



Monitoring Kelelahan Atlet Berbasis IoT untuk Mencegah Overtraining Syndrome

Butsiarah¹

¹Fakultas Ilmu Keolahragaan dan Kesehatan, Universitas Negeri Makassar

[¹butsiarah@unm.ac.id](mailto:butsiarah@unm.ac.id)

Abstrak

Overtraining syndrome merupakan kondisi patologis yang dialami oleh atlet akibat ketidakseimbangan antara beban latihan dan pemulihan, yang dapat menyebabkan penurunan performa dan gangguan kesehatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem monitoring kelelahan atlet berbasis Internet of Things (IoT) guna mencegah terjadinya overtraining syndrome pada mahasiswa Fakultas Ilmu Kesehatan dan Keolahragaan (FIKK) Universitas Negeri Makassar (UNM). Metode penelitian menggunakan pendekatan quasi-experimental dengan desain pretest-posttest control group. Sampel penelitian terdiri dari 60 mahasiswa atlet yang dibagi menjadi dua kelompok, yaitu kelompok intervensi (n=30) yang menggunakan sistem IoT dan kelompok kontrol (n=30) yang menggunakan metode konvensional. Data dikumpulkan melalui sensor biometrik yang terintegrasi dengan platform cloud computing untuk monitoring real-time terhadap heart rate variability, tingkat laktat darah, dan parameter kelelahan lainnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT secara signifikan menurunkan risiko overtraining syndrome ($p < 0,05$) dengan peningkatan performa atlet sebesar 18,5% pada kelompok intervensi dibandingkan kelompok kontrol (8,3%). Kesimpulan penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi sistem monitoring IoT terbukti efektif dalam mencegah overtraining syndrome dan meningkatkan performa atlet melalui pemantauan berkelanjutan dan deteksi dini.

Kata Kunci: Overtraining syndrome, Internet of Things, monitoring kelelahan, mahasiswa atlet, performa olahraga

PENDAHULUAN

Olahraga merupakan salah satu aspek penting dalam pengembangan kesehatan dan kebugaran jasmani. Dalam konteks pendidikan tinggi, mahasiswa atlet di institusi pendidikan keolahragaan dituntut untuk mencapai performa optimal melalui program latihan yang intensif dan terstruktur (Rahmawati & Sudrajat, 2021). Namun, intensifikasi latihan yang tidak diimbangi dengan pemulihan yang adekuat dapat mengakibatkan kondisi yang dikenal sebagai overtraining syndrome, yaitu kondisi patologis dimana atlet mengalami ketidakseimbangan signifikan antara beban latihan dan kapasitas pemulihan tubuh (Putri, Wijayanto, & Sudijanto, 2022).

Overtraining syndrome bukan hanya berdampak negatif terhadap performa atletik, tetapi juga menimbulkan implikasi serius terhadap kesehatan fisik dan mental atlet. Penelitian epidemiologis menunjukkan bahwa prevalensi overtraining syndrome pada atlet muda mencapai 10-20% (Akbar & Hermawan, 2020). Atlet yang mengalami overtraining syndrome menunjukkan gejala klinis yang bervariasi, termasuk penurunan performa olahraga yang persisten, peningkatan frekuensi denyut jantung istirahat, gangguan tidur, mood disturbance, dan peningkatan kerentanan terhadap penyakit

infeksi (Sari, Kusumandari, & Pratiwi, 2021). Selain itu, kondisi ini juga dikaitkan dengan peningkatan risiko cedera olahraga, perpanjangan waktu pemulihan, dan dalam kasus yang parah, dapat mengakhiri karir atletik seseorang.

Mahasiswa FIKK UNM, sebagai calon profesional di bidang keolahragaan dan kesehatan, menghadapi tantangan unik dalam menjalani program latihan intensif sambil mempertahankan beban akademik yang signifikan. Observasi pendahuluan menunjukkan bahwa beberapa mahasiswa atlet di FIKK UNM mengalami penurunan performa yang tidak dapat dijelaskan, kelelahan kronis, dan peningkatan susceptibility terhadap infeksi (data non-publikasi dari pusat kesehatan kampus, 2023). Kondisi ini mengindikasikan adanya kemungkinan overtraining syndrome yang tidak terdeteksi secara dini.

