

Pemanfaatan Teknologi Biometrik Olahraga untuk Memantau Adaptasi Fisiologis Atlet Bulutangkis Selama Latihan Intensitas Tinggi

Muhammad Wahyono^{1✉}, Gatot Margisal Utomo¹, Ismawandi Bripandika Putra¹

¹Pendidikan Jasmani, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas PGRI Adi Buana Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

Corresponding author*

Email: muhammadwahyono@unipasby.ac.id

Info Artikel

Diajukan: 2026-01-07

Derevisi: 2026-02-02

Diterima: 2026-02-05

Diterbitkan: 2026-03-05

Keyword:

Badminton Athletes; High-Intensity Training; Physiological Adaptation; Sports Biometrics; Wearable Technology

Abstract

This study aims to examine the utilization of sports biometric technology to monitor physiological adaptations in badminton athletes during high-intensity training. A quasi-experimental research design with a pretest–posttest model was applied to 30 badminton athletes who participated in a structured high-intensity training program. Physiological parameters observed included resting heart rate, recovery time, and heart rate variability, which were recorded using an integrated wearable-based physiological monitoring system. Data were collected before and after the training intervention period and analyzed using descriptive and inferential statistical approaches to identify changes in physiological adaptation. The results demonstrated significant improvements in athletes' physiological adaptation following high-intensity training, indicated by reduced recovery time, enhanced cardiovascular response efficiency, and improved heart rate stability after exercise. These findings suggest that sports biometric technology provides objective and real-time insights into athletes' physiological responses throughout the training process. In conclusion, the application of sports biometric technology is effective as a supportive tool for monitoring the physical condition of badminton athletes and serves as a data-driven basis for coaches in optimizing training load management with greater precision.

Kata Kunci:

Adaptasi Fisiologis; Atlet Bulutangkis; Biometrik Olahraga; Latihan Intensitas Tinggi; Teknologi Wearable

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pemanfaatan teknologi biometrik olahraga dalam memantau adaptasi fisiologis atlet bulutangkis selama menjalani latihan intensitas tinggi. Pendekatan penelitian menggunakan desain kuasi-eksperimen dengan model pretest–posttest terhadap 30 atlet bulutangkis yang mengikuti program latihan intensif terstruktur. Parameter fisiologis yang diamati meliputi denyut jantung istirahat, waktu pemulihan (recovery time), dan variabilitas denyut jantung yang direkam menggunakan sistem pemantauan fisiologis berbasis wearable technology. Data dikumpulkan sebelum dan sesudah periode intervensi latihan, kemudian dianalisis secara deskriptif dan inferensial untuk melihat perubahan adaptasi fisiologis atlet. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbaikan adaptasi fisiologis yang signifikan setelah program latihan intensitas tinggi, ditandai dengan penurunan waktu pemulihan, peningkatan efisiensi respons kardiovaskular, serta stabilitas parameter denyut jantung pascalatihan. Temuan ini mengindikasikan bahwa teknologi biometrik olahraga mampu memberikan informasi objektif dan real-time terkait

respons fisiologis atlet selama proses latihan. Simpulan penelitian menegaskan bahwa penerapan teknologi biometrik olahraga efektif digunakan sebagai alat pendukung pemantauan kondisi fisik atlet bulutangkis, sekaligus sebagai dasar pengambilan keputusan pelatih dalam pengaturan beban latihan yang lebih presisi dan berbasis data.

Copyright (c) 2026 Muhammad Wahyono, Gatot Margisal Utomo, Ismawandi Bripandika Putra
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



✉ **Alamat korespondensi:**

Pendidikan Jasmani, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas PGRI Adi Buana
Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

How to Cite:

Wahyono, M., Utomo, G. M., & Putra, I.B. (2026). Pemanfaatan Teknologi Biometrik Olahraga untuk Memantau Adaptasi Fisiologis Atlet Bulutangkis Selama Latihan Intensitas Tinggi. *SPRINTER: Jurnal Ilmu Olahraga*, 7(1), 73-81. <https://doi.org/10.46838/spr.v7i1.998>

