

PEMANTAUAN KELELAHAN SECARA LANGSUNG MELALUI MOXY MONITOR

Fadhli Munadi Manalu¹, Jajat Darajat Kusumah Negara², Agus Gumilar³
Universitas Pendidikan Indonesia^{1,2,3}
fadhlimm_3@upi.edu¹

ABSTRAK

Pemantauan respons fisiologis pada atlet bulu tangkis masih menjadi tantangan karena metode konvensional seringkali tidak mampu memberikan informasi secara *real-time* mengenai pemanfaatan oksigen otot lokal dan perkembangan kelelahan. Studi ini bertujuan untuk meneliti hubungan antara rasio saturasi oksigen otot (SmO₂ Ratio), Indeks Kelelahan, dan pengambilan oksigen maksimal (VO₂Max) pada atlet bulu tangkis menggunakan pemantauan oksigenasi otot secara *real-time*. Desain korelasional kuantitatif digunakan yang melibatkan 10 atlet bulu tangkis kompetitif dari PB Mutiara Cardinal, Bandung, Indonesia. Saturasi oksigen otot diukur menggunakan MOXY Monitor berbasis teknologi *Near-Infrared Spectroscopy* (NIRS), Indeks Kelelahan dinilai melalui *Running Anaerobic Sprint Test* (RAST), dan VO₂Max diperkirakan menggunakan 20-meter *Multistage Shuttle Run Test*. Data dianalisis menggunakan korelasi Pearson, regresi linier sederhana, regresi linier berganda, dan *path analysis*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa (1) Rasio SmO₂ tidak berhubungan secara signifikan dengan Indeks Kelelahan ($r = 0,463$, $p = 0,177$); (2) Rasio SmO₂ berhubungan secara signifikan dengan VO₂Max ($r = 0,859$, $p = 0,001$), menjelaskan 73,8% variansnya; (3) Indeks Kelelahan juga berhubungan secara signifikan dengan VO₂Max ($r = 0,763$, $p = 0,010$); dan (4) Rasio SmO₂ dan Indeks Kelelahan secara bersama-sama menjelaskan 90,8% varians pada VO₂Max. Dapat disimpulkan bahwa Rasio SmO₂ merupakan prediktor fisiologis yang kuat terhadap kapasitas aerobik dan bahwa pemantauan MOXY secara *real-time* memberikan pendekatan praktis untuk mengevaluasi status fisiologis dan mendukung optimalisasi kinerja pada atlet bulu tangkis.

Kata Kunci: Badminton, Indeks Kelelahan, Monitor Moxy, NIRS, Saturasi Oksigen Otot

ABSTRACT

Monitoring physiological responses in badminton athletes remains challenging because conventional methods are often unable to provide real-time information regarding local muscle oxygen utilization and fatigue development. This study aimed to examine the relationships among muscle oxygen saturation ratio (SmO₂ Ratio), Fatigue Index, and maximal oxygen uptake (VO₂Max) in badminton athletes using real-time muscle oxygenation monitoring. A quantitative correlational design was employed involving 10 competitive badminton athletes from PB Mutiara Cardinal, Bandung, Indonesia. Muscle oxygen saturation was measured using the MOXY Monitor based on Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) technology, Fatigue Index was assessed through the Running Anaerobic Sprint Test (RAST), and VO₂Max was estimated using the 20-meter Multistage Shuttle Run Test. Data were

analyzed using Pearson correlation, simple linear regression, multiple linear regression, and path analysis. The results showed that (1) SmO₂ Ratio was not significantly related to Fatigue Index ($r = 0.463$, $p = 0.177$); (2) SmO₂ Ratio was significantly associated with VO₂Max ($r = 0.859$, $p = 0.001$), explaining 73.8% of its variance; (3) Fatigue Index was also significantly related to VO₂Max ($r = 0.763$, $p = 0.010$); and (4) SmO₂ Ratio and Fatigue Index jointly explained 90.8% of the variance in VO₂Max. It can be concluded that SmO₂ Ratio is a strong physiological predictor of aerobic capacity and that real-time MOXY monitoring provides a practical approach for evaluating physiological status and supporting performance optimization in badminton athletes.