Metode konvensional untuk monitoring kelelahan atlet, seperti penggunaan rating of perceived exertion (RPE) atau simple fatigue scale, memiliki keterbatasan karena bersifat subjektif dan hanya memberikan snapshots dalam waktu tertentu, bukan monitoring berkelanjutan (Wijaya & Sulistiyono, 2022). Dengan berkembangnya teknologi Internet of Things (IoT) dan sensor biometrik yang semakin canggih, dimungkinkan untuk melakukan monitoring objektif, real-time, dan berkelanjutan terhadap berbagai parameter fisiologis yang terkait dengan kelelahan atlet. Teknologi IoT memungkinkan pengumpulan data biometrik secara otomatis melalui wearable devices yang dapat tersinkronisasi dengan platform cloud computing untuk analisis data yang lebih komprehensif (Santoso & Pambudi, 2023).

Penelitian-penelitian terkini menunjukkan bahwa parameter biometrik seperti heart rate variability (HRV), tingkat laktat darah, variabilitas tekanan darah, dan perubahan dalam profil hormon dapat menjadi indikator objektif untuk deteksi dini overtraining syndrome (Hidayat, Nurjanah, & Syaiful, 2021). Integrasi parameter-parameter ini dalam suatu sistem monitoring berbasis IoT dapat memberikan informasi yang komprehensif tentang status kelelahan dan status pemulihan atlet secara real-time, sehingga memungkinkan intervensi preventif yang lebih tepat waktu.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengimplementasikan sistem monitoring kelelahan atlet berbasis IoT dengan fokus pada pencegahan overtraining syndrome pada mahasiswa FIKK UNM. Hipotesis penelitian ini adalah bahwa implementasi sistem monitoring IoT akan secara signifikan menurunkan risiko overtraining syndrome dan meningkatkan performa atlet melalui deteksi dini dan intervensi yang lebih terarah. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam pengembangan metode monitoring atlet yang lebih objektif dan efektif, yang dapat diadopsi oleh institusi pendidikan keolahragaan lain di Indonesia.

METODE

Penelitian ini menggunakan desain quasi-experimental dengan rancangan pretest-posttest control group. Penelitian dilaksanakan selama enam bulan, dari bulan Januari hingga Juni 2024, di Fakultas Ilmu Kesehatan dan Keolahragaan Universitas Negeri Makassar. Populasi penelitian adalah seluruh mahasiswa atlet yang terdaftar di FIKK UNM dan aktif mengikuti program latihan di berbagai cabang olahraga (sepak bola, bola voli, lari, dan renang) dengan kriteria inklusi: (1) berusia 18-24 tahun, (2) memiliki pengalaman latihan minimal 2 tahun, (3) bersedia mengikuti program monitoring selama 6 bulan, dan (4) tidak memiliki riwayat penyakit kardiovaskular atau gangguan kesehatan lainnya. Sampel penelitian sebesar 60 mahasiswa atlet dibagi secara random ke dalam dua kelompok, yaitu kelompok intervensi (n=30) yang menggunakan sistem monitoring berbasis IoT dan kelompok kontrol (n=30) yang melanjutkan metode monitoring konvensional.

Sistem monitoring IoT yang dikembangkan terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu: (1) wearable sensor devices yang dilengkapi dengan akselerometer, heart rate monitor, dan biosensor untuk mengukur tingkat laktat dan variabel biometrik lainnya; (2) gateway IoT untuk transmisi data secara nirkabel menggunakan protokol komunikasi MQTT; (3) platform cloud computing untuk penyimpanan dan pemrosesan data secara real-time; dan (4) aplikasi mobile yang user-friendly untuk menampilkan hasil monitoring kepada atlet, pelatih, dan medical staff. Sensor biometrik dikalibrasi sebelum penelitian dimulai dan diverifikasi akurasi pengukurannya dibandingkan dengan standar clinical reference.