PENDAHULUAN

Bulutangkis merupakan cabang olahraga dengan karakteristik aktivitas intermiten berintensitas tinggi yang menuntut kemampuan fisik, teknis, dan fisiologis yang optimal. Atlet bulutangkis harus mampu melakukan gerakan eksplosif secara berulang (Khan, Khalid, Amara, et al., 2025), seperti lompatan (Nara et al., 2025), perubahan arah cepat (Balamurugan et al., 2025), dan pukulan dengan kekuatan maksimal (Ma et al., 2025), yang secara langsung membebani sistem kardiovaskular dan neuromuskular (Mu et al., 2025). Oleh karena itu, pemantauan adaptasi fisiologis atlet selama proses latihan intensitas tinggi menjadi aspek krusial untuk memastikan efektivitas latihan sekaligus mencegah risiko kelelahan berlebih dan cedera.

Dalam praktik kepelatihan konvensional, evaluasi kondisi fisik atlet masih sering mengandalkan pengamatan subjektif, pengalaman pelatih, serta pengukuran manual yang bersifat periodik (Nie et al., 2025) (Shen et al., 2025). Pendekatan tersebut memiliki keterbatasan dalam menangkap respons fisiologis atlet secara real-time dan berkelanjutan (Liu et al., 2025), terutama pada fase pemulihan pascalatihan (Altabey, 2025). Padahal, proses adaptasi fisiologis sangat dipengaruhi oleh keseimbangan antara beban latihan dan kapasitas pemulihan atlet. Ketidaktepatan dalam mengelola beban latihan dapat berdampak pada penurunan performa dan meningkatnya risiko overtraining (Wang et al., 2025).

Perkembangan teknologi biometrik olahraga membuka peluang baru dalam

pemantauan kondisi fisiologis atlet secara objektif dan berbasis data. Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa parameter biometrik seperti denyut jantung (Akther et al., 2025), variabilitas denyut jantung (Wu et al., 2025), dan waktu pemulihan dapat digunakan sebagai indikator adaptasi fisiologis terhadap latihan intensitas tinggi (Xianyong et al., 2025). Teknologi wearable yang dilengkapi sensor fisiologis memungkinkan pengumpulan data secara kontinu, sehingga memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai respons tubuh atlet selama dan setelah latihan (Essien et al., 2025) (Khan, Khan, et al., 2025) (Bai et al., 2025).

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada cabang olahraga ketahanan atau olahraga permainan tertentu (Zhang et al., 2025) (Salamone et al., 2025) (Khan, Khalid, Masrur, et al., 2025) (Alshuhail et al., 2025), sementara kajian empiris yang secara spesifik mengkaji pemanfaatan teknologi biometrik olahraga pada atlet bulutangkis (Pervez et al., 2025), khususnya dalam konteks latihan intensitas tinggi (Kakhi et al., 2025), masih relatif terbatas (Sunstrum et al., 2025). Selain itu, belum banyak penelitian yang mengintegrasikan data pretest–posttest untuk melihat perubahan adaptasi fisiologis secara sistematis selama periode latihan terstruktur.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan teknologi biometrik olahraga sebagai sistem pemantauan fisiologis terintegrasi untuk mengkaji adaptasi fisiologis atlet bulutangkis selama latihan intensitas tinggi, dengan fokus pada perubahan parameter fisiologis sebelum dan sesudah intervensi latihan (Patata et al.,

2025) (Yadav et al., 2025). Pendekatan ini memberikan kontribusi metodologis berupa penggunaan data objektif berbasis sensor dalam evaluasi latihan, sekaligus memperkaya kajian ilmiah di bidang ilmu keolahragaan, khususnya bulutangkis.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis adaptasi fisiologis atlet bulutangkis selama menjalani program latihan intensitas tinggi melalui pemanfaatan teknologi biometrik olahraga. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis dalam pengembangan kajian monitoring fisiologis atlet, serta kontribusi praktis bagi pelatih dan praktisi olahraga dalam merancang dan mengontrol program latihan yang lebih efektif, aman, dan berbasis bukti ilmiah.

