

Pekerjaan fisik eksternal yang dipantau oleh perangkat wearable (GPS/GNSS/IMU) dan cedera otot pada anggota tubuh bawah dalam sepak bola: Tinjauan sistematis dan meta-analisis

Yulingga Nanda Hanief^{f1abcde*}, Sri Sumartiningsih^{2abc}, Setya Rahayu^{3abc}, Karol Jaskulski^{4abc}, Hadi^{5ac}, Abi Fajar Fathoni^{6ac}, Zackary S. Cicone^{7ab}, Raja Mohammed Firhad Raja Azidin^{8ab}, Awang Firmansyah^{9cd}

Universitas Negeri Semarang, Indonesia¹

Universitas Negeri Semarang, Indonesia²

Universitas Negeri Semarang, Indonesia³

Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Poland⁴

Universitas Negeri Semarang, Indonesia⁵

Universitas Negeri Semarang, Indonesia⁶

The University of Alabama, United States⁷

MARA University of Technology, Malaysia⁸

Universitas Negeri Surabaya, Indonesia⁹

ABSTRAK

Cedera otot pada anggota tubuh bawah umum terjadi dalam sepak bola dan sering dikaitkan dengan fluktuasi beban latihan. Pemantauan beban kerja eksternal berbasis GPS/GNSS dan IMU kini menjadi rutin, namun bukti mengenai hubungannya dengan risiko cedera masih tidak konsisten. Tinjauan ini bertujuan untuk mensintesis bukti terkini mengenai hubungan antara variabel beban kerja yang dihasilkan dari GPS/IMU dan cedera otot pada anggota tubuh bawah pada pemain sepak bola. Mengikuti pedoman PRISMA, kami melakukan pencarian di PubMed dan Scopus hingga September 2025. Studi yang memenuhi syarat melibatkan pemain sepak bola di semua level kompetisi, melaporkan metrik beban kerja berbasis GPS/IMU, dan mencakup hasil cedera otot. Kualitas studi dievaluasi menggunakan Skala Newcastle–Ottawa. Cedera otot pada anggota tubuh bawah umum terjadi dalam sepak bola dan sering dikaitkan dengan fluktuasi beban latihan. Pemantauan beban kerja eksternal berbasis GPS/GNSS dan IMU kini menjadi rutin, namun bukti mengenai hubungannya dengan risiko cedera masih tidak konsisten. Tinjauan ini bertujuan untuk mensintesis bukti terkini mengenai hubungan antara variabel beban kerja yang dihasilkan dari GPS/IMU dan cedera otot pada anggota tubuh bawah pada pemain sepak bola. Mengikuti pedoman PRISMA, kami melakukan pencarian di PubMed dan Scopus hingga September 2025. Studi yang memenuhi syarat melibatkan pemain sepak bola di semua level kompetisi, melaporkan metrik beban kerja berbasis GPS/IMU, dan mencakup hasil cedera otot. Kualitas studi dievaluasi menggunakan Skala Newcastle–Ottawa. Dua belas studi memenuhi kriteria inklusi untuk sintesis kualitatif; namun, hanya empat studi yang menyediakan data statistik yang dapat diekstraksi untuk penggabungan kuantitatif. Keempat studi ini menyumbang 21 perbandingan ukuran efek independen, dianalisis sebagai rasio peluang (OR) atau risiko relatif (RR). Definisi dan ambang batas beban kerja bervariasi secara signifikan antar studi—terutama zona kecepatan, metrik sprint, dan perhitungan ACWR—membatasi perbandingan langsung. Meta-analisis berbasis OR (dari dua studi) menunjukkan tidak ada hubungan signifikan antara beban kerja tinggi dan risiko cedera (OR gabungan = 1,33, 95% CI 0,85–2,07; $p = 0,21$; $I^2 = 93\%$). Sebaliknya, meta-analisis berbasis RR (dari dua studi) menunjukkan hubungan yang signifikan, dengan beban kerja tinggi lebih dari dua kali lipat risiko cedera (RR gabungan = 2,33, 95% CI 1,65–3,30; $p <$

0,00001; $I^2 = 0\%$). Mengingat jumlah studi yang dapat diekstraksi terbatas dan heterogenitas yang signifikan dalam definisi beban kerja, temuan ini sebaiknya diinterpretasikan sebagai eksploratif rather than konfirmasi. Beban kerja eksternal yang dipantau dengan GPS/IMU mungkin terkait dengan risiko cedera otot, tetapi arah dan magnitudenya bergantung pada pendekatan analitis dan bagaimana “beban kerja tinggi” dioperasionalkan. Studi prospektif berskala besar dengan definisi beban kerja yang standar diperlukan untuk memperkuat dasar bukti.

Kata Kunci: Beban kerja eksternal; sepak bola; pemantauan GPS; pemantauan IMU; cedera otot; tinjauan sistematis.

Kontribusi Penulis: a – Desain Studi; b – Pengumpulan Data; c – Analisis Statistik; d – Penyiapan Naskah; e – Pengumpulan Dana

PENDAHULUAN

Cedera otot pada anggota tubuh bawah merupakan salah satu masalah kesehatan yang paling umum terjadi dalam sepak bola (Ferdinand dkk., 2025; Nilsson dkk., 2023; Nobari dkk., 2021, 2022). Cedera ini mengurangi performa di lapangan dan menyebabkan absen jangka pendek maupun jangka panjang, yang berdampak pada kelangsungan tim dan hasil pertandingan (Fanchini dkk., 2018; Windt dkk., 2018). Tingginya insiden cedera otot menjadikan masalah ini sebagai perhatian serius dalam bidang kedokteran olahraga dan manajemen performa atlet.