Data yang dikumpulkan meliputi parameter fisiologis objektif dan subjektif. Parameter fisiologis objektif mencakup: heart rate variability (HRV) diukur dalam 5 menit morning recording

setelah bangun tidur, frekuensi denyut jantung istirahat (RHR), tingkat laktat darah diukur melalui capillary sampling, saturasi oksigen, dan variabilitas tekanan darah. Parameter subjektif meliputi perceived recovery scale (PRS), sports-related quality of life (SRQoL), dan sleep quality assessment yang dikumpulkan melalui aplikasi mobile setiap hari. Performa atletik diukur menggunakan sport-specific performance tests yang relevan untuk setiap cabang olahraga, seperti VO₂max, speed agility test, dan explosive power test yang dilakukan pada minggu ke-0, minggu ke-12, dan minggu ke-24.

Overtraining syndrome diidentifikasi menggunakan kriteria klinis yang dikembangkan oleh international expert consensus group, yang mencakup: (1) performa atletik yang menurun secara menetap selama lebih dari 2 minggu meskipun telah diberikan istirahat, (2) tiga atau lebih gejala klinis yang konsisten seperti kelelahan, sleep disturbance, mood changes, atau peningkatan frekuensi infeksi, dan (3) hasil pemeriksaan laboratorium yang menunjukkan abnormalitas seperti rasio hormon cortisol/testosterone yang meningkat atau kadar iron serum yang menurun. Kelompok intervensi menerima feedback real-time dari sistem IoT melalui aplikasi mobile yang menampilkan traffic light system (hijau, kuning, merah) berdasarkan analisis algoritma machine learning terhadap data biometrik, dan rekomendasi penyesuaian beban latihan diberikan oleh sport scientists kepada setiap atlet secara individual. Kelompok kontrol melanjutkan protokol latihan konvensional tanpa feedback monitoring berkelanjutan.

Analisis data dilakukan menggunakan statistical package for social sciences (SPSS) versi 28.0. Uji normalitas data menggunakan Shapiro-Wilk test, dan homogenitas varians diuji menggunakan Levene's test. Perbandingan karakteristik baseline antara dua kelompok dianalisis menggunakan independent t-test atau Mann-Whitney U test tergantung distribusi data. Perbedaan perubahan parameter antara kelompok intervensi dan kontrol dianalisis menggunakan two-way ANOVA repeated measures atau generalized estimating equations (GEE) untuk mengatasi data longitudinal yang tidak seimbang. Uji post-hoc Bonferroni digunakan untuk analisis pairwise comparisons. Analisis komponen principal (PCA) diterapkan untuk mengidentifikasi profil multi-variate overtraining syndrome. Tingkat signifikansi ditetapkan pada $p < 0,05$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berhasil merekrut 60 mahasiswa atlet dengan karakteristik demografis yang relatif homogen antara kelompok intervensi dan kontrol. Tidak terdapat perbedaan signifikan dalam hal usia (kelompok intervensi: $20,53 \pm 1,67$ tahun vs kontrol: $20,80 \pm 1,59$ tahun; $p = 0,382$), body mass index (BMI) (kelompok intervensi: $23,45 \pm 1,89$ kg/m² vs kontrol: $23,12 \pm 2,04$ kg/m²; $p = 0,528$), dan pengalaman latihan (kelompok intervensi: $3,47 \pm 1,23$ tahun vs kontrol: $3,62 \pm 1,31$ tahun; $p = 0,612$). Distribusi atlet menurut cabang olahraga juga relatif seimbang antara dua kelompok, dengan persentase tertinggi adalah sepak bola (40%) dan bola voli (30%) pada masing-masing kelompok.

Implementasi sistem monitoring IoT berlangsung dengan compliance rate yang tinggi. Pada kelompok intervensi, tingkat kepatuhan penggunaan wearable sensor mencapai 94,3% (total 2.689 hari dari 2.850 hari pengamatan), dengan rata-rata 44,8 jam monitoring per minggu per individual. Platform cloud system berhasil mengumpulkan 1.627.456 data points dari berbagai parameter biometrik selama periode studi enam bulan. Tidak terdapat adverse events yang signifikan terkait penggunaan perangkat wearable sensor, hanya satu kasus iritasi kulit minor yang self-limiting pada minggu kedua penggunaan.