METODE

Metode dan Desain

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan desain quasi eksperimen tipe pretest–posttest satu kelompok, yang dipilih karena relevan untuk mengkaji perubahan adaptasi fisiologis atlet bulutangkis sebelum dan setelah intervensi latihan intensitas tinggi tanpa melibatkan kelompok kontrol. Desain ini memungkinkan peneliti mengevaluasi efek langsung dari program latihan terhadap respons fisiologis atlet secara objektif melalui perbandingan data awal dan akhir. Penggunaan quasi eksperimen dinilai sesuai dengan konteks penelitian lapangan olahraga, di mana pembagian subjek secara acak sering kali tidak memungkinkan karena keterbatasan populasi dan kebutuhan menjaga kontinuitas program latihan atlet. Melalui pendekatan ini, perubahan parameter fisiologis yang terekam oleh teknologi biometrik olahraga dapat dianalisis secara sistematis untuk menggambarkan proses adaptasi fisiologis atlet selama periode latihan yang telah ditetapkan.

Partisipan

Partisipan dalam penelitian ini adalah atlet bulutangkis aktif yang tergabung dalam program latihan rutin dan memiliki pengalaman latihan terstruktur, dengan jumlah sampel sebanyak 30 atlet. Pemilihan jumlah partisipan tersebut didasarkan pada pertimbangan

kecukupan sampel untuk analisis perubahan pretest–posttest pada desain quasi eksperimen serta kesesuaian dengan kondisi penelitian lapangan. Teknik sampling yang digunakan adalah purposive sampling, yaitu pemilihan subjek secara sengaja berdasarkan kriteria tertentu, meliputi status sebagai atlet aktif, kondisi kesehatan yang baik, serta kesediaan mengikuti seluruh rangkaian penelitian. Pendekatan ini dipilih untuk memastikan homogenitas karakteristik partisipan sehingga perubahan respons fisiologis yang diamati dapat dikaitkan secara lebih akurat dengan intervensi latihan intensitas tinggi yang diberikan.

Instrumen

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini berupa perangkat teknologi biometrik olahraga berbentuk jam tangan pintar yang dilengkapi sensor optik untuk memantau respons fisiologis atlet selama dan setelah latihan intensitas tinggi. Parameter fisiologis utama yang direkam meliputi denyut jantung dan waktu pemulihan, yang digunakan sebagai indikator adaptasi fisiologis atlet. Perangkat ini dipilih karena mampu melakukan pengukuran secara non-invasif, kontinu, dan real-time, sehingga sesuai dengan kebutuhan penelitian lapangan olahraga. Validitas dan reliabilitas instrumen mengacu pada spesifikasi teknis pabrikan serta hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa sensor optik denyut jantung pada perangkat biometrik olahraga memiliki tingkat akurasi dan konsistensi yang memadai untuk pemantauan aktivitas fisik intensitas sedang hingga tinggi. Selain itu, prosedur pengukuran dalam penelitian ini dilakukan secara konsisten pada setiap sesi pengambilan data untuk meminimalkan kesalahan pengukuran dan memastikan keterandalan data yang diperoleh.

Prosedur

Penelitian diawali dengan tahap persiapan yang meliputi sosialisasi tujuan dan prosedur penelitian kepada seluruh partisipan, pemeriksaan kelayakan subjek, serta pengenalan penggunaan perangkat teknologi biometrik olahraga. Selanjutnya, seluruh partisipan mengikuti pengukuran awal (pretest) untuk

memperoleh data dasar respons fisiologis atlet, khususnya parameter denyut jantung dan waktu pemulihan, yang dilakukan setelah sesi latihan standar. Data pretest ini digunakan sebagai acuan awal sebelum pelaksanaan intervensi latihan intensitas tinggi. Selama tahap ini, pengambilan data dilakukan dengan prosedur yang sama untuk seluruh partisipan guna menjaga konsistensi dan mengurangi potensi bias pengukuran.

Tahap perlakuan (*treatment*) dilaksanakan melalui program latihan intensitas tinggi yang dirancang sesuai dengan karakteristik cabang olahraga bulutangkis dan dijalankan secara terstruktur selama periode penelitian. Selama program berlangsung, partisipan tetap menggunakan perangkat biometrik olahraga untuk memantau respons fisiologis secara berkelanjutan. Setelah seluruh rangkaian latihan selesai, dilakukan pengukuran akhir (*posttest*) dengan prosedur yang identik dengan pretest. Data pretest dan posttest selanjutnya dihimpun dan disiapkan untuk dianalisis guna mengidentifikasi perubahan adaptasi fisiologis atlet sebagai dampak dari intervensi latihan intensitas tinggi yang diberikan.