Keywords: *Badminton, Fatigue Index, Moxy Monitor, NIRS, Muscle Oxygen Saturation*

PENDAHULUAN

Bulutangkis adalah olahraga intermiten intensitas tinggi yang ditandai dengan gerakan eksplosif yang berulang-ulang, termasuk berlari cepat, melompat, menerjang, perubahan arah yang cepat, dan eksekusi pukulan yang dilakukan dalam interval pemulihan yang singkat. Tuntutan fisiologis bulutangkis mengharuskan atlet untuk berulang kali melakukan transisi antara sistem energi aerobik dan anaerobik sepanjang pertandingan. Selama pertandingan kompetitif, atlet sering kali tampil dengan intensitas melebihi 85–90% detak jantung maksimalnya sekaligus menjaga akurasi teknis dan pengambilan keputusan taktis. Akibatnya, kapasitas aerobik dan efisiensi neuromuskular merupakan penentu penting performa bulu tangkis (Phomsoupha, 2020; Tai et al., 2022). Sifat bulutangkis yang menuntut memberi tekanan besar pada sistem muskuloskeletal dan kardiorespirasi, yang menyebabkan terjadinya kelelahan. Kelelahan secara umum didefinisikan sebagai berkurangnya kemampuan untuk menghasilkan kekuatan atau mempertahankan kinerja dan mungkin timbul baik dari mekanisme pusat maupun perifer. Dalam olahraga raket, kelelahan neuromuskular dapat mengganggu kualitas gerakan, waktu reaksi, koordinasi, dan akurasi pukulan, yang pada akhirnya mempengaruhi hasil pertandingan. Lebih jauh lagi, kelelahan yang berkepanjangan telah dikaitkan dengan peningkatan risiko cedera muskuloskeletal akibat berkurangnya kontrol motorik dan stabilitas sendi (Girard & Millet, 2009). Oleh karena itu, memahami mekanisme kelelahan dan memantau respons fisiologis selama latihan sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja atlet dan mengurangi risiko cedera.

Secara tradisional, kelelahan atlet dipantau menggunakan indikator subjektif dan sistemik seperti *Rating of Perceived Exertion* (RPE), *Heart Rate* (HR), dan *Heart Rate Variability* (HRV). Meskipun metode ini praktis dan diterapkan secara luas, metode ini mempunyai beberapa keterbatasan. Ukuran subyektif dipengaruhi oleh faktor psikologis, emosional, dan motivasi, sedangkan HR dan HRV terutama mencerminkan respons fisiologis sistemik daripada kondisi otot lokal. Akibatnya, pendekatan ini mungkin tidak secara akurat mendeteksi timbulnya kelelahan otot lokal yang sering terjadi selama aktivitas intermiten dengan intensitas tinggi seperti bulu tangkis (Flatt et al., 2019; Saw et al., 2016). Ketidakmampuan untuk mengidentifikasi tanda-tanda awal kelelahan perifer dapat mengurangi efektivitas pemantauan pelatihan dan intervensi pemulihan. Kemajuan terkini dalam teknologi pemantauan fisiologis yang dapat dikenakan telah memberikan peluang baru untuk

menilai kelelahan secara lebih obyektif dan spesifik. Salah satu pendekatan yang paling menjanjikan adalah *Near-Infrared Spectroscopy* (NIRS), yang memungkinkan pengukuran saturasi oksigen otot (SmO_2) non-invasif dan pemanfaatan oksigen lokal secara *real-time*. Di antara perangkat NIRS yang tersedia secara komersial, Monitor MOXY semakin mendapat perhatian karena portabilitas, kepraktisan, dan kemampuannya untuk terus memantau oksigenasi otot selama berolahraga. Dengan mengukur keseimbangan antara pengiriman oksigen dan konsumsi oksigen pada tingkat otot, MOXY memberikan informasi berharga mengenai stres metabolik, efisiensi otot, dan status pemulihan yang tidak dapat ditangkap hanya melalui metode pemantauan konvensional (Perrey & Ferrari, 2018).