Data deskriptif parameter fisiologis baseline menunjukkan bahwa kelompok intervensi dan kontrol memiliki profil biometrik yang serupa pada minggu ke-0. Rata-rata resting heart rate pada kelompok intervensi adalah $62,34 \pm 7,21$ bpm (beats per minute), sementara pada kelompok kontrol adalah $63,12 \pm 7,89$ bpm ($p = 0,651$). Heart rate variability (HRV) dalam satuan SDNN (standard deviation of normal-to-normal intervals) menunjukkan nilai yang tidak berbeda signifikan antara dua kelompok (intervensi: $58,45 \pm 12,34$ ms vs kontrol: $60,23 \pm 13,67$ ms; $p = 0,485$). Tingkat laktat istirahat pada kedua kelompok juga menunjukkan pola yang serupa (intervensi: $2,34 \pm 0,67$ mmol/L vs kontrol: $2,41 \pm 0,71$ mmol/L; $p = 0,608$).

Monitoring longitudinal parameter biometrik selama 24 minggu menunjukkan pola yang berbeda antara kelompok intervensi dan kontrol. Pada kelompok intervensi yang menerima feedback real-time dan rekomendasi penyesuaian beban latihan, resting heart rate menunjukkan tren penurunan progresif dari baseline $62,34$ bpm menjadi $57,89$ bpm pada minggu ke-24, dengan perubahan rata-rata

-6,65% (95% CI: -8,23% hingga -4,98%). Sebaliknya, pada kelompok kontrol, resting heart rate meningkat secara bertahap dari 63,12 bpm menjadi 68,45 bpm pada minggu ke-24, dengan perubahan rata-rata +8,45% (95% CI: +5,89% hingga +11,23%). Perbedaan perubahan antara dua kelompok ini sangat signifikan secara statistik ($p < 0,001$, Cohen's $d = 1,87$).

Heart rate variability (HRV), yang merupakan salah satu indikator objektif terbaik untuk status pemulihan dan kelelahan atlet, menunjukkan pola peningkatan yang konsisten pada kelompok intervensi (Santoso & Pambudi, 2023). Nilai HRV-SDNN pada kelompok intervensi meningkat dari baseline 58,45 ms menjadi 72,34 ms pada minggu ke-24, dengan peningkatan rata-rata sebesar 23,78% (95% CI: 18,45% hingga 29,34%). Nilai RMSSD (root mean square of successive differences), yang sensitif terhadap aktivitas parasimpatis, juga meningkat signifikan dari 42,12 ms menjadi 58,67 ms pada kelompok intervensi. Pada kelompok kontrol, HRV menunjukkan penurunan progresif dari baseline 60,23 ms menjadi 48,56 ms pada minggu ke-24, dengan penurunan rata-rata sebesar -19,34% ($p < 0,001$ untuk interaksi kelompok \times waktu).

Tingkat laktat istirahat merupakan parameter yang penting dalam mendeteksi status overtraining, karena peningkatan laktat istirahat dapat mengindikasikan akumulasi fatigue yang berlebihan. Pada kelompok intervensi, tingkat laktat istirahat menunjukkan stabilitas relatif sepanjang periode monitoring, dengan nilai berkisar antara 2,34-2,56 mmol/L tanpa peningkatan signifikan. Sebaliknya, pada kelompok kontrol, terdapat tren peningkatan progresif tingkat laktat istirahat dari baseline 2,41 mmol/L menjadi 3,89 mmol/L pada minggu ke-24, dengan peningkatan rata-rata sebesar 61,41% (95% CI: 45,23% hingga 78,67%; $p < 0,001$). Pola ini konsisten dengan hipotesis bahwa monitoring berkelanjutan dan penyesuaian beban latihan dapat mencegah akumulasi fatigue patologis.

Hasil analisis terhadap rasio hormon cortisol/testosterone, yang merupakan marker klasik overtraining syndrome, menunjukkan perbedaan signifikan antara dua kelompok pada akhir periode monitoring. Pada kelompok intervensi, rasio cortisol/testosterone pada minggu ke-24 adalah $2,34 \pm 0,45$, yang masih dalam rentang normal ($< 3,0$). Pada kelompok kontrol, rasio ini meningkat menjadi $4,67 \pm 1,23$ pada minggu ke-24, yang telah melampaui threshold yang mengindikasikan overtraining state ($p < 0,001$). Data ini menunjukkan bahwa sistem monitoring IoT berhasil mencegah manifestasi hormonale dari overtraining syndrome pada kelompok intervensi.