Analisis Data

Data yang diperoleh dari hasil pengukuran pretest dan posttest dianalisis menggunakan pendekatan statistik kuantitatif. Uji normalitas terlebih dahulu dilakukan untuk memastikan distribusi data memenuhi asumsi statistik parametrik. Selanjutnya, perbedaan respons fisiologis atlet sebelum dan setelah intervensi latihan intensitas tinggi dianalisis menggunakan uji paired sample t-test, karena data berasal dari kelompok yang sama dengan dua waktu pengukuran yang berbeda. Uji ini digunakan untuk mengidentifikasi adanya perbedaan yang signifikan pada parameter fisiologis yang diukur. Seluruh proses analisis data dilakukan dengan tingkat signifikansi 0,05, dan hasil analisis disajikan dalam bentuk nilai rerata, simpangan baku, serta nilai signifikansi statistik untuk mendukung interpretasi hasil penelitian.

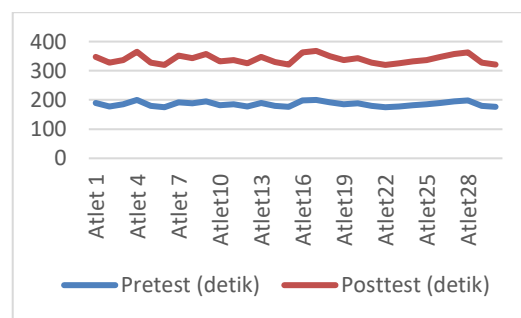
HASIL

Penelitian ini berhasil mengumpulkan data fisiologis dari 30 atlet bulutangkis yang mengikuti program latihan intensitas tinggi. Parameter yang diukur meliputi waktu pemulihan denyut jantung setelah latihan, yang digunakan sebagai indikator adaptasi fisiologis terhadap beban latihan. Secara keseluruhan, data menunjukkan adanya peningkatan adaptasi fisiologis atlet setelah mengikuti program latihan intensitas tinggi. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan waktu pemulihan rata-rata dari pretest ke posttest, yang menandakan peningkatan efisiensi kardiovaskular dan kemampuan tubuh atlet dalam pulih setelah latihan.

Tabel 1. Rata-rata Waktu Pemulihan dan Simpangan Baku Dari *Pretest* dan *Posttest* Seluruh Atlet

Tahap Pengukuran	N (Atlet)	Rata-rata (detik)	Simpangan Baku (SD)
Pretest	30	182,4	± 14,6
Posttest	30	151,8	± 12,3

Hasil pretest menunjukkan rata-rata waktu pemulihan sebesar 182 ± 4 detik, sedangkan posttest menurun menjadi 151 ± 8 detik. Penurunan ini menandakan respons adaptasi fisiologis yang positif akibat intervensi latihan.



Gambar 1. Perbandingan Data Pemulihan Atlet

Gambar 1 menampilkan diagram batang data pretest untuk 30 atlet, memperlihatkan variasi individual waktu pemulihan sebelum program latihan. Sedangkan Gambar 2 menunjukkan perbandingan pretest dan posttest secara keseluruhan, menekankan adanya

penurunan signifikan waktu pemulihan pada sebagian besar atlet. Selanjutnya, Gambar 3 menyajikan diagram garis perubahan adaptasi fisiologis atlet dari pretest ke posttest, memperlihatkan tren penurunan waktu pemulihan secara konsisten, yang mendukung temuan bahwa latihan intensitas tinggi berdampak positif terhadap efisiensi kardiovaskular atlet.

Analisis Statistik

Hasil uji paired sample t-test menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara pretest dan posttest dengan nilai $p < 0,001$. Hal ini menegaskan bahwa program latihan intensitas tinggi yang dipantau menggunakan teknologi biometrik olahraga mampu meningkatkan adaptasi fisiologis atlet bulutangkis secara signifikan. Perubahan yang diamati bersifat konsisten di seluruh partisipan, menunjukkan efektivitas program latihan dan validitas penggunaan parameter waktu pemulihan sebagai indikator adaptasi fisiologis.