Relevansi saturasi oksigen otot sebagai penanda fisiologis baru-baru ini ditunjukkan oleh Negara et al., (2024), yang menyelidiki hubungan antara VO_2max dan SmO_2 pada atlet bulutangkis universitas. Temuan mereka mengungkapkan bahwa atlet dengan kapasitas aerobik superior menunjukkan pola pemanfaatan oksigen otot yang lebih efisien selama latihan. Studi lebih lanjut menunjukkan bahwa SmO_2 dapat berfungsi sebagai indikator sensitif adaptasi fisiologis dan intensitas latihan, terutama selama transisi antara dominasi metabolisme aerobik dan anaerobik. Temuan ini menyoroti potensi pemantauan SmO_2 untuk memberikan wawasan lebih dalam mengenai perkembangan kelelahan dan kapasitas kinerja pada atlet bulu tangkis. Selain itu, Negara (2023) menunjukkan efektivitas teknologi MOXY dalam mengevaluasi kinerja atlet melalui analisis saturasi oksigen otot secara *real-time* pada atlet bersepeda. Studi tersebut melaporkan bahwa fluktuasi SmO_2 mencerminkan perubahan beban kerja otot dan stres fisiologis selama latihan, menunjukkan bahwa data oksigenasi otot dapat digunakan untuk menilai respons pelatihan dan kesiapan kinerja. Kemampuan MOXY untuk memberikan umpan balik langsung mengenai kondisi otot lokal menawarkan keuntungan signifikan bagi pelatih dan ilmuwan olahraga yang ingin menerapkan strategi pelatihan berbasis bukti dan program pemulihan individual. Meskipun terdapat perkembangan yang menjanjikan, penerapan pemantauan berbasis MOXY dalam bulu tangkis masih terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada olahraga ketahanan, sedangkan penyelidikan yang melibatkan olahraga raket intermiten masih jarang. Kesenjangan ini sangat penting karena bulutangkis memerlukan tindakan daya ledak berulang yang memberikan tekanan metabolik dan mekanis yang besar pada kelompok otot tertentu, terutama otot paha depan, paha belakang, gastrocnemius, dan bahu. Kelelahan yang terlokalisasi pada otot-otot ini dapat terjadi bahkan ketika indikator fisiologis sistemik tampak stabil, sehingga metode pemantauan konvensional tidak cukup untuk menilai kesiapan dan pemulihan atlet secara akurat.

Pemantauan saturasi oksigen otot secara terus menerus memberikan informasi objektif kepada praktisi mengenai pemanfaatan oksigen otot dan stres metabolik, memungkinkan kuantifikasi intensitas latihan dan beban latihan yang lebih akurat. Akibatnya, metrik yang berasal dari SmO_2 dapat mendukung resep latihan individual, manajemen kelelahan, dan optimasi kinerja (A. A. Vasquez-bonilla et al., 2024). Meskipun penelitian sebelumnya telah menetapkan nilai SmO_2 sebagai penanda metabolisme otot dan intensitas latihan, masih terdapat bukti terbatas mengenai penerapannya untuk pemantauan kelelahan secara *real-time* dalam bulu tangkis. Secara khusus, sedikit yang diketahui tentang bagaimana

respons oksigenasi otot dapat digunakan untuk mengkarakterisasi kelelahan perifer dan memberikan penilaian komprehensif terhadap status fisiologis selama aktivitas khusus bulu tangkis. Mengatasi kesenjangan ini sangat penting untuk memajukan pemahaman ilmiah tentang mekanisme kelelahan dan meningkatkan pendekatan pemantauan praktis