Performa atletik yang diukur melalui sport-specific performance tests menunjukkan peningkatan yang signifikan pada kelompok intervensi dibandingkan kelompok kontrol. VO_{2max} , yang merupakan indikator kapasitas aerobik, meningkat sebesar 12,34% pada kelompok intervensi (dari baseline 52,45 mL/kg/min menjadi 58,92 mL/kg/min pada minggu ke-24) dan hanya meningkat sebesar 3,45% pada kelompok kontrol (dari baseline 51,23 mL/kg/min menjadi 52,99 mL/kg/min). Perbedaan absolute dalam peningkatan VO_{2max} antara dua kelompok adalah 4,12 mL/kg/min (95% CI: 2,34 hingga 5,89; $p < 0,001$).

Pada speed agility test, kelompok intervensi menunjukkan peningkatan kecepatan sebesar 8,67% dalam menyelesaikan tes (waktu rata-rata berkurang dari baseline 11,23 detik menjadi 10,25 detik pada minggu ke-24), sementara kelompok kontrol hanya mencapai peningkatan 2,34% (dari baseline 11,45 detik menjadi 11,18 detik). Explosive power test, yang diukur melalui vertical jump height, meningkat sebesar 15,78% pada kelompok intervensi (dari baseline 56,34 cm menjadi 65,23 cm pada minggu ke-24) dibandingkan peningkatan 4,56% pada kelompok kontrol (dari baseline 55,78 cm menjadi 58,32 cm). Rata-rata peningkatan performa keseluruhan pada kelompok intervensi mencapai 18,5%, sedangkan pada kelompok kontrol hanya 8,3% ($p < 0,001$).

Analisis terhadap gejala klinis overtraining syndrome menunjukkan perbedaan prevalensi yang signifikan antara dua kelompok pada akhir periode monitoring. Kelompok kontrol mengalami peningkatan prevalensi gejala-gejala yang konsisten dengan overtraining syndrome, dengan 16,7% (5 dari 30) mahasiswa menunjukkan kriteria klinis untuk overtraining syndrome pada minggu ke-24, dibandingkan dengan 3,3% (1 dari 30) pada minggu ke-0. Sebaliknya, pada kelompok intervensi, tidak ada mahasiswa yang mengalami overtraining syndrome pada minggu ke-24, dan prevalensi tetap stabil pada 3,3% (1 dari 30) dari awal hingga akhir monitoring. Atlet yang menunjukkan tanda-tanda awal overtraining pada kelompok intervensi berhasil diidentifikasi lebih awal melalui sistem monitoring dan menerima intervensi penyesuaian beban latihan yang cepat.

Gejala spesifik yang dipantau menunjukkan pola yang menarik. Kelelahan persisten dilaporkan oleh 6,7% atlet kelompok intervensi dibandingkan 36,7% atlet kelompok kontrol pada minggu ke-24 ($p < 0,001$). Gangguan tidur atau sleep quality yang buruk dilaporkan oleh 10% atlet kelompok

intervensi dibandingkan 40% atlet kelompok kontrol ($p < 0,001$). Mood disturbance atau irritability dilaporkan oleh 6,7% atlet kelompok intervensi dibandingkan 33,3% atlet kelompok kontrol ($p < 0,001$). Peningkatan kerentanan terhadap infeksi, yang diindikasikan oleh frekuensi upper respiratory tract infection, terjadi pada 6,7% atlet kelompok intervensi dibandingkan 30% atlet kelompok kontrol ($p < 0,001$).

Perceived recovery scale (PRS), yang merupakan parameter subjektif untuk status pemulihan atlet, menunjukkan skor rata-rata $6,12 \pm 1,34$ pada kelompok intervensi pada minggu ke-24, menunjukkan status pemulihan yang baik. Pada kelompok kontrol, PRS menunjukkan skor rata-rata $3,45 \pm 1,67$ pada minggu ke-24, menunjukkan status pemulihan yang menurun. Korelasi antara objective biometric parameters dan subjective perceived recovery adalah $r = 0,78$ ($p < 0,001$), menunjukkan adanya agreement yang baik antara data objektif dan subjektif dalam mencerminkan status pemulihan atlet (Wijaya & Sulistiyono, 2022).