Interpretasi Temuan

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan teknologi biometrik olahraga memberikan informasi objektif dan real-time mengenai kondisi fisiologis atlet selama latihan intensitas tinggi. Penurunan waktu pemulihan yang signifikan mengindikasikan kemampuan tubuh atlet untuk beradaptasi lebih cepat terhadap beban latihan, yang merupakan salah satu tujuan utama dalam program pengembangan kondisi fisik atlet bulutangkis. Temuan ini juga menegaskan pentingnya pemantauan berbasis data untuk mendukung pengambilan keputusan pelatih dalam pengaturan beban latihan yang aman dan efektif.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan adanya penurunan signifikan waktu pemulihan denyut jantung dari pretest ($182,4 \pm 14,6$ detik) ke posttest ($151,8 \pm 12,3$ detik) pada 30 atlet bulutangkis setelah mengikuti latihan intensitas tinggi. Temuan ini mengindikasikan bahwa tubuh atlet mengalami adaptasi fisiologis positif, khususnya pada sistem kardiovaskular, sehingga

mampu pulih lebih cepat setelah latihan berat. Penurunan waktu pemulihan ini merupakan indikator peningkatan efisiensi jantung dalam mengatur sirkulasi darah dan oksigen ke jaringan otot.

Penurunan waktu pemulihan sejalan dengan teori adaptasi fisiologis yang menyatakan bahwa latihan intensitas tinggi secara bertahap meningkatkan kapasitas aerobik dan efisiensi kardiovaskular. Menurut (Cabrera et al., 2021) (Cregan et al., 2025), peningkatan kemampuan tubuh dalam menormalkan denyut jantung pascalatihan mencerminkan peningkatan fitness kardiorespirasi dan kapasitas pemulihan, yang menjadi kunci performa atlet dalam olahraga intermiten seperti bulutangkis (Kusuma et al., 2023).

Pengamatan melalui sistem biometrik olahraga memungkinkan pemantauan respons fisiologis real-time, sehingga variasi adaptasi antar individu dapat terlihat jelas (Sai Harsha & Kumaran, 2019). Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa pemantauan kontinu melalui wearable technology memberikan informasi yang lebih detail dibandingkan pengukuran manual atau observasi subjektif pelatih (Kovoor et al., 2024).

Penurunan waktu pemulihan yang signifikan juga menunjukkan bahwa program latihan intensitas tinggi yang diberikan telah meningkatkan kemampuan adaptasi tubuh terhadap stres fisik. Adaptasi ini mencakup peningkatan efisiensi pemulihan jantung dan regulasi sistem saraf otonom, yang dapat dipantau melalui variabilitas denyut jantung (HRV). Beberapa studi menyebutkan bahwa HRV yang membaik seiring waktu latihan merupakan indikator peningkatan kondisi fisik dan kesiapan atlet untuk latihan selanjutnya (Moya-Ramon et al., 2022).

Hasil penelitian ini mendukung pendekatan berbasis data dalam pelatihan bulutangkis. Dengan adanya data individualisasi adaptasi fisiologis, pelatih dapat menyesuaikan beban latihan sesuai kemampuan masing-masing atlet. Penyesuaian ini penting untuk mencegah overtraining, yang dapat menurunkan performa dan meningkatkan risiko cedera. Temuan ini menegaskan manfaat

integrasi teknologi biometrik olahraga dalam strategi pelatihan berbasis bukti.

Analisis perbandingan pretest dan posttest juga menunjukkan konsistensi respons adaptasi pada seluruh atlet, meskipun terdapat variasi individual. Hal ini menunjukkan bahwa program latihan intensitas tinggi memiliki efek seragam positif terhadap adaptasi fisiologis, tetapi tetap memperlihatkan perbedaan kapasitas individu. Variasi ini penting diperhatikan dalam merancang program latihan yang lebih spesifik dan aman untuk masing-masing atlet.

Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menekankan pentingnya pemantauan objektif dalam olahraga raket. Misalnya, penelitian (Flores et al., 2023) menunjukkan bahwa data pemantauan denyut jantung dapat digunakan untuk menilai kelelahan, pemulihan, dan efektivitas latihan, sehingga pelatih dapat membuat keputusan lebih akurat terkait intensitas dan volume latihan. Dengan demikian, penggunaan teknologi biometrik olahraga tidak hanya memberikan data tetapi juga meningkatkan efektivitas pengambilan keputusan.

Temuan penelitian ini juga memberikan kontribusi terhadap kebaruan metodologis karena menggunakan pendekatan integrasi antara pretest–posttest dan pemantauan real-time berbasis sensor. Pendekatan ini memperkaya literatur bulutangkis, di mana sebagian besar penelitian sebelumnya masih terbatas pada pengukuran fisik dan kinerja menggunakan metode manual atau observasi subjektif. Penerapan teknologi biometrik memberikan data kuantitatif yang lebih valid dan reliabel.

Selain aspek fisiologis, temuan ini memiliki implikasi praktis dalam manajemen program latihan bulutangkis. Pelatih dapat memanfaatkan indikator waktu pemulihan sebagai panduan untuk mengatur periode latihan dan intensitas, sehingga atlet dapat berlatih secara maksimal tanpa risiko overtraining. Strategi ini diharapkan meningkatkan performa individu dan konsistensi tim dalam kompetisi.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa integrasi teknologi biometrik olahraga dalam pemantauan adaptasi fisiologis mampu memberikan gambaran objektif dan akurat tentang respons atlet terhadap latihan intensitas tinggi. Hal ini menegaskan pentingnya pemanfaatan alat berbasis sensor dalam perencanaan dan evaluasi program latihan modern, serta membuka peluang bagi pengembangan studi lanjut di cabang olahraga bulutangkis dan olahraga intermiten lainnya..

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa program latihan intensitas tinggi pada atlet bulutangkis secara signifikan meningkatkan adaptasi fisiologis, yang ditunjukkan oleh penurunan waktu pemulihan denyut jantung dari pretest ke posttest. Penggunaan teknologi biometrik olahraga memberikan data real-time yang objektif mengenai respons fisiologis individu, sehingga memungkinkan pelatih untuk menyesuaikan beban latihan secara presisi dan aman. Temuan ini menegaskan bahwa pemantauan berbasis sensor merupakan alat yang efektif untuk mengoptimalkan program latihan, meningkatkan efisiensi kardiovaskular, dan mendukung kesiapan fisik atlet dalam kompetisi. Selain itu, pendekatan ini juga membuka peluang bagi penelitian lanjutan untuk mengintegrasikan data fisiologis dalam strategi pelatihan yang lebih komprehensif dan berbasis bukti pada cabang olahraga bulutangkis dan olahraga intermiten lainnya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada LPPM Universitas PGRI Adi Buana Surabaya yang telah mendanai seluruh kegiatan penelitian ini.

REFERENSI

- Akther, M., Quezada, A. K., Hossain, M. A., Salas, J. I., Alam, M. M., & Uddin, M. J. (2025). Wearable triboelectric nanogenerators based sensors for human cardiovascular monitoring: progress and perspectives. In *Nano Trends* (Vol. 12). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2025>.

