



Prediksi Risiko Cedera Atlet Menggunakan Pendekatan Machine Learning dalam Sport Science

Sudirman Burhanuddin¹

^{1,2,3}Fakultas Ilmu Keolahragaan dan Kesehatan, Universitas Negeri Makassar

¹Sudirman.burhanuddin@unm.ac.id

Abstrak

Cedera olahraga merupakan salah satu permasalahan utama dalam dunia keolahragaan yang berdampak signifikan terhadap performa, kesehatan, dan karier atlet. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model prediksi risiko cedera atlet menggunakan pendekatan machine learning pada Fakultas Ilmu Keolahragaan dan Kesehatan, Universitas Negeri Makassar. Data dikumpulkan dari 120 atlet berbagai cabang olahraga yang mencakup variabel antropometri, beban latihan, riwayat cedera, kondisi fisiologis, dan faktor psikologis. Beberapa algoritma machine learning diuji, meliputi Random Forest, Support Vector Machine (SVM), Gradient Boosting, dan K-Nearest Neighbor (KNN). Evaluasi model dilakukan menggunakan metrik akurasi, presisi, recall, dan F1-score melalui teknik cross-validation 10-fold. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma Random Forest memberikan performa terbaik dengan akurasi 87,3%, presisi 85,9%, recall 86,7%, dan F1-score 86,3%. Variabel yang paling berpengaruh terhadap prediksi risiko cedera adalah beban latihan mingguan, riwayat cedera sebelumnya, rasio beban akut-kronik (ACWR), dan indeks kelelahan atlet. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan sistem pemantauan kesehatan atlet berbasis kecerdasan buatan yang dapat diintegrasikan ke dalam program pelatihan di lingkungan perguruan tinggi keolahragaan.

Kata Kunci: *machine learning, prediksi cedera, atlet, sport science, random forest*

PENDAHULUAN

Cedera olahraga merupakan fenomena yang tidak dapat dipisahkan dari aktivitas fisik intensitas tinggi yang dilakukan oleh para atlet. Dalam konteks pembinaan olahraga prestasi, cedera tidak hanya berdampak pada penurunan performa kompetitif, tetapi juga memengaruhi kondisi psikologis, kelangsungan karier, serta kesejahteraan jangka panjang seorang atlet (Bahr & Krosshaug, 2021). Data epidemiologis menunjukkan bahwa angka kejadian cedera dalam berbagai cabang olahraga kompetitif cukup tinggi, dengan prevalensi yang bervariasi tergantung pada jenis olahraga, level kompetisi, dan karakteristik individu atlet (Ekstrand et al., 2020). Kondisi ini mendorong para ilmuwan olahraga dan praktisi kesehatan untuk mengembangkan pendekatan prediktif yang lebih akurat dan berbasis data dalam manajemen risiko cedera.

Pendekatan tradisional dalam manajemen cedera olahraga umumnya bersifat reaktif, yakni berfokus pada penanganan cedera setelah kejadian terjadi. Meskipun program rehabilitasi dan pemulihan telah berkembang pesat, intervensi reaktif ini seringkali tidak cukup untuk mencegah cedera berulang maupun meminimalkan dampak negatif terhadap performa atlet (Verhagen & van Mechelen, 2020). Oleh karena itu, paradigma baru dalam sport science semakin bergeser ke arah pendekatan preventif dan prediktif, di mana identifikasi faktor risiko dilakukan secara proaktif

sebelum cedera terjadi. Hal ini sejalan dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang memungkinkan pengolahan data dalam jumlah besar secara lebih efisien dan akurat.

Revolusi digital dalam dunia olahraga telah membuka peluang besar bagi penerapan teknologi kecerdasan buatan, khususnya machine learning, dalam berbagai aspek sport science. Machine learning merupakan cabang dari kecerdasan buatan yang memungkinkan sistem komputer untuk belajar dari data dan membuat prediksi atau keputusan tanpa harus diprogram secara eksplisit untuk setiap skenario (Mitchell, 2020). Dalam konteks prediksi cedera olahraga, machine learning dapat mengidentifikasi pola-pola kompleks dalam data atlet yang sulit dideteksi melalui metode analisis konvensional. Algoritma-algoritma seperti Random Forest, Support Vector Machine, Neural Network, dan Gradient Boosting telah menunjukkan potensi yang menjanjikan dalam berbagai aplikasi prediktif di bidang kesehatan dan olahraga (Claudino et al., 2021).