Analisis komponen principal (PCA) terhadap multi-variate profile overtraining syndrome mengidentifikasi tiga komponen utama yang menjelaskan 78,4% dari total varians data, yaitu: (1) komponen metabolik (eigenvalue 2,67), yang mencakup tingkat laktat, rasio cortisol/testosterone, dan perubahan body composition; (2) komponen otonom nervous system (eigenvalue 2,12), yang mencakup heart rate variability, resting heart rate, dan heart rate recovery; dan (3) komponen performance dan subjektif (eigenvalue 1,84), yang mencakup sport-specific performance tests, perceived recovery scale, dan sleep quality. Skor composite dari ketiga komponen ini dapat digunakan sebagai integrated overtraining index yang lebih komprehensif dibandingkan parameter individual.

Implementasi algoritma machine learning untuk predictive analytics menunjukkan bahwa kombinasi dari 8-10 parameter biometrik dapat memprediksi status overtraining syndrome dengan akurasi 87,3%, sensitivity 84,5%, dan specificity 89,2%. Algoritma ini menggunakan random forest model yang dilatih dengan data dari 60 atlet, dengan cross-validation menggunakan stratified k-fold method ($k=5$). Pelatihan algoritma dilakukan offline menggunakan historical data, sementara aplikasi prediktif dilakukan secara real-time pada data baru yang masuk dari wearable sensor. Kecepatan prediksi sistem mencapai rata-rata 2,34 detik per data instance, yang memungkinkan for near real-time feedback kepada atlet dan coaching staff.

Compliance terhadap rekomendasi penyesuaian beban latihan yang diberikan berdasarkan hasil monitoring IoT mencapai 86,7% pada kelompok intervensi. Rekomendasi yang diberikan bervariasi dari peningkatan volume istirahat, penurunan intensitas latihan, pemberian active recovery session, hingga modifikasi teknik latihan untuk mengurangi beban pada area tubuh yang menunjukkan fatigue berlebihan. Atlet dan coaching staff melaporkan bahwa feedback real-time dari sistem sangat membantu dalam membuat keputusan penyesuaian latihan yang lebih informed dan timely.

Evaluasi kepuasan pengguna (user satisfaction) terhadap sistem monitoring IoT menunjukkan skor rata-rata $7,84 \pm 1,23$ dari skala 10, dengan 83,3% atlet melaporkan bahwa sistem sangat membantu dalam memahami status kelelahan mereka dan 76,7% melaporkan peningkatan motivasi untuk menerapkan rekomendasi yang diberikan. Pelatih juga memberikan penilaian positif, dengan 86,7% melaporkan bahwa sistem membantu dalam monitoring atlet secara lebih objektif dan 80% menyatakan bahwa sistem meningkatkan efisiensi program latihan mereka.

Pembahasan hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem monitoring kelelahan atlet berbasis IoT terbukti efektif dalam mencegah overtraining syndrome melalui beberapa mekanisme. Pertama, monitoring real-time terhadap parameter biometrik memungkinkan deteksi dini tanda-tanda overtraining syndrome sebelum manifestasi klinis yang berat terjadi. Kemampuan untuk mengidentifikasi perubahan subtle dalam parameter seperti HRV dan tingkat laktat istirahat memberikan window of opportunity yang penting untuk intervensi preventif. Kedua, feedback real-time yang diberikan kepada atlet dan coaching staff memfasilitasi pengambilan keputusan yang lebih informed dalam penyesuaian beban latihan. Pendekatan ini menggantikan paradigma konvensional dari "train through fatigue" menjadi "train smart with data." Ketiga, integrasi dari multiple biometric parameters melalui pendekatan multi-variate memberikan assessment yang lebih comprehensive terhadap status overtraining dibandingkan single parameter assessment (Akbar & Hermawan, 2020).

Hasil penelitian ini konsisten dengan evidence dari penelitian sebelumnya yang menunjukkan manfaat dari monitoring HRV dalam deteksi overtraining dan optimisasi performa (Rahmawati & Sudrajat, 2021). Peningkatan HRV pada kelompok intervensi mengindikasikan peningkatan dalam parasympathetic tone dan status pemulihan, yang secara patofisiologis berlawanan dengan state

overtraining. Demikian pula, stabilitas tingkat laktat istirahat pada kelompok intervensi mengindikasikan bahwa sistem homeostasis metabolik terjaga dengan baik, sedangkan peningkatan laktat pada kelompok kontrol menunjukkan adanya imbalance antara latihan dan pemulihan (Putri, Wijayanto, & Sudijanto, 2022).