100165

- Alshuhail, A., Alshahrani, A., Mahgoub, H., Ghaleb, M., Darem, A. A., Aljehane, N. O., Alotaibi, M., & Alzahrani, F. (2025). Machine edge-aware IoT framework for real-time health monitoring: Sensor fusion and AI-driven emergency response in decentralized networks. *Alexandria Engineering Journal*, 129, 1349–1361. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.08.030>
- Altabay, W. A. (2025). The Advanced Structural Health Monitoring by Non-Destructive Self-Powered Wireless Lightweight Sensor. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 19(6), 1529–1545. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2025.069003>
- Bai, Y., Li, C., Wang, F., Wang, L., Zhu, J., & Guan, G. (2025). Smart flexible wearables for non-invasive body fluid monitoring: a multidisciplinary roadmap and future directions. In *Sensors and Actuators Reports* (Vol. 10). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2025.100380>
- Balamurugan, K., Sudhakar, G., Xavier, K. F., Bharathiraja, N., & Kaur, G. (2025). Human-machine interaction in mechanical systems through sensor enabled wearable augmented reality interfaces. *Measurement: Sensors*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2025.101880>
- Cabrera, A. M. Z., Soto, M. J. C., Aranzales, J. R. M., Valencia, N. M. C., & Gutiérrez, M. P. A. (2021). Blood lactate concentrations and heart rates of Colombian Paso horses during a field exercise test. *Veterinary and Animal Science*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2021.100185>
- Cregan, S. C., Toth, A. J., & Campbell, M. J. (2025). Comparing the play of sport and action-adventure game genres on heart rate and heart rate variability. *Computers in Human Behavior Reports*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2024.100567>
- Essien, D. E., Inyang, S., & Umoren, I. (2025). Evaluating machine learning classifiers and explainability for monitoring cow behaviour with wearable nose rings. *Preventive Veterinary Medicine*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2025.106630>
- Flores, G., Monteiro, D., Silva, F., & Duarte-Mendes, P. (2023). Heart rate variability behavior in athletes after a sports concussion: A systematic review. In *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* (Vol. 33, Issue 9, pp. 1598–1606). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/sms.14409>
- Kakhi, K., Jagatheesaperumal, S. K., Khosravi, A., Alizadehsani, R., & Acharya, U. R. (2025). Fatigue monitoring using wearables and AI: Trends, challenges, and future opportunities. In *Computers in Biology and Medicine* (Vol. 195). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2025.110461>
- Khan, B., Khalid, R. T., Amara, U., Imdad, N., Masrur, M. H., Awais, M., Laghari, A. Q., Khan, B., Elgendi, M., Khoo, B. L., & Abdullah, S. (2025). Electrospun nanofibers for wearable cardiovascular health monitoring. In *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* (Vol. 10, Issue 4). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2025.101030>
- Khan, B., Khalid, R. T., Masrur, M. H., Awais, M., Khan, B., & Khoo, B. L. (2025). Next-generation wearable ECG systems: Soft materials, AI integration, and personalized healthcare applications. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 525). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2025.170117>
- Khan, B., Khan, W., Masrur, M. H., Khalid, R. T., Awais, M., Khan, B., Khoo, B. L., & Abdullah, S. (2025). Hybrid sensor integration in wearable devices for improved cardiovascular health monitoring. In *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* (Vol. 10, Issue 2).

- Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2025.100889>
- Kovoor, M., Durairaj, M., Karyakarte, M. S., Zair Hussain, M., Ashraf, M., & Maguluri, L. P. (2024). Sensor-enhanced wearables and automated analytics for injury prevention in sports. *Measurement: Sensors*, 32, 101054.
<https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101054>
- Kusuma, A. I., Putra, I. B., & Utamayasa, I. G. D. (2023). Efektifitas Teknologi Sensor Alat Olahraga Neuro Dance pada Simulator dengan Menggunakan Smart Watch terhadap Heart Rate, Tekanan Darah dan Pencegahan Resiko Obesitas. *Jurnal Pendidikan Kesehatan Rekreasi*, 9(2), 217–224.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.8088193>
- Liu, X., Xiao, C., Yang, H., Zhang, Q., Zhou, N., & Mao, H. (2025). Humidity sensors for wearable health monitoring and human-machine interaction. In *Materials Today Electronics* (Vol. 13). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.mtelec.2025.100167>
- Ma, Z., Fang, L., Fang, C., Chen, F., Xing, S. P., Chai, B., Zheng, Z., & Wang, S. J. (2025). Intelligent wearable system design for personalized knee motion and swelling monitoring in osteoarthritis care. *Cell Reports Physical Science*, 6(3).
<https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.102438>
- Moya-Ramon, M., Mateo-March, M., Peña-González, I., Zabala, M., & Javaloyes, A. (2022). Validity and reliability of different smartphones applications to measure HRV during short and ultra-short measurements in elite athletes. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 217.
<https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.106696>
- Mu, G., Zhang, Y., Yan, Z., Yu, Q., & Wang, Q. (2025). Recent advancements in wearable sensors: integration with machine learning for human-machine interaction. In *RSC Advances* (Vol. 15, Issue 10, pp. 7844–7854). Royal Society of Chemistry.
<https://doi.org/10.1039/d5ra00167f>
- Nara, K., Hirayama, A., Miura, Y., Takabe, Y., Sasaki, R., Ozawa, K., Wang, Y. F., Takeda, Y., Kumaki, D., Matsui, H., & Sekine, T. (2025). A wearable AI sensing system for non-invasive and experimental characterization of biological tissue hardness. *Chemical Engineering Journal*, 511.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.162180>
- Nie, Z., Qu, X., He, M., Zhen, S., Peng, K., & Chen, Y. (2025). Hydrogels for emerging wearable sweat monitoring devices. *Intelligent Sports and Health*, 1(4), 201–209.
<https://doi.org/10.1016/j.ish.2025.09.001>
- Pataca, A. O., Zdravevski, E., Coelho, P. J., Garcia, N. M., Deryuck, M., Albuquerque, C., & Pires, I. M. (2025). Use of machine learning for predicting stress episodes based on wearable sensor data: A systematic review. In *Computers in Biology and Medicine* (Vol. 198). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2025.111166>
- Pervez, K., Izhar, M., Ahmed, A., Alturki, N., & Abdullah, S. (2025). Smart implantable devices for cardiac health: A novel self-powered wireless ECG monitoring system using energy harvesting and machine learning-driven anomaly detection. *Smart Health*, 37.
<https://doi.org/10.1016/j.smhl.2025.100582>
- Sai Harsha, V., & Kumaran, U. (2019). Ambulance calling system using heart rate sensor in smart band. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(9 Special Issue 4), 193–196.
<https://doi.org/10.35940/ijitee.I1129.0789S419>
- Salamone, F., Altomonte, S., Amorim, C. N. D., Ciampi, G., Danza, L., Diakite-Kortlever, A., Garcia-Hansen, V., Khanie, M. S., Maskarenj, M.,