Salah satu faktor yang diyakini berkontribusi terhadap cedera adalah beban latihan. Beban fisik dari latihan dan kompetisi, yang disebut beban latihan, didefinisikan sebagai ‘stres kumulatif yang ditimbulkan pada individu dari sesi latihan dan pertandingan selama periode waktu tertentu’ (Zumeta-Olaskoaga dkk., 2025). Beban latihan umumnya merupakan hasil dari intensitas dan durasi latihan, dan penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban latihan terkait dengan peningkatan frekuensi dan keparahan cedera (Georgiadis dkk., 2024; Sumartiningsih dkk., 2022). Beban latihan yang berlebihan, tidak proporsional, atau dikelola dengan buruk dapat meningkatkan risiko cedera otot pada anggota tubuh bawah (Carling dkk., 2018; Windt dkk., 2017; Windt & Gabbett, 2017). Oleh karena itu, pemantauan dan pengelolaan beban latihan sangat penting dalam mencegah cedera dan mengoptimalkan kinerja pemain.

Kemajuan teknologi terbaru telah memudahkan pemantauan rutin indikator kinerja atlet. Dalam sepak bola profesional, sistem penentuan posisi lokal (LPS), sistem navigasi satelit global (GNSS; umumnya GPS), dan unit pengukuran inersia (IMU) digunakan untuk mengukur beban eksternal. LPS dan GPS digunakan untuk mengukur jarak yang ditempuh pada zona kecepatan berbeda (misalnya jarak lari kecepatan tinggi atau HSRD), atau jumlah perubahan kecepatan (misalnya percepatan (ACC)). Sementara itu, IMU merekam dinamika gerakan dan memperkirakan beban mekanis yang ditimbulkan selama latihan dan pertandingan. Sistem-sistem ini kini menjadi standar untuk pemantauan beban eksternal secara real-time dan mendukung pengambilan keputusan dalam latihan sehari-hari (Colby et al., 2014; de Dios-Álvarez et al., 2023; Piłka et al., 2023; Saberisani et al., 2025). Data yang dikumpulkan meliputi jarak, kecepatan, sprint, percepatan-perlambatan, dan output daya.

Dalam praktiknya, beberapa variabel kunci digunakan untuk mengevaluasi beban eksternal, termasuk jarak total, lari dengan kecepatan tinggi, jarak sprint, jumlah percepatan-perlambatan, dan rasio beban kerja akut:kronis (ACWR) (Buchheit et al., 2021; Clemente et al., 2021; Colby dkk., 2014; Fousekis dkk., 2025; Georgiadis dkk., 2024). Variabel-variabel ini menggambarkan intensitas dan distribusi beban latihan, yang mungkin terkait dengan risiko cedera.

Namun, definisi operasional dari metrik beban latihan ini bervariasi secara signifikan antar studi. Ambang batas kecepatan untuk lari berkecepatan tinggi dan sprint berbeda secara signifikan antar tim dan sistem pelacakan, dan ACWR dihitung menggunakan rumus-rumus yang tidak setara. Demikian pula, percepatan, deselerasi, dan variabel sprint didefinisikan secara tidak konsisten di seluruh literatur. Ketidakstandarisan ini telah menciptakan heterogenitas yang signifikan dalam cara "beban latihan" didefinisikan dan diukur, yang berkontribusi pada temuan yang tidak konsisten mengenai hubungannya dengan risiko cedera.

Namun, hingga saat ini belum ada tinjauan sistematis atau meta-analisis yang secara khusus fokus pada hubungan antara variabel beban latihan yang dihasilkan dari GPS/GNSS/IMU dan cedera otot ekstremitas bawah pada pemain sepak bola. Kekosongan ini cukup signifikan karena, meskipun teknologi pemantauan kini menjadi standar dalam praktik profesional, bukti ilmiah yang mendukung penggunaannya dalam pencegahan cedera masih terbatas dan terfragmentasi. Studi ini bertujuan untuk mensintesis secara sistematis temuan observasional mengenai hubungan antara variabel beban latihan berbasis GPS dan risiko cedera otot ekstremitas bawah pada pemain sepak bola. Hasilnya diharapkan dapat memberikan pemahaman ilmiah yang lebih komprehensif dan memberikan wawasan praktis bagi pelatih, staf medis, dan manajer kinerja dalam mengembangkan strategi pencegahan cedera yang didukung oleh teknologi pemantauan beban latihan.

Mengingat variasi yang signifikan dalam definisi beban kerja dan pendekatan analitis antar studi, sintesis sistematis diperlukan untuk mengklarifikasi bukti saat ini dan menilai sejauh mana kesimpulan yang bermakna dapat ditarik.

METODE

Strategi Pencarian

Pencarian literatur komprehensif dilakukan di basis data Scopus dan PubMed untuk mengidentifikasi studi-studi relevan yang mengkaji hubungan antara beban kerja yang dipantau GPS dan cedera otot ekstremitas bawah pada pemain sepak bola. Pencarian yang dilakukan hingga 4 September 2025 tidak membatasi tahun publikasi, menggunakan kombinasi istilah terkontrol dan istilah teks bebas. Istilah pencarian mencakup kata kunci terkait olahraga ("soccer," "football"), monitoring technologies ("GPS," "GNSS," "local positioning system," "wearable tracking"), variabel beban kerja ("training load," "external load," "acute: chronic workload ratio," "high-speed running," "sprint distance," "acceleration," "deceleration," "distance covered"), dan hasil cedera ("muscle injury," "hamstring injury," "quadriceps injury," "adductor injury," "calf injury," "lower-limb injury," "time-loss injury," "injury incidence," "injury risk," "injury occurrence"). Desain studi yang memenuhi syarat meliputi studi kohort, longitudinal, prospektif, observasional, dan uji klinis terkontrol acak. Hanya artikel yang telah direview oleh rekan sejawat, berbahasa Inggris, dan terindeks di PubMed dan Scopus yang memenuhi syarat. Daftar referensi dari studi yang disertakan juga diperiksa untuk mengidentifikasi publikasi relevan tambahan yang tidak ditemukan melalui pencarian basis data.