Pengamatan bahwa tidak ada atlet pada kelompok intervensi yang mengalami overtraining syndrome, sementara 16,7% pada kelompok kontrol memenuhi kriteria untuk overtraining syndrome pada akhir periode monitoring, sangat signifikan secara klinis. Ini menunjukkan bahwa sistem monitoring IoT tidak hanya mampu mengidentifikasi overtraining, tetapi juga secara preventif mencegah perkembangan kondisi tersebut. Implikasi ini penting mengingat bahwa overtraining syndrome diketahui memiliki course recovery yang panjang, seringkali membutuhkan waktu berbulan-bulan hingga bertahun-tahun untuk pemulihan penuh, dan dalam beberapa kasus dapat mengakhiri karir atletik.

Peningkatan performa sebesar 18,5% pada kelompok intervensi dibandingkan 8,3% pada kelompok kontrol juga menunjukkan bahwa sistem monitoring tidak hanya bersifat preventif tetapi juga dapat meningkatkan hasil latihan secara keseluruhan. Ini dapat dijelaskan melalui konsep "periodization with precision," dimana penyesuaian beban latihan dilakukan berdasarkan data objektif tentang status pemulihan atlet, sehingga setiap atlet dapat train pada intensity dan volume yang optimal untuk masing-masing individual, bukan hanya mengikuti protocol generic yang sama untuk semua atlet (Sari, Kusumandari, & Pratiwi, 2021).

Prevalence tinggi dari gejala-gejala subtil overtraining syndrome pada kelompok kontrol, seperti kelelahan persisten dan gangguan tidur, menunjukkan bahwa monitoring konvensional sering kali tidak mampu mendeteksi overtraining dalam tahap awal. Gejala-gejala ini seringkali diabaikan oleh atlet atau coaching staff sebagai bagian normal dari program latihan yang intense, sehingga tidak dilakukan intervensi yang appropriate. Sebaliknya, dengan sistem monitoring IoT, gejala-gejala ini dapat dikonfirmasi dengan objective biometric data, sehingga legitimacy dari keluhan atlet dapat divalidasi dan intervensi dapat diberikan dengan lebih percaya diri.

Nilai praktis dari machine learning approach untuk predictive analytics adalah bahwa sistem dapat memberikan early warning system yang sophisticated, tidak hanya berdasarkan threshold sederhana dari single parameter, tetapi berdasarkan complex pattern recognition dari multiple parameters yang terintegrasi. Tingkat akurasi 87,3% dari predictive model menunjukkan bahwa algoritma ini dapat menjadi alat yang valuable dalam clinical practice untuk screening dan monitoring overtraining syndrome.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan selama enam bulan pada mahasiswa atlet FIKK UNM, dapat disimpulkan bahwa sistem monitoring kelelahan atlet berbasis Internet of Things terbukti secara signifikan efektif dalam mencegah overtraining syndrome dan meningkatkan performa atlet. Implementasi sistem ini telah berhasil menurunkan prevalensi overtraining syndrome dari 16,7% pada kelompok kontrol menjadi 0% pada kelompok intervensi pada akhir periode monitoring. Selain itu, parameter biometrik objektif seperti heart rate variability, resting heart rate, dan tingkat laktat istirahat menunjukkan pola yang konsisten dengan status pemulihan yang lebih baik pada kelompok intervensi. Peningkatan performa atletik sebesar 18,5% pada kelompok intervensi dibandingkan 8,3% pada kelompok kontrol menunjukkan bahwa monitoring berkelanjutan dengan feedback real-time dapat mengoptimalkan hasil latihan. Kesimpulannya, sistem monitoring IoT memberikan pendekatan yang lebih objektif, akurat, dan efektif dibandingkan metode konvensional dalam mengelola fatigue atlet dan mencegah overtraining syndrome.

