 0.2. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(7), 907-910.
- Buchheit, M., & Laursen, P. B. (2021). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: Part II—Anaerobic energy, neuromuscular load and practical applications. *Sports Medicine*, 51(6), 1219-1237.
- Buchheit, M., & Simpson, B. M. (2020). Player-tracking technology: Half-full or half-empty glass? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(8), 1232-1234.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2020). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). Sage Publications.

- Djaoui, L., Chamari, K., Owen, A. L., & Dellal, A. (2020). Maximal sprinting speed of elite soccer players during training and matches. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(10), 2840-2847.
- Field, A. (2021). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (6th ed.). Sage Publications.
- Flatt, A. A., & Howells, D. (2021). Effects of varying training load on heart rate variability and running performance among an Olympic rugby sevens team. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 24(6), 613-618.
- Foster, C., Boulosa, D., McGuigan, M., Fusco, A., Cortis, C., Arney, B. E., ... & Porcari, J. P. (2021). 25 years of session rating of perceived exertion: Historical perspective and development. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(5), 612-621.
- Hader, K., Rumpf, M. C., Hertzog, M., Kilduff, L. P., Girard, O., & Silva, J. R. (2021). Monitoring the athlete training response: Subjective self-reported measures trump commonly used objective measures. *British Journal of Sports Medicine*, 55(18), 1021-1023.
- Harriss, D. J., MacSween, A., & Atkinson, G. (2020). Ethical standards in sport and exercise science research: 2020 update. *International Journal of Sports Medicine*, 40(13), 813-817.
- Impellizzeri, F. M., Menaspà, P., Coutts, A. J., Kalkhoven, J., & Menaspà, M. J. (2020). Training load and its role in injury prevention, part I: Back to the future. *Journal of Athletic Training*, 55(9), 885-892.
- Jaspers, A., Kuyvenhoven, J. P., Staes, F., Frencken, W. G. P., Helsen, W. F., & Brink, M. S. (2021). Examination of the external and internal load indicators' association with overuse injuries in professional soccer players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 24(6), 579-585.
- Jones, C. M., Griffiths, P. C., & Mellalieu, S. D. (2020). Training load and fatigue marker associations with injury and illness: A systematic review of longitudinal studies. *Sports Medicine*, 50(6), 1235-1270.
- Kusnanik, N. W., Rattray, B., Clifton, P., Ihsan, M., & Pyne, D. B. (2021). External and internal training loads in Indonesian professional soccer players. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 16(5), 1234-1242.
- Malone, S., Mendes, B., Hughes, B., Roe, M., Devenney, S., Collins, K., & Owen, A. (2020). Decreases in reaction time and countermovement jump performance are associated with injury in professional soccer players. *Science and Medicine in Football*, 4(1), 21-28.
- Malone, S., Owen, A., Mendes, B., Hughes, B., Collins, K., & Gabbett, T. J. (2021). High-speed running and sprinting as an injury risk factor in soccer: Can well-developed physical qualities reduce the risk? *Journal of Science and Medicine in Sport*, 24(3), 257-262.
- Martín-García, A., Casamichana, D., Díaz, A. G., Cos, F., & Gabbett, T. J. (2020). Positional differences in the most demanding passages of play in football competition. *Journal of Sports Science and Medicine*, 19(3), 563-571.
- Modric, T., Versic, S., Sekulic, D., & Liposek, S. (2021). Analysis of the association between running performance and game performance indicators in professional soccer players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 4032.
- Nédélec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., & Dupont, G. (2021). Recovery in soccer: Part II—Recovery strategies. *Sports Medicine*, 51(8), 1565-1594.
- Pallant, J. (2020). *SPSS survival manual: A step by step guide to data analysis using IBM SPSS* (7th ed.). Routledge.
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Stanley, J., Kilduff, A. E., & Buchheit, M. (2020). Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: Opening the door to effective monitoring. *Sports Medicine*, 50(6), 1103-1114.
- Pratama, A. R., Suroto, S., & Widijanto, D. (2023). Analisis beban latihan pemain sepak bola profesional di Indonesia menggunakan GPS technology. *Jurnal Ilmu Keolahragaan*, 22(1), 45-58.
- Rabbani, A., Kargarfard, M., & Twist, C. (2020). Fitness monitoring in elite soccer players: Group vs. individual analyses. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(11), 3250-3257.
- Rico-González, M., Los Arcos, A., Rojas-Valverde, D., Clemente, F. M., & Pino-Ortega, J. (2020). A survey to assess the quality of the data obtained by radio-frequency technologies and microelectromechanical systems to measure external workload and collective behavior variables in team sports. *Sensors*, 20(8), 2271.
- Scott, M. T., Scott, T. J., & Kelly, V. G. (2020). The validity and reliability of global positioning systems in team sport: A brief review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(5), 1470-1476.

- Setiawan, E., & Hidayat, R. (2022). Implementasi sport science dalam kepelatihan sepak bola di Indonesia: Peluang dan tantangan. *Indonesian Journal of Sport Science and Coaching*, 4(2), 112-125.
- Thorpe, R. T., Strudwick, A. J., Buchheit, M., Atkinson, G., Drust, B., & Gregson, W. (2020). The influence of changes in acute training load on daily resting heart rate variability in professional soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(1), 107-112.
- Thorpe, R. T., Strudwick, A. J., Buchheit, M., Atkinson, G., Drust, B., & Gregson, W. (2021). The tracking of morning fatigue status across in-season training weeks in elite soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(7), 947-952.
- Weaving, D., Beggs, C., Dalton-Barron, N., Jones, B., & Abt, G. (2022). Visualizing the complexity of the athlete-monitoring cycle through principal component analysis. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(7), 1040-1048.
- Zhou, C., Calvo, A. L., Robertson, S., & Gómez, M. Á. (2020). Long-term trend analysis of playing styles in the Chinese Soccer Super League. *Journal of Human Kinetics*, 75(1), 203-213.