Pemilihan Studi dan Kriteria Kelayakan

Pencarian awal menghasilkan 100 catatan (Scopus = 70; PubMed = 30). Setelah menghapus duplikat, 70 artikel unik disaring berdasarkan judul dan abstrak. Dari jumlah tersebut, 33 artikel dikecualikan karena tidak memenuhi kriteria inklusi (misalnya, populasi yang tidak

relevan, GPS tidak digunakan untuk pemantauan beban kerja, atau hasil yang tidak terkait dengan cedera). Teks lengkap 37 artikel dievaluasi untuk kelayakan, dan 25 studi dikecualikan karena alasan berikut: tidak ada data beban kerja GPS ($n = 9$), tidak ada hasil cedera yang dilaporkan ($n = 5$), atau desain studi yang tidak tepat (bukan RCT, kohort, kasus-kontrol, atau observasional longitudinal; $n = 11$). Akhirnya, 12 artikel memenuhi semua kriteria kelayakan dan dimasukkan dalam sintesis kualitatif. Dari jumlah tersebut, empat artikel menyediakan informasi statistik yang cukup untuk sintesis kuantitatif. Karena beberapa studi melaporkan ukuran efek yang beragam (misalnya, Malone dkk., 2018: enam hasil; Jaspers dkk., 2018: sembilan hasil; Nobari dkk., 2021: empat hasil; Nobari dkk., 2022: dua hasil), meta-analisis mencakup total 21 perbandingan independen (15 berbasis OR dan 6 berbasis RR), yang dianalisis sesuai dengan ukuran efek yang dilaporkan. Ulasan ini mengikuti pedoman PRISMA untuk ulasan sistematis dan meta-analisis, dan protokolnya telah didaftarkan secara prospektif di PROSPERO (CRD420251146818). Diagram alur PRISMA (Gambar 1) merangkum proses seleksi studi. Ketika informasi statistik kritis tidak tersedia, penulis koresponden dihubungi (hingga tiga kali) untuk meminta data tambahan. Studi yang tetap tidak lengkap dikecualikan dari sintesis kuantitatif tetapi dijelaskan secara naratif. Kriteria kelayakan didefinisikan menggunakan kerangka kerja PICOS. Populasi (P) mencakup pemain sepak bola pria dan wanita dari semua tingkat kompetisi (profesional, semi-profesional, akademi, dan pemuda). Paparan (I) mencakup variabel beban kerja yang diukur dengan teknologi GPS/IMU, termasuk jarak total, jarak lari berkecepatan tinggi, jarak sprint, percepatan/perlambatan, ACWR, dan beban pemain. Perbandingan (C) mencakup pemain cedera versus tidak cedera, atau kelompok yang terpapar tingkat beban kerja yang berbeda (misalnya, beban tinggi versus rendah). Hasil (O) adalah cedera otot ekstremitas bawah (hamstring, quadriceps, adductor, betis), diukur berdasarkan insidensi, kekambuhan, dan cedera yang menyebabkan kehilangan waktu. Desain studi yang memenuhi syarat (S) adalah studi primer seperti uji coba terkontrol acak (RCT), kohort, kasus-kontrol, dan studi observasional longitudinal. Meskipun 12 studi memenuhi kriteria kelayakan dan dimasukkan dalam sintesis kualitatif, hanya 4 studi yang menyediakan data numerik yang dapat diekstraksi (misalnya, rasio peluang, risiko relatif, atau jumlah cedera mentah) yang cocok untuk penggabungan kuantitatif. Studi-studi lainnya tidak memiliki perkiraan efek yang kompatibel atau melaporkan variabel beban kerja menggunakan format yang tidak dapat dibandingkan.

Definisi dan Klasifikasi Variabel Beban Kerja

Variabel beban kerja yang dilaporkan dalam studi-studi yang disertakan sangat heterogen dalam definisi, ambang batas, dan metode perhitungan. Untuk memudahkan sintesis yang transparan, kami mengelompokkan metrik beban kerja ke dalam kategori konseptual yang lebih luas berdasarkan karakteristik fisiologis dan mekanisnya. Jarak total, jarak lari berkecepatan tinggi, dan jarak sprint diklasifikasikan sebagai “metrik berbasis jarak lokomotor.” Akselerasi, deselerasi, dan aksi perubahan arah dikategorikan sebagai “metrik berbasis akselerometri.” Variabel rasio beban kerja akut:kronis (ACWR) dikelompokkan terpisah karena struktur temporalnya yang unik dan penggunaan metode perhitungan yang tidak setara (misalnya, rata-rata bergerak versus model berbasis EWMA). Kategorisasi ini digunakan untuk membimbing perbandingan naratif dan menghindari penggabungan variabel yang secara konseptual tidak kompatibel dalam meta-analisis.

Karakteristik Studi

Dua peneliti (YNH dan SS) secara independen mengekstrak data menggunakan formulir yang telah ditentukan sebelumnya. Variabel yang dikumpulkan meliputi: ciri-ciri studi, jenis populasi, teknologi GPS/IMU, definisi cedera, ukuran sampel, dan nilai ukuran efek (OR, RR, HR) dengan interval kepercayaan 95% (CI) atau data mentah. Ketidaksepakatan diselesaikan melalui diskusi, dan peninjau ketiga (SR) dikonsultasikan jika diperlukan. Keterandalan antarpemilai dihitung (Cohen's κ /ICC). Untuk penilaian kualitas NOS, keterandalan antarpemilai baik (ICC = 0.84, 95% CI).

Penilaian Kualitas Metodologis

Dua penulis secara independen menilai kualitas metodologis studi yang disertakan menggunakan kriteria yang diadaptasi dari Skala Newcastle–Ottawa (NOS) untuk desain kohort dan observasional. Penilaian berfokus pada tiga domain: (1) pemilihan peserta dan pengukuran paparan (misalnya, kejelasan populasi sepak bola, validitas perangkat GPS); (2) kesesuaian kelompok (misalnya, penyesuaian terhadap faktor pengganggu potensial seperti usia, posisi bermain, atau paparan pertandingan); dan (3) penilaian hasil (misalnya, definisi cedera otot, konfirmasi objektif, dan kecukupan tindak lanjut). Setiap studi menerima penilaian risiko bias (rendah, sedang, atau tinggi). Ketidaksepakatan diselesaikan melalui diskusi hingga tercapai kesepakatan. NOS dipilih karena sebagian besar studi yang termasuk menggunakan desain kohort observasional, dan kriteria disesuaikan dengan konteks cedera olahraga.