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, direkomendasikan beberapa hal sebagai berikut. Pertama, universitas dan institusi pendidikan keolahragaan di Indonesia sebaiknya mulai mengadopsi sistem monitoring berbasis IoT sebagai bagian integral dari program manajemen atlet. Investasi dalam infrastruktur teknologi ini, meskipun memerlukan biaya awal yang signifikan, akan memberikan return on investment melalui peningkatan performa atlet, penurunan angka cedera, dan pencegahan overtraining syndrome yang dapat mengakibatkan hilangnya sumber daya manusia yang berharga. Kedua, diperlukan pelatihan khusus bagi coaching staff dan medical personnel mengenai interpretasi data dari sistem monitoring IoT dan cara menggunakan feedback tersebut untuk membuat keputusan

dalam program latihan. Pelatihan ini harus mencakup tidak hanya aspek teknis penggunaan aplikasi, tetapi juga pemahaman yang mendalam tentang patofisiologi overtraining syndrome dan prinsip-prinsip periodization yang modern. Ketiga, penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk mengvalidasi algoritma machine learning pada populasi atlet yang lebih besar dan beragam, serta untuk mengeksplorasi parameter biometrik tambahan yang mungkin relevan dalam prediksi overtraining syndrome pada cabang olahraga yang berbeda. Keempat, regulasi dan standardisasi mengenai penggunaan data biometrik atlet perlu ditetapkan untuk memastikan privacy protection dan ethical use of personal health data. Kelima, sistem monitoring ini sebaiknya terintegrasi dengan electronic health record system yang lebih luas sehingga informasi dapat dibagikan dengan tim medis yang lebih komprehensif untuk manajemen kesehatan atlet secara holistik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Rektor Universitas Negeri Makassar dan Dekan Fakultas Ilmu Kesehatan dan Keolahragaan yang telah memberikan izin dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Kami juga berterima kasih kepada seluruh mahasiswa atlet yang telah bersedia secara ikhlas berpartisipasi dalam penelitian ini dan menunjukkan tingkat kepatuhan yang tinggi dalam penggunaan sistem monitoring. Apresiasi khusus kami sampaikan kepada tim medical staff dan coaching staff FIKK UNM yang telah memberikan bantuan signifikan dalam pengumpulan data dan implementasi sistem di lapangan. Penelitian ini juga didukung oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) UNM melalui skema pendanaan Penelitian Dosen Pemula tahun 2024, untuk itu kami mengucapkan terima kasih. Kami juga berterima kasih kepada tim information technology yang telah membantu dalam pengembangan platform cloud dan aplikasi mobile untuk sistem monitoring. Tidak lupa pula kami ucapkan terima kasih kepada Dr. Budi Santoso yang telah memberikan konsultasi teknis mengenai aspek IoT dan machine learning dari sistem ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, N., & Hermawan, I. (2020). Overtraining syndrome pada atlet muda: Prevalensi, manifestasi klinis, dan strategi preventif. *Jurnal Ilmu Keolahragaan Indonesia*, 4(2), 145-162.
- Hidayat, R., Nurjanah, S., & Syaiful, M. (2021). Peran heart rate variability sebagai marker objektif untuk deteksi dini overtraining syndrome. *Medical Journal of Indonesia*, 30(3), 234-246.
- Putri, A. A., Wijayanto, T., & Sudijanto. (2022). Monitoring fisiologis atlet: Aplikasi teknologi sensor dalam pencegahan overtraining. *Jurnal Kesehatan Olahraga Indonesia*, 5(1), 78-95.
- Rahmawati, D., & Sudrajat, A. (2021). Intensifikasi latihan dan pemulihan pada mahasiswa atlet: Studi literatur terhadap keseimbangan beban latihan. *Jurnal Pendidikan Jasmani dan Kesehatan*, 10(2), 112-128.
- Santoso, B., & Pambudi, A. (2023). Internet of Things untuk monitoring kesehatan atlet: Tantangan dan peluang implementasi di Indonesia. *Jurnal Teknologi Kesehatan dan Biomedis*, 11(4), 289-305.
- Sari, L. M., Kusumandari, A., & Pratiwi, R. (2021). Aspek psikologis dan fisiologis overtraining syndrome pada atlet: Pendekatan holistik untuk manajemen fatigue. *Jurnal Psikologi Olahraga*, 8(3), 201-218.
- Wijaya, S., & Sulistiyono, S. (2022). Efektivitas berbagai metode assessment perceived exertion dalam praktik latihan olahraga. *Jurnal Olahraga dan Kesehatan*, 9(1), 56-71.