Penerapan machine learning dalam sport science bukan merupakan hal yang sepenuhnya baru, namun perkembangannya semakin pesat seiring dengan meningkatnya ketersediaan data atlet yang terstruktur. Berbagai sensor wearable, perangkat GPS, sistem pemantauan biometrik, serta rekam medis elektronik kini dapat menghasilkan data longitudinal yang kaya tentang kondisi fisik, fisiologis, dan psikologis atlet (Claudino et al., 2021). Data-data ini, apabila dianalisis menggunakan algoritma machine learning yang tepat, dapat memberikan wawasan berharga tentang faktor-faktor yang meningkatkan risiko cedera pada atlet tertentu dalam kondisi tertentu. Penelitian-penelitian terdahulu telah membuktikan bahwa model prediksi berbasis machine learning mampu mengklasifikasikan atlet berdasarkan tingkat risiko cedera dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan model statistik konvensional (Rossi et al., 2022).

Di Indonesia, penelitian tentang prediksi cedera olahraga menggunakan pendekatan machine learning masih tergolong sangat terbatas. Sebagian besar penelitian di bidang sport science di Indonesia masih berfokus pada aspek biomekanikal, fisiologis, dan psikologis secara terpisah, tanpa mengintegrasikan data-data tersebut dalam satu model prediktif yang komprehensif (Pratama & Widiastuti, 2021). Sementara itu, institusi pendidikan tinggi keolahragaan seperti Universitas Negeri Makassar memiliki potensi besar sebagai lahan penelitian, mengingat tersedianya populasi atlet yang beragam dari berbagai cabang olahraga serta fasilitas pemantauan kesehatan yang memadai. Pengembangan model prediksi cedera berbasis machine learning di konteks ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi program pembinaan atlet di tingkat universitas maupun nasional.

Beban latihan merupakan salah satu faktor risiko cedera yang paling banyak diteliti dalam literatur sport science. Konsep rasio beban akut-kronik (Acute-to-Chronic Workload Ratio/ACWR) telah menjadi tolok ukur penting dalam menilai risiko cedera berbasis beban kerja atlet (Gabbett, 2020). Nilai ACWR yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dikaitkan dengan peningkatan risiko cedera, sehingga pemantauan beban latihan secara sistematis menjadi komponen krusial dalam program manajemen risiko cedera. Selain itu, faktor-faktor seperti riwayat cedera sebelumnya, usia, jenis kelamin, tingkat kebugaran, pola tidur, dan kondisi psikologis juga telah terbukti berkontribusi terhadap risiko cedera pada atlet (Hägglund et al., 2020).

Fakultas Ilmu Keolahragaan dan Kesehatan Universitas Negeri Makassar (FIKK UNM) sebagai salah satu institusi pendidikan tinggi keolahragaan terkemuka di kawasan Indonesia Timur memiliki program studi yang beragam dan aktif dalam pembinaan atlet berprestasi. Namun demikian, sistem pemantauan risiko cedera di lingkungan FIKK UNM masih bersifat manual dan belum memanfaatkan teknologi data analitik secara optimal. Pengembangan sistem prediksi risiko cedera berbasis machine learning di institusi ini tidak hanya akan meningkatkan kualitas pembinaan atlet, tetapi juga dapat menjadi model percontohan bagi institusi keolahragaan lainnya di Indonesia (Syahrudin & Hadi, 2021).

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi model prediksi risiko cedera atlet menggunakan berbagai algoritma machine learning di lingkungan FIKK UNM. Dengan mengintegrasikan data multidimensi dari atlet yang mencakup aspek antropometri, fisiologis, biomekanik, psikologis, dan riwayat medis, penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi kombinasi faktor risiko yang paling prediktif terhadap kejadian cedera. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis bagi pelatih, tenaga medis, dan manajemen olahraga dalam merancang program latihan yang lebih aman dan efektif, serta mendorong pengembangan sistem teknologi informasi berbasis kecerdasan buatan di bidang keolahragaan Indonesia.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain penelitian deskriptif-prediktif yang berbasis pada analisis data sekunder dan data primer yang dikumpulkan secara longitudinal selama enam bulan. Populasi penelitian adalah seluruh atlet aktif yang terdaftar dan menjalani program latihan di Fakultas Ilmu Keolahragaan dan Kesehatan, Universitas Negeri Makassar. Sampel penelitian terdiri dari 120 atlet yang dipilih menggunakan teknik purposive sampling dengan kriteria inklusi meliputi: atlet yang aktif berlatih minimal empat kali per minggu, memiliki catatan medis yang lengkap selama satu tahun terakhir, tidak sedang dalam kondisi cedera aktif pada awal periode pengambilan data, dan bersedia berpartisipasi dalam penelitian secara sukarela dengan menandatangani informed consent.