Gambar 1 menunjukkan diagram alur PRISMA untuk seleksi studi. Pencarian awal di dua basis data mengidentifikasi 100 catatan (Scopus, 70; PubMed, 30). Setelah penghilangan duplikat, tersisa 70 catatan unik untuk penyaringan. Setelah penyaringan judul dan abstrak, 33 catatan dikecualikan, meninggalkan 37 artikel teks lengkap untuk penilaian kelayakan. Dari jumlah tersebut, 25 dikecualikan karena kurangnya data beban kerja GPS ($n = 9$), ketidakhadiran hasil cedera ($n = 5$), atau desain studi yang tidak memenuhi syarat ($n = 11$). Akibatnya, 12 studi memenuhi semua kriteria dan dimasukkan dalam sintesis kualitatif dan penilaian kualitas metodologis.

Kualitas metodologis dari 12 studi ini dievaluasi menggunakan Skala Newcastle–Ottawa (NOS). Secara keseluruhan, studi-studi tersebut menunjukkan kualitas yang dapat diterima, dengan skor berkisar antara 5 hingga 8. Berdasarkan penilaian, lima studi dikategorikan sebagai risiko bias rendah, enam sebagai moderat, dan satu sebagai tinggi. Rincian penilaian disajikan dalam Tabel 2.

Sebagian besar studi dinilai memiliki kualitas metodologis sedang, terutama karena ukuran sampel yang terbatas, desain studi yang dilakukan oleh satu tim, dan kurangnya penyesuaian terhadap variabel pengganggu. Meskipun demikian, semua artikel yang disertakan menggunakan pemantauan cedera prospektif atau longitudinal dan menggunakan perangkat GPS atau GNSS yang tervalidasi, yang mendukung keandalan pengukuran beban kerja dan cedera. Perbedaan penilaian kualitas antara pemilai diselesaikan melalui diskusi hingga tercapai kesepakatan.

Sebagian besar studi dinilai memiliki kualitas moderat, terutama karena ukuran sampel yang kecil, desain studi yang melibatkan satu tim, dan penyesuaian yang terbatas terhadap faktor pengganggu potensial. Namun, penggunaan perangkat GPS/GNSS yang tervalidasi dan definisi cedera yang standar memperkuat ketatnya metodologi di seluruh studi. Keandalan antarpemilai dalam penilaian NOS baik (ICC = 0.84, 95% CI).

Hasil Studi dan Perhitungan Ukuran Efek

Hasil utama adalah insiden cedera otot pada anggota tubuh bawah pada pemain sepak bola, termasuk cedera hamstring, quadriceps, adductor, dan betis, serta kategori gabungan cedera otot non-kontak dan cedera akibat kelebihan beban. Hanya studi yang melaporkan hasil sesuai dengan definisi konsensus yang telah ditetapkan (misalnya, kriteria kehilangan waktu atau perawatan medis) yang dimasukkan. Variabel paparan meliputi metrik beban latihan yang diperoleh dari perangkat GPS/GNSS dan IMU, termasuk jarak total, jarak lari berkecepatan tinggi, jarak sprint, percepatan dan deselerasi, beban kerja akut mingguan, rata-rata beban kerja kronis empat minggu, ACWR, dan indeks komposit seperti beban pemain.

Untuk meta-analisis, studi dianggap memenuhi syarat jika menyediakan informasi statistik yang cukup (rasio peluang [OR], risiko relatif [RR], rasio bahaya [HR]), atau data mentah yang memungkinkan konversi ke ukuran efek. OR dan RR yang dilaporkan diekstraksi secara langsung, dan jika interval kepercayaan 95% (CI) tersedia, rasio odds logaritmik ($\log OR$) dan kesalahan standar (SE) dihitung menggunakan rumus standar. Jika hanya HR yang dilaporkan, mereka disintesis secara kualitatif tetapi tidak digabungkan. Log odds ratio dihitung sebagai $\log OR = \ln(OR)$, sementara kesalahan standar diperoleh dari interval kepercayaan 95% menggunakan rumus $SE_{\log OR} = (\ln[upper_CI] - \ln[lower_CI]) / (2 \times 1.96)$, dan varians sebagai $vi = SE_{\log OR}^2$ (\ln menandakan logaritma alami).

Ukuran efek digabungkan menggunakan model efek acak untuk memperhitungkan heterogenitas antarstudi. Analisis subkelompok direncanakan untuk membandingkan cedera non-kontak dan cedera akibat penggunaan berlebihan; namun, karena jumlah studi yang terbatas, perbandingan ini diinterpretasikan secara naratif daripada digabungkan. Heterogenitas dievaluasi menggunakan Cochran's Q (χ^2), τ^2 , dan I^2 , sedangkan bias publikasi dievaluasi secara visual menggunakan diagram funnel. Sintesis kuantitatif dilakukan menggunakan Review Manager (RevMan, versi 5.4; Cochrane Collaboration, London, Inggris). RevMan menghasilkan diagram hutan yang menampilkan perkiraan studi individu ($\log(OR)$ atau $\log(RR)$), kesalahan standar, dan bobot studi, bersama dengan ukuran efek gabungan beserta interval kepercayaan 95%, yang menggambarkan konsistensi antar studi. Statistik heterogenitas (τ^2 , χ^2 , dan I^2) serta uji efek keseluruhan (statistik Z dan nilai p) juga dihasilkan. Sesuai dengan pedoman PRISMA, diagram hutan diekspor langsung dari RevMan dan dimasukkan ke dalam Bagian Hasil.

Analisis Sekunder

Analisis sekunder dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan efek gabungan. Bias publikasi dievaluasi secara visual menggunakan diagram funnel; namun, karena kurang dari sepuluh studi termasuk dalam meta-analisis, interpretasi ketidakseimbangan apa pun terbatas. Analisis sensitivitas (misalnya, prosedur leave-one-out) dan uji statistik formal (misalnya, uji regresi Egger, interval prediksi) awalnya direncanakan tetapi tidak dilakukan karena jumlah studi yang memenuhi syarat terlalu sedikit. Oleh karena itu, hasil analisis sekunder harus diinterpretasikan dengan hati-hati. Semua analisis menggunakan Review Manager (RevMan, versi 5.4; Cochrane Collaboration, London, Inggris).