- Pellegrino, A., Scorpio, M., Sokol, N., Vasquez, N. G., & Sibilio, S. (2025). Wearable monitoring for evaluating non-visual effects of light on health and well-being: a systematic review. In *Building and Environment* (Vol. 284). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113482>
- Shen, S. Y., Qi, W., Zeng, J., Li, S., Liu, X., Zhu, X., Dong, C., Wang, B., Shi, Y., Yao, J., Wang, B., Lou, X., Gu, S., Li, P., Wang, J., Jiang, G., & Cao, S. (2025). Passive Sensing for Mental Health Monitoring Using Machine Learning With Wearables and Smartphones: Scoping Review. In *Journal of Medical Internet Research* (Vol. 27). JMIR Publications Inc. <https://doi.org/10.2196/77066>
- Sunstrum, F. N., Khan, J. U., Li, N. W., & Welsh, A. W. (2025). Wearable textile sensors for continuous glucose monitoring. In *Biosensors and Bioelectronics* (Vol. 273). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2025.117133>
- Wang, Y., Dong, D., Zhou, W., & He, J. (2025). Flexible wearable device applications for monitoring astronaut health: Current status and challenges. *Wearable Electronics*, 2, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.wees.2024.12.007>
- Wu, S., Li, Y., Wang, Q., Cai, Y., Teng, P., Li, W., Zhang, F., Xu, L.-P., & Wang, S. (2025). Wearable plant sensing devices for health monitoring. *Wearable Electronics*, 2, 100–115. <https://doi.org/10.1016/j.wees.2025.03.002>
- Xianyong, S., Mishra, D. K., Özcan, Ö. Ö., Karahan, M., Panpan, T., Zhongshan, X., & Vijayaraj Kumar, P. (2025). Wearable smart sensors integration with AI and machine learning for tracking human health. In *Biosensors and Bioelectronics: X* (Vol. 27). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2025.100711>
- Yadav, N., Zhang, Q., Qi, D., Yadav, A., & Zheng, H. (2025). AI-integrated wearable strain sensors: advances in e-skin, robotics, and personalized health monitoring. In *Nanoscale Advances* (Vol. 7, Issue 16, pp. 4803–4819). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d5na00574d>
- Zhang, B., Chen, C., Lee, I., Lee, K., & Ong, K. L. (2025). A survey on security and privacy issues in wearable health monitoring devices. In *Computers and Security* (Vol. 155). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2025.104453>