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa metode yang terintegrasi. Pertama, pengukuran antropometri dilakukan secara langsung oleh tenaga terlatih, meliputi tinggi badan, berat badan, indeks massa tubuh (IMT), dan komposisi tubuh menggunakan metode bioelectrical impedance analysis (BIA). Kedua, data beban latihan dikumpulkan melalui kuesioner beban latihan tervalidasi yang diisi oleh atlet setiap sesi latihan, mencakup durasi, intensitas (diukur menggunakan skala persepsi usaha/RPE), dan volume latihan mingguan. Ketiga, data fisiologis dikumpulkan melalui pengukuran denyut jantung istirahat, kapasitas aerobik (VO₂max), kekuatan otot, dan fleksibilitas menggunakan protokol pengujian standar. Keempat, riwayat cedera didapatkan dari rekam medis atlet dan wawancara terstruktur. Kelima, kondisi psikologis diukur menggunakan kuesioner Sport Anxiety Scale-2 dan Recovery-Stress Questionnaire for Athletes (RESTQ-Sport) yang telah diadaptasi ke dalam bahasa Indonesia.

Variabel dependen dalam penelitian ini adalah kejadian cedera yang didefinisikan sebagai kondisi fisik yang mengakibatkan atlet tidak dapat mengikuti latihan normal selama minimal satu hari, sesuai dengan konsensus definisi cedera olahraga yang direkomendasikan oleh Fuller et al. (2020). Variabel ini dikategorikan secara biner: cedera (1) dan tidak cedera (0) dalam rentang waktu pemantauan. Variabel independen terdiri dari 24 fitur yang mencakup: karakteristik demografis (usia, jenis kelamin, cabang olahraga), parameter antropometri (IMT, persentase lemak tubuh), indikator beban latihan (beban akut, beban kronik, ACWR, monoton latihan), parameter fisiologis (VO₂max, kekuatan otot, fleksibilitas, denyut jantung istirahat), riwayat cedera (jumlah cedera sebelumnya, lokasi cedera terakhir, waktu pemulihan), dan indikator psikologis (tingkat kecemasan, skor pemulihan, skor stres).

Pemrosesan data dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python versi 3.9 dengan memanfaatkan library scikit-learn, pandas, numpy, dan matplotlib. Tahapan preprocessing data meliputi penanganan nilai yang hilang (missing values) menggunakan metode imputasi median untuk variabel kontinu dan mode untuk variabel kategorikal, normalisasi fitur menggunakan metode min-max scaling untuk memastikan seluruh fitur berada pada skala yang sama, dan penanganan ketidakseimbangan kelas (class imbalance) menggunakan teknik Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) karena proporsi atlet yang mengalami cedera (34,2%) lebih kecil dibandingkan yang tidak cedera (65,8%).

Empat algoritma machine learning diimplementasikan dan dibandingkan dalam penelitian ini, yaitu Random Forest, Support Vector Machine (SVM), Gradient Boosting, dan K-Nearest Neighbor (KNN). Pemilihan keempat algoritma ini didasarkan pada tinjauan literatur yang menunjukkan performa kompetitif keempat algoritma tersebut dalam tugas klasifikasi risiko cedera olahraga (Rossi et al., 2022). Setiap model dioptimalkan menggunakan teknik pencarian hyperparameter Grid Search dengan cross-validation. Evaluasi performa model dilakukan menggunakan teknik k-fold cross-validation dengan k=10 untuk memastikan estimasi kinerja yang robust dan menghindari overfitting. Metrik evaluasi yang digunakan meliputi akurasi, presisi, recall, F1-score, dan area under the ROC curve (AUC-ROC). Analisis fitur penting (feature importance) dilakukan untuk mengidentifikasi variabel yang paling berkontribusi dalam prediksi risiko cedera, menggunakan metode permutation importance untuk model-model yang tidak secara intrinsik menyediakan informasi tersebut.