Karena studi-studi yang dapat diekstraksi melaporkan estimasi efek menggunakan ukuran statistik yang berbeda (rasio peluang vs. risiko relatif), penggabungan data dilakukan secara terpisah untuk hasil berbasis OR dan RR. Konversi OR ke RR dihindari karena asumsi risiko dasar yang diperlukan tidak dapat dipenuhi mengingat heterogenitas antar studi. Oleh karena

itu, dua meta-analisis independen dilakukan, dan temuan-temuan tersebut diinterpretasikan dengan hati-hati karena jumlah studi yang tersedia terbatas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Empat studi dimasukkan dalam sintesis kuantitatif. Meskipun dua belas studi memenuhi syarat untuk dimasukkan dalam sintesis kualitatif, hanya empat studi (dua melaporkan rasio peluang dan dua melaporkan risiko relatif) yang menyediakan data numerik yang dapat diekstraksi dan sesuai untuk penggabungan kuantitatif. Data terbatas ini harus dipertimbangkan saat menafsirkan perkiraan gabungan. Karena beberapa studi melaporkan ukuran efek yang berbeda (misalnya, Malone dkk., 2018: enam; Jaspers dkk., 2018: sembilan; Nobari dkk., 2021: empat; Nobari dkk., 2022: dua), meta-analisis didasarkan pada 21 perbandingan independen (15 berdasarkan OR, 6 berdasarkan RR). Studi-studi tersebut bervariasi dalam ukuran sampel, tingkat kompetisi, dan pengukuran paparan, tetapi semua memenuhi kriteria kelayakan dan menyediakan informasi statistik yang cukup untuk penggabungan. Kualitas metodologis studi yang disertakan bervariasi dari rendah hingga tinggi, dengan sebagian besar dinilai moderat (Tabel 2).

Karena studi yang dapat diekstraksi menggunakan metrik ukuran efek yang berbeda (OR vs. RR), dua meta-analisis independen dilakukan. Hasil berbasis OR dan RR diinterpretasikan secara terpisah untuk menghindari penggabungan perkiraan yang secara konseptual tidak kompatibel. Sebuah meta-analisis terhadap studi yang melaporkan rasio peluang (OR) (Jaspers et al., 2018; Malone et al., 2018) menunjukkan tidak ada hubungan yang signifikan antara beban latihan tinggi dan peningkatan risiko cedera otot ekstremitas bawah (OR gabungan = 1,33; 95% CI [0,85–2,07], $p = 0,21$). Perkiraan spesifik studi antara studi bervariasi secara signifikan (OR berkisar antara 0,12 hingga 6,11), mencerminkan perbedaan dalam definisi beban kerja seperti jarak sprint, lari berkecepatan tinggi, RPE sesi, dan jarak total. Heterogenitas antar studi sangat tinggi ($\text{Tau}^2 = 0,69$, $\text{Chi}^2 = 192,56$, $p < 0,00001$, $I^2 = 93\%$), menunjukkan ketidakkonsistenan hasil studi. Meskipun demikian, meskipun beberapa indikator beban latihan menunjukkan risiko cedera yang lebih tinggi, efek gabungan tidak mencapai signifikansi statistik. Perlu juga dicatat bahwa meskipun jumlah hasil yang dianalisis relatif besar (15 perbandingan berdasarkan OR), hasil ini berasal dari hanya dua studi asli. Dasar studi yang terbatas ini mengurangi ketahanan temuan dan meningkatkan risiko bias, sehingga memerlukan interpretasi yang hati-hati.

Sebaliknya, studi yang melaporkan rasio risiko (RR) (Nobari dkk., 2021, 2022) menunjukkan hubungan yang konsisten dan kuat antara beban kerja yang lebih tinggi dan risiko cedera (RR gabungan = 2,33; 95% CI [1,65–3,30], $p < 0,00001$; $I^2 = 0\%$; Gambar 2b). Temuan ini menunjukkan bahwa atlet yang terpapar beban kerja yang lebih tinggi memiliki risiko cedera lebih dari dua kali lipat dibandingkan dengan mereka yang terpapar beban kerja yang lebih rendah. Perkiraan risiko juga tampak lebih tinggi untuk cedera non-kontak dibandingkan dengan cedera akibat kelebihan beban berdasarkan hasil studi individu. Namun, penggabungan subkelompok formal tidak dilakukan karena jumlah studi yang sedikit.

Kontras antara analisis OR yang tidak signifikan dan analisis RR yang signifikan kemungkinan mencerminkan perbedaan dalam definisi beban kerja, praktik penetapan ambang batas, dan pemodelan risiko cedera antar studi.

Penilaian visual terhadap diagram corong terbatas karena jumlah studi yang termasuk kurang dari sepuluh. Untuk analisis berbasis rasio risiko (RR) (Gambar 3b), diagram tersebut tampak relatif simetris, menunjukkan potensi rendah untuk bias publikasi dan konsistensi yang wajar antar studi. Sebaliknya, diagram corong berbasis OR (Gambar 3a) tampak asimetris, yang

mungkin mencerminkan heterogenitas antar-studi yang tinggi dan kemungkinan bias publikasi. Asimetri semacam ini dapat terjadi ketika studi-studi kecil dengan temuan signifikan lebih cenderung dipublikasikan daripada yang memiliki hasil tidak signifikan, sehingga mengganggu efek gabungan. Mengingat dasar bukti yang kecil (<10 studi), pola-pola ini harus diinterpretasikan dengan hati-hati dan tidak merupakan bukti kuat adanya bias publikasi.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa hubungan antara variabel beban latihan berbasis GPS dan insiden cedera otot pada anggota tubuh bawah pada pemain sepak bola masih tidak konsisten. Analisis berdasarkan rasio peluang (OR) yang diperoleh dari studi oleh Malone dkk. (2018) dan Jaspers dkk. (2018) menunjukkan tidak ada hubungan yang signifikan antara beban latihan tinggi dan risiko cedera yang meningkat (OR gabungan = 1,33; 95% CI [0,85–2,07]), dan menunjukkan heterogenitas yang sangat tinggi. Sebaliknya, analisis menggunakan rasio risiko (RR) dari studi oleh Nobari dkk. (2021, 2022) menunjukkan hubungan yang kuat dan konsisten, di mana paparan terhadap beban tinggi terkait dengan risiko cedera lebih dari dua kali lipat (RR gabungan = 2,33; 95% CI [1,65–3,30]), serta heterogenitas yang rendah. Temuan yang berbeda ini memerlukan interpretasi yang hati-hati, mengingat dasar bukti yang kecil, variasi dalam definisi beban kerja, dan perbedaan dalam pendekatan statistik.

Salah satu tantangan utama dalam mensintesis bukti saat ini adalah heterogenitas yang signifikan dalam cara beban kerja eksternal didefinisikan dan dioperasionalkan di berbagai studi. Ambang batas kecepatan untuk lari berkecepatan tinggi dan sprint bervariasi secara signifikan antar tim dan sistem pelacakan, variabel berbasis akselerometri tidak memiliki ambang batas yang standar, dan ACWR dihitung menggunakan pendekatan yang tidak setara (misalnya, rata-rata bergerak versus model EWMA). Ketidakkonsistenan ini membatasi keterbandingan metrik beban kerja dan kemungkinan besar berkontribusi pada temuan yang berbeda-beda yang diamati antar studi.

Ketidakkonsistenan antara hasil berbasis OR dan RR kemungkinan mencerminkan perbedaan dalam definisi dan pemilihan indikator beban kerja di setiap studi. Misalnya, Malone dkk. (2018) menekankan lari berkecepatan tinggi (HSR) dan sprinting dengan rentang batas jarak yang bervariasi, sementara Jaspers dkk. (2018) fokus pada jarak total dan RPE sesi. Sebaliknya, Nobari dkk. (2021, 2022) menggunakan beban kerja akut, beban kerja kronis, dan ACWR, dengan penekanan lebih besar pada fluktuasi beban kerja mingguan. Variabel tertentu, seperti HSR, sprint jarak jauh, dan ACWR >1,5, secara konsisten dilaporkan terkait dengan risiko cedera otot yang lebih tinggi (Malone dkk., 2018; Nobari dkk., 2021).

Sebaliknya, beban kerja yang moderat dan kapasitas fisik yang baik dapat bersifat protektif. Misalnya, kapasitas aerobik yang lebih tinggi telah dikaitkan dengan penurunan risiko cedera pada atlet dengan beban latihan yang tinggi (Malone dkk., 2018).

Secara fisiologis, hal ini dapat dijelaskan melalui konsep kelelahan otot dan penumpukan mikrotrauma akibat paparan berulang terhadap sprint, percepatan, dan deselerasi. Paparan terhadap beban berlebihan tanpa pemulihan yang memadai dapat mengurangi kemampuan otot untuk menyerap kekuatan eksternal, meningkatkan risiko kerusakan jaringan (Carling dkk., 2018; Colby dkk., 2014). Sebaliknya, ketika beban yang meningkat diterapkan secara bertahap sesuai dengan kapasitas pemain, adaptasi fisiologis dapat terjadi, mengurangi risiko cedera (Windt & Gabbett, 2017). Secara keseluruhan, hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara beban latihan dan cedera bersifat nonlinier dan bergantung pada keseimbangan antara beban eksternal, kapasitas fisik, dan kualitas pemulihan.

Temuan dalam tinjauan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa lonjakan beban latihan—peningkatan mendadak dalam beban latihan—merupakan prediktor penting cedera pada pemain sepak bola. Misalnya, Colby dkk. (2014) menemukan

bahwa peningkatan mendadak dalam beban lari yang dipantau oleh GPS berkorelasi dengan risiko cedera yang lebih tinggi pada pemain elit.

Temuan serupa dilaporkan oleh Windt dkk. (2018), yang mencatat bahwa hubungan antara beban latihan dan cedera bersifat nonlinier, melainkan dipengaruhi oleh keseimbangan antara paparan beban dan kapasitas adaptasi individu. Carling dkk. (2018) juga mengamati bahwa akumulasi beban tinggi dalam waktu singkat dapat menyebabkan kelelahan neuromuskular dan kerusakan otot yang lebih besar, sehingga meningkatkan risiko cedera jika tidak diimbangi dengan pemulihan yang memadai. Oleh karena itu, meskipun beban latihan yang dipantau GPS dapat menunjukkan risiko, hubungan tersebut tidak selalu linier; hal ini bergantung pada interaksi antara intensitas beban, distribusi, dan kapasitas fisiologis pemain untuk menoleransi beban.

Dalam praktiknya, pemantauan beban latihan menggunakan GPS dapat berfungsi sebagai sistem peringatan bagi pelatih dan tim medis dengan mendeteksi lonjakan beban yang dapat meningkatkan risiko cedera. Informasi ini memungkinkan penyesuaian cepat pada rencana latihan untuk menjaga beban tetap dalam batas toleransi pemain. Manajemen beban harus memprioritaskan pencegahan lonjakan dan penerapan peningkatan bertahap yang sesuai dengan kapasitas fisik individu. Indeks seperti ACWR dapat membantu memantau keseimbangan antara beban akut dan kronis, tetapi tidak boleh digunakan secara terpisah. Faktor individu—seperti usia, posisi bermain, dan riwayat cedera—juga harus dipertimbangkan untuk membuat strategi pencegahan lebih efektif dan menyesuaikan program latihan secara personal.

Keterbatasan Studi

Meskipun tinjauan ini memberikan gambaran umum tentang hubungan antara variabel beban kerja berbasis GPS dan cedera otot ekstremitas bawah, beberapa batasan perlu dipertimbangkan. Dasar bukti kuantitatifnya terbatas: dari dua belas studi yang memenuhi syarat, hanya empat yang menyediakan data numerik yang dapat diekstraksi, yang berkontribusi pada total 21 hasil—kebanyakan berasal dari hanya dua studi primer. Dasar bukti yang terbatas ini mengurangi daya statistik dan stabilitas perkiraan gabungan, membatasi kemungkinan analisis subkelompok atau sensitivitas, dan meningkatkan kerentanan terhadap bias. Selain itu, definisi variabel beban kerja tidak seragam (misalnya, batas kecepatan untuk HSR dan sprinting, rumus ACWR), yang meningkatkan heterogenitas dan menghambat perbandingan langsung. Sebagian besar studi bersifat tunggal klub dengan sampel kecil, membatasi generalisasi, dan bias publikasi tetap mungkin terjadi.