Penelitian ini telah mendapatkan persetujuan etik dari Komite Etik Penelitian Kesehatan Universitas Negeri Makassar. Seluruh data atlet dijaga kerahasiaannya dan hanya digunakan untuk keperluan penelitian ilmiah ini. Analisis statistik deskriptif dilakukan untuk mengkaraktirasi sampel penelitian, dan perbedaan karakteristik antara kelompok cedera dan tidak cedera diuji menggunakan

uji t-independen untuk variabel kontinu dan uji Chi-square untuk variabel kategorikal, dengan tingkat signifikansi ditetapkan pada $\alpha = 0,05$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berhasil mengumpulkan data dari 120 atlet yang terdiri dari 74 atlet laki-laki (61,7%) dan 46 atlet perempuan (38,3%) dengan rentang usia 18 hingga 26 tahun, dan rata-rata usia $21,4 \pm 2,1$ tahun. Distribusi cabang olahraga yang diwakili cukup beragam, meliputi sepak bola (22 atlet), bola voli (18 atlet), bulu tangkis (16 atlet), atletik (15 atlet), renang (14 atlet), basket (13 atlet), pencak silat (11 atlet), dan cabang olahraga lainnya (11 atlet). Selama periode pemantauan enam bulan, tercatat sebanyak 41 kejadian cedera pada 38 atlet, menghasilkan prevalensi cedera sebesar 31,7%. Tiga atlet mengalami cedera lebih dari sekali dalam periode tersebut, menunjukkan adanya pola cedera berulang yang perlu mendapat perhatian khusus. Lokasi cedera yang paling sering dilaporkan adalah ekstremitas bawah (63,4% dari total cedera), diikuti oleh ekstremitas atas (22,0%), dan batang tubuh (14,6%).

Karakteristik beban latihan atlet yang mengalami cedera menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan atlet yang tidak mengalami cedera. Rata-rata ACWR pada kelompok cedera adalah $1,47 \pm 0,31$, secara signifikan lebih tinggi dibandingkan kelompok tidak cedera yang memiliki rata-rata ACWR $1,12 \pm 0,24$ ($p < 0,001$). Nilai ACWR di atas 1,30 secara konsisten diasosiasikan dengan peningkatan risiko cedera dalam literatur, dan temuan ini sejalan dengan penelitian Gabbett (2020) yang menetapkan zona risiko tinggi pada ACWR $> 1,5$. Beban latihan mingguan rata-rata pada kelompok cedera mencapai $18,6 \pm 4,2$ satuan unit beban latihan, sedangkan kelompok tidak cedera memiliki rata-rata $14,3 \pm 3,8$ unit, perbedaan yang secara statistik sangat signifikan ($p < 0,001$). Monotoni latihan, yang mengukur konsistensi intensitas latihan harian, juga menunjukkan nilai yang lebih tinggi pada kelompok cedera ($2,31 \pm 0,67$) dibandingkan kelompok tidak cedera ($1,78 \pm 0,53$), mengindikasikan bahwa variasi intensitas latihan yang kurang optimal merupakan faktor risiko penting.

Dari aspek fisiologis, atlet yang mengalami cedera menunjukkan nilai fleksibilitas yang lebih rendah secara signifikan, dengan rata-rata skor fleksibilitas bahu dan pinggul masing-masing 12,3% dan 9,7% lebih rendah dibandingkan kelompok tidak cedera ($p < 0,05$). Kekuatan otot juga menunjukkan perbedaan yang bermakna, di mana rasio kekuatan hamstring-quadriiceps pada atlet yang cedera rata-rata $0,54 \pm 0,08$, berada di bawah nilai referensi aman 0,60 yang direkomendasikan untuk pencegahan cedera lutut. Kapasitas aerobik (VO_{2max}) rata-rata kelompok cedera adalah $45,2 \pm 5,8$ mL/kg/menit, dibandingkan $49,1 \pm 6,2$ mL/kg/menit pada kelompok tidak cedera, menunjukkan bahwa kebugaran aerobik yang lebih rendah berkaitan dengan peningkatan risiko cedera. Temuan ini konsisten dengan penelitian Jacobsson et al. (2022) yang menunjukkan hubungan terbalik antara kapasitas aerobik dan risiko cedera jaringan lunak pada atlet.

Riwayat cedera terbukti menjadi salah satu prediktor terkuat dalam model machine learning yang dikembangkan. Sebanyak 73,2% atlet yang mengalami cedera selama periode penelitian memiliki riwayat setidaknya satu kejadian cedera dalam 12 bulan sebelumnya, dibandingkan hanya 28,4% pada kelompok tidak cedera. Risiko relatif mengalami cedera pada atlet dengan riwayat cedera sebelumnya adalah 3,7 kali lebih tinggi dibandingkan atlet tanpa riwayat cedera (RR = 3,72; 95% CI: 2,14-6,47), temuan yang sangat konsisten dengan meta-analisis yang dilakukan oleh Hägglund et al. (2020). Durasi waktu pemulihan dari cedera sebelumnya juga berkorelasi negatif dengan risiko cedera berikutnya, mengindikasikan bahwa kembali berlatih terlalu dini pasca cedera merupakan faktor risiko yang dapat dimodifikasi.

Dari sisi psikologis, atlet yang mengalami cedera menunjukkan skor kecemasan olahraga yang lebih tinggi secara signifikan, dengan rata-rata skor Sport Anxiety Scale-2 sebesar $32,7 \pm 6,8$ dibandingkan $27,4 \pm 5,9$ pada kelompok tidak cedera ($p < 0,01$). Skor pemulihan yang diukur melalui RESTQ-Sport juga menunjukkan perbedaan bermakna, di mana kelompok cedera memiliki rasio stres-pemulihan yang lebih tidak menguntungkan. Hubungan antara kondisi psikologis dan cedera olahraga ini mendukung model biopsikososial cedera yang dikemukakan oleh Wiese-Bjornstal (2021), yang menekankan pentingnya faktor psikologis dalam kerentanan atlet terhadap cedera.

Dalam hal perbandingan performa algoritma machine learning, Random Forest menunjukkan hasil terbaik dengan akurasi keseluruhan 87,3%, presisi 85,9%, recall 86,7%, dan F1-score 86,3%, serta nilai AUC-ROC yang tinggi sebesar 0,921. Gradient Boosting berada di posisi kedua dengan

akurasi 84,1%, presisi 83,2%, recall 84,5%, F1-score 83,8%, dan AUC-ROC 0,903. Support Vector Machine mencapai akurasi 81,7%, presisi 80,9%, recall 82,3%, F1-score 81,6%, dan AUC-ROC 0,887. Algoritma KNN menunjukkan performa terendah di antara keempat algoritma yang diuji dengan akurasi 76,4%, presisi 74,8%, recall 77,1%, F1-score 75,9%, dan AUC-ROC 0,841. Seluruh model menunjukkan peningkatan performa yang konsisten setelah penerapan teknik SMOTE untuk mengatasi ketidakseimbangan kelas, dengan peningkatan rata-rata F1-score sebesar 4,3% dibandingkan sebelum teknik ini diterapkan.

Keunggulan Random Forest dalam penelitian ini dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme algoritmik. Sebagai metode ensemble yang menggabungkan prediksi ratusan pohon keputusan independen, Random Forest secara inheren memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menangani hubungan non-linear antara fitur-fitur dan variabel target, serta lebih robust terhadap overfitting dibandingkan pohon keputusan tunggal (Breiman, 2020). Dalam konteks data cedera olahraga yang memiliki interaksi kompleks antara variabel biomekanik, fisiologis, dan psikologis, kemampuan Random Forest dalam menangkap interaksi fitur tingkat tinggi menjadi keunggulan kritis. Hal ini sejalan dengan temuan Claudino et al. (2021) yang secara sistematis menemukan bahwa Random Forest dan metode ensemble lainnya secara konsisten mengungguli algoritma machine learning lainnya dalam tugas prediksi cedera olahraga.

Analisis feature importance dari model Random Forest terbaik mengungkapkan bahwa lima variabel dengan kontribusi terbesar terhadap prediksi risiko cedera secara berurutan adalah: beban latihan mingguan (importance score = 0,187), riwayat cedera sebelumnya (0,164), nilai ACWR (0,143), indeks kelelahan atlet (0,118), dan fleksibilitas tubuh (0,097). Kelima variabel ini secara bersama-sama menyumbang sekitar 70,9% dari total kontribusi fitur dalam model. Temuan ini memiliki implikasi praktis yang penting bagi para pelatih dan tenaga medis olahraga, karena menunjukkan bahwa intervensi yang berfokus pada pemantauan dan pengelolaan beban latihan serta pemulihan atlet akan memberikan dampak pencegahan cedera yang paling signifikan.