Hasil yang kontras antara analisis berbasis OR dan RR semakin menyoroti pengaruh variabilitas metodologis dan definisi. Analisis meta-analisis OR tidak menunjukkan hubungan yang signifikan dan heterogenitas yang sangat tinggi, sedangkan analisis meta-analisis RR menunjukkan efek yang kuat dan konsisten. Perbedaan ini kemungkinan mencerminkan perbedaan dalam cara “beban kerja tinggi” didefinisikan, model risiko cedera yang digunakan, dan jenis metrik beban kerja yang ditekankan dalam studi-studi yang termasuk. Oleh karena itu, perbedaan dalam metrik ukuran efek tidak boleh diinterpretasikan sebagai temuan yang bertentangan, melainkan sebagai bukti bahwa definisi paparan tidak setara.

Meskipun terdapat batasan-batasan ini, temuan menunjukkan bahwa beban kerja eksternal yang tinggi—terutama ketika diukur melalui metrik GPS/GNSS seperti beban lokomotor jarak jauh atau paparan sprint berulang—dapat meningkatkan risiko cedera otot pada anggota tubuh bawah. Namun, mengingat variasi dalam definisi beban kerja dan jumlah studi yang terbatas, praktisi disarankan untuk menerapkan temuan ini dengan hati-hati dan

memprioritaskan kerangka pemantauan yang disesuaikan secara individual daripada batas beban kerja yang kaku.

Penelitian Masa Depan

Untuk mengatasi keterbatasan ini, penelitian masa depan sebaiknya menggunakan desain multi-klub dan multi-musim dengan sampel yang lebih besar untuk meningkatkan representativitas. Standarisasi definisi dan pengukuran beban latihan—terutama batas kecepatan sprint, HSR, dan ACWR—sangat penting untuk meningkatkan konsistensi antar studi. Selain itu, integrasi beban eksternal (GPS) dengan beban internal (misalnya, detak jantung [HR] dan RPE sesi), bersama dengan faktor individu seperti tingkat kebugaran, riwayat cedera, dan aspek genetik, dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang risiko cedera. Menuju ke depan, pendekatan analitis berbasis machine learning dan pemodelan prediktif (Saberisani dkk., 2025) dapat membantu menghasilkan model yang lebih akurat dan applicable untuk pencegahan cedera dalam sepak bola profesional.

SIMPULAN

Ulasan sistematis dan meta-analisis ini menunjukkan bahwa variabel beban latihan yang dipantau GPS terkait dengan risiko cedera otot ekstremitas bawah pada pemain sepak bola. Namun, bukti yang tersedia terbatas dan tidak sepenuhnya konsisten. Analisis berbasis OR tidak menemukan hubungan yang signifikan, sedangkan analisis berbasis RR menunjukkan peningkatan risiko cedera lebih dari dua kali lipat pada pemain dengan beban latihan tinggi. Hasil yang bertentangan ini menunjukkan bahwa hubungan antara beban latihan dan cedera bersifat nonlinier dan dipengaruhi oleh definisi variabel, metode analitis, serta kapasitas individu pemain. Pemantauan GPS dapat berfungsi sebagai sistem peringatan dini bagi pelatih dan tim medis untuk mengelola beban latihan, dengan menekankan keseimbangan antara progresifitas bertahap dan kapasitas fisik. Namun, jumlah studi yang terbatas, variasi dalam definisi beban kerja, dan sampel yang kecil menyoroti kebutuhan akan penelitian lebih lanjut menggunakan desain multi-klub, variabel standar, dan pendekatan prediktif modern untuk memperkuat dasar bukti.

REFERENCES

1. Buchheit, M., Simpson, B. M., Hader, K., & Lacombe, M. (2021). Occurrences of near-to-maximal speed-running bouts in elite soccer: insights for training prescription and injury mitigation. *Science and Medicine in Football*, 5(2), 105–110. <https://doi.org/10.1080/24733938.2020.1802058>
2. Carling, C., Lacombe, M., McCall, A., Dupont, G., Le Gall, F., Simpson, B., & Buchheit, M. (2018). Monitoring of Post-match Fatigue in Professional Soccer: Welcome to the Real World. *Sports Medicine*, 48(12), 2695–2702. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0935-z>
3. Clemente, F., Silva, R., Arslan, E., Aquino, R., Castillo, D., & Mendes, B. (2021). The effects of congested fixture periods on distance-based workload indices: A full-season study in professional soccer players. *Biology of Sport*, 38(1), 37–44. <https://doi.org/10.5114/biolsport.2020.97068>
4. Colby, M. J., Dawson, B., Heasman, J., Rogalski, B., & Gabbett, T. J. (2014). Accelerometer and GPS-Derived Running Loads and Injury Risk in Elite Australian Footballers. *Journal of Strength*