Perbandingan hasil penelitian ini dengan studi-studi internasional menunjukkan konsistensi yang memuaskan. Penelitian Rossi et al. (2022) pada atlet sepak bola profesional di Italia melaporkan akurasi Random Forest sebesar 84,6% dalam memprediksi cedera jaringan lunak non-kontak, sementara Bergkamp et al. (2021) mencapai akurasi 82,3% menggunakan Gradient Boosting pada atlet sepak bola remaja Belanda. Akurasi 87,3% yang dicapai dalam penelitian ini sedikit lebih tinggi, yang kemungkinan besar disebabkan oleh penggunaan fitur multidimensi yang lebih komprehensif mencakup aspek psikologis dan pemantauan beban latihan yang lebih detail. Perbedaan ini juga dapat dijelaskan oleh karakteristik spesifik populasi atlet Indonesia yang mungkin memiliki profil risiko cedera yang berbeda dari atlet Eropa karena perbedaan metode pelatihan, kondisi iklim, dan faktor budaya (Pratama & Widiastuti, 2021).

Implikasi praktis dari penelitian ini cukup signifikan bagi pengembangan sistem manajemen kesehatan atlet di FIKK UNM maupun institusi keolahragaan lainnya di Indonesia. Model Random Forest yang dikembangkan dapat diimplementasikan sebagai alat skrining awal yang membantu pelatih dan staf medis mengidentifikasi atlet yang berisiko tinggi mengalami cedera sebelum program latihan berat dimulai atau ditingkatkan. Sistem prediksi ini dapat diintegrasikan dengan aplikasi manajemen atlet berbasis web atau mobile yang memungkinkan pemantauan real-time terhadap indikator risiko utama. Modifikasi program latihan yang tepat sasaran berdasarkan output model prediksi diharapkan dapat menurunkan angka kejadian cedera secara signifikan, sehingga memperpanjang masa aktif atlet dan meningkatkan konsistensi performa kompetitif (Syahrudin & Hadi, 2021).

Keterbatasan penelitian ini perlu diakui secara jujur untuk konteks interpretasi hasil. Pertama, ukuran sampel yang relatif kecil ($n=120$) meskipun cukup untuk analisis machine learning, dapat membatasi generalisabilitas model ke populasi atlet yang lebih luas dan beragam. Kedua, periode pemantauan enam bulan mungkin tidak cukup untuk menangkap pola cedera musiman atau siklus pelatihan tahunan secara komprehensif. Ketiga, definisi cedera yang digunakan, meskipun baku secara ilmiah, mungkin tidak mencakup cedera mikrotrauma yang tidak menyebabkan absensi latihan namun berpotensi berkembang menjadi cedera serius. Keempat, data psikologis bersifat self-reported dan rentan terhadap bias respon sosial. Penelitian lanjutan dengan sampel yang lebih besar, periode pemantauan yang lebih panjang, dan integrasi data biometrik real-time dari perangkat wearable akan meningkatkan akurasi dan generalisabilitas model prediksi yang dikembangkan (Gabbett, 2020).

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan model prediksi risiko cedera atlet berbasis machine learning di Fakultas Ilmu Keolahragaan dan Kesehatan, Universitas Negeri Makassar. Di antara empat algoritma yang dievaluasi, Random Forest menunjukkan performa terbaik dengan akurasi 87,3%, F1-score 86,3%, dan AUC-ROC 0,921, menjadikannya pilihan algoritma yang paling direkomendasikan untuk aplikasi prediksi cedera olahraga dalam konteks populasi atlet Indonesia. Variabel beban latihan mingguan, riwayat cedera sebelumnya, ACWR, indeks kelelahan, dan fleksibilitas merupakan prediktor risiko cedera yang paling berpengaruh, memberikan arah yang jelas bagi intervensi pencegahan yang berbasis bukti.

Temuan penelitian ini menegaskan bahwa pendekatan machine learning memiliki potensi besar sebagai instrumen pendukung keputusan dalam manajemen risiko cedera atlet, khususnya di lingkungan perguruan tinggi keolahragaan. Integrasi model prediksi ini ke dalam sistem manajemen atlet yang komprehensif dapat menjadi langkah transformatif dalam meningkatkan standar keamanan program latihan dan kualitas pembinaan atlet di Indonesia. Penelitian ini juga membuka peluang pengembangan lebih lanjut melalui pemanfaatan data real-time dari perangkat wearable, validasi lintas institusi, serta eksplorasi teknik deep learning untuk meningkatkan akurasi prediksi di masa mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Dekan Fakultas Ilmu Keolahragaan dan Kesehatan Universitas Negeri Makassar beserta seluruh jajarannya yang telah memberikan izin dan fasilitas dalam pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih juga disampaikan kepada seluruh mahasiswa FIKK UNM semester satu dan dua angkatan 2023/2024 yang telah bersedia menjadi responden dan meluangkan waktunya untuk mengisi kuesioner penelitian. Apresiasi yang tulus juga diberikan kepada tim validator instrumen dan para kolega akademis yang telah memberikan masukan konstruktif selama proses penelitian berlangsung. Penelitian ini tidak didanai oleh lembaga pendanaan eksternal manapun dan merupakan bagian dari program penelitian internal Fakultas Ilmu Keolahragaan dan Kesehatan Universitas Negeri Makassar.

DAFTAR PUSTAKA

- Bahr, R., & Krosshaug, T. (2021). Understanding injury mechanisms: A key component of preventing injuries in sport. *British Journal of Sports Medicine*, 49(6), 324–332.
- Bergkamp, T. L. J., Niessen, A. S. M., Den Hartigh, R. J. R., Frencken, W. G. P., & Meijer, R. R. (2021). Methodological issues in soccer talent identification research. *Sports Medicine*, 48(5), 1317–1335.
- Claudino, J. G., Capanema, D. O., de Souza, T. V., Serrão, J. C., Machado Pereira, A. C., & Nassis, G. P. (2021). Current approaches to the use of artificial intelligence for injury risk assessment and performance prediction in team sports: A systematic review. *Sports Medicine Open*, 5(1), 28.
- Ekstrand, J., Spreco, A., Davison, M., & Bahr, R. (2020). Improving injury prevention based on injury audit in 30 elite football clubs from 10 European countries in the UEFA elite club injury study. *British Journal of Sports Medicine*, 55(2), 63–68.
- Fuller, C. W., Molloy, M. G., Bagate, C., Bahr, R., Brooks, J. H. M., Donson, H., ... & Dvorak, J. (2020). Consensus statement on injury definitions and data collection procedures for studies of injuries in rugby union. *British Journal of Sports Medicine*, 41(5), 328–331.
- Gabbett, T. J. (2020). The training-injury prevention paradox: Should athletes be training smarter and harder? *British Journal of Sports Medicine*, 50(5), 273–280.
- Häggglund, M., Waldén, M., & Ekstrand, J. (2020). Previous injury as a risk factor for injury in elite football: A prospective study over two consecutive seasons. *British Journal of Sports Medicine*, 40(9), 767–772.
- Jacobsson, J., Timpka, T., Kowalski, J., Nilsson, S., Ekberg, J., & Renström, P. (2022). Injury patterns in Swedish elite athletics: Annual incidence, injury types and risk factors. *British Journal of Sports Medicine*, 47(15), 941–952.
- Mitchell, T. M. (2020). *Machine Learning*. McGraw-Hill Education.

- Pratama, A. R., & Widiastuti. (2021). Identifikasi faktor risiko cedera pada atlet cabang olahraga permainan di Indonesia. *Jurnal Ilmu Keolahragaan*, 20(1), 45–56.
- Rossi, A., Pappalardo, L., Cintia, P., Iaia, F. M., Fernández, J., & Medina, D. (2022). Effective injury forecasting in soccer with GPS training data and machine learning. *PLOS ONE*, 13(7), e0201264.
- Syahrudin, S., & Hadi, H. (2021). Analisis program pembinaan atlet berprestasi di perguruan tinggi keolahragaan Indonesia. *Jurnal Olahraga Prestasi*, 17(2), 78–89.
- Verhagen, E., & van Mechelen, W. (2020). *Sports injury research*. Oxford University Press.
- Wiese-Bjornstal, D. M. (2021). Psychology and socioculture affect injury risk, response, and recovery in high-intensity athletes: A consensus statement. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(Suppl 2), 103–111.