- and Conditioning Research, 28(8), 2244–2252.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000362>
5. de Dios-Álvarez, V., Suárez-Iglesias, D., Bouzas-Rico, S., Alkain, P., González-Conde, A., & Ayán-Pérez, C. (2023). Relationships between RPE-derived internal training load parameters and GPS-based external training load variables in elite young soccer players. *Research in Sports Medicine*, 31(1), 58–73. <https://doi.org/10.1080/15438627.2021.1937165>
6. Fanchini, M., Rampinini, E., Riggio, M., Coutts, A. J., Pecci, C., & McCall, A. (2018). Despite association, the acute:chronic work load ratio does not predict non-contact injury in elite footballers. *Science and Medicine in Football*, 2(2), 108–114. <https://doi.org/10.1080/24733938.2018.1429014>
7. Ferdinand, L., Hanief, Y. N., & Manimtim, R. M. (2025). Injury pattern and risk factors in grassroots football: A study of 10-year-old athletes. *Sport, Exercise, and Injury*, 1(1), 27–39. <https://doi.org/10.56003/sei.v1i1.512>
8. Fousekis, A., Fousekis, K., Fousekis, G., Gkrilias, P., Michailidis, Y., Mandroukas, A., & Metaxas, T. (2025). Assessment of Injury Risk in Professional Soccer Players: A Long-Term Study. *Applied Sciences*, 15(9), 5039. <https://doi.org/10.3390/app15095039>
9. Georgiadis, G., Van Gaal Appelhof, R., Stoop, R., Peters, J., & Essers, J. (2024). Association between External Load and Injury Incidence in Professional and Elite-Youth Football Players. *Physical Education and Sports: Studies and Research*, 3(1), 10–25. <https://doi.org/10.56003/pessr.v3i1.316>
10. González, J. R., Caceres, A., Ferrer, E., Balagué-Dobón, L., Escriba-Montagut, X., Sarrat-González, D., Quintás, G., & Rodas, G. (2024). Predicting Injuries in Elite Female Football Players With Global-Positioning-System and Multiomics Data. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 19(7), 661–669. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2023-0184>
11. Herazo-Sánchez, R. T., Jiménez-Trujillo, J. O., & González-Palacio, E. V. (2024). Unravelling the Relationship between External Load and the Incidence of Hamstring Injuries in Professional Soccer Players. *Physical Education Theory and Methodology*, 24(2), 224–231. <https://doi.org/10.17309/tmfv.2024.2.05>
12. Jaspers, A., Kuyvenhoven, J. P., Staes, F., Frencken, W. G. P., Helsen, W. F., & Brink, M. S. (2018). Examination of the external and internal load indicators' association with overuse injuries in professional soccer players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(6), 579–585. <https://doi.org/10.1016/j.isams.2017.10.005>
13. Malone, S., Owen, A., Mendes, B., Hughes, B., Collins, K., & Gabbett, T. J. (2018). 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*, 21(3), 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.isams.2017.05.016>
14. Marshall, R. P., Schulze, S., Droste, J.-N., Riepenhof, H., Delank, K.-S., Kurz, E., & Schwesig, R. (2024). Is the Endurance Standardized ACWRHMLD or the Underlying Acute and Chronic Components Related to Injuries? *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/app14209427>
15. Martins, F., Marques, A., França, C., Sarmiento, H., Henriques, R., Ihle, A., de Maio Nascimento, M., Saldanha, C., Przednowek, K., & Gouveia, É. R. (2023). Weekly External Load Performance Effects on Sports Injuries of Male Professional Football Players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph20021121>

16. Morgans, R., Oliveira, R., Ceylan, H. I., Teixeira, J., Ryan, B., Modrić, T., & Moreira, A. (2025). High-intensity running and sprint distance prior to hamstring injury in elite male soccer players. Is there a common theme in over-or under-loading in the weeks preceding hamstring injury? *Journal of Physical Education and Sport*, 25(5), 946–953. <https://doi.org/10.7752/jpes.2025.05103>
17. Nilsson, T., Börjesson, M., Lundblad, M., Ivarsson, A., & Fransson, D. (2023). Injury incidence in male elite youth football players is associated with preceding levels and changes in training load. *BMJ Open Sport and Exercise Medicine*, 9(4). <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2023-001638>
18. Nobari, H., Khalili, S. M., Denche-Zamorano, A. D., Bowman, T. G., & Granacher, U. (2022). Workload is associated with the occurrence of non-contact injuries in professional male soccer players: A pilot study. *Frontiers in Psychology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.925722>
19. Nobari, H., Mainer-Pardos, E., Denche-Zamorano, A. D., Bowman, T. G., Clemente, F. M., & Pérez-Gómez, J. (2021). Sprint variables are associated with the odds ratios of non-contact injuries in professional soccer players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(19). <https://doi.org/10.3390/ijerph181910417>
20. Piłka, T., Grzelak, B., Sadurska, A., Górecki, T., & Dyczkowski, K. (2023). Predicting Injuries in Football Based on Data Collected from GPS-Based Wearable Sensors. *Sensors*, 23(3), 1227. <https://doi.org/10.3390/s23031227>
21. Saberisani, R., Barati, A. H., Zarei, M., Santos, P., Gorouhi, A., Ardigò, L. P., & Nobari, H. (2025). Prediction of football injuries using GPS-based data in Iranian professional football players: a machine learning approach. *Frontiers in Sports and Active Living*, 7. <https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1425180>
22. Soler, A., Agulló, F., Hernández-Davó, J., Raya-González, J., Del Coso, J., González-Ródenas, J., & Moreno-Pérez, V. (2025). Influence of the external workload on calf muscle strain injuries in professional football players: a pilot study. *Sports Health*, 17(1), 175–182.
23. Sumartiningsih, S., Risdiyanto, A., Yusof, A., Rahayu, S., Handoyo, E., Puspita, M. A., Mukarromah, S. B., Hooi, L. B., Lubis, J., & Hanief, Y. N. (2022). The FIFA 11+ for kids warm-up program improved balance and leg muscle strength in children (9–12 years old). *Journal of Physical Education and Sport*, 22(12), 3122–3127.
24. Windt, J., Arden, C. L., Gabbett, T. J., Khan, K. M., Cook, C. E., Sporer, B. C., & Zumbo, B. D. (2018). Getting the most out of intensive longitudinal data: a methodological review of workload–injury studies. *BMJ Open*, 8(10), e022626. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-022626>
25. Windt, J., & Gabbett, T. J. (2017). How do training and competition workloads relate to injury? The workload–injury aetiology model. *British Journal of Sports Medicine*, 51(5), 428–435. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096040>
26. Windt, J., Zumbo, B. D., Sporer, B., MacDonald, K., & Gabbett, T. J. (2017). Why do workload spikes cause injuries, and which athletes are at higher risk? Mediators and moderators in workload–injury investigations. *British Journal of Sports Medicine*, 51(13), 993–994. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-097255>
27. Zumeta-Olaskoaga, L., Bender, A., & Lee, D.-J. (2025). Flexible modelling of time-varying exposures and recurrent events to analyse training load effects in team sports injuries. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 74(2), 391–405. <https://doi.org/10.1093/jrssc/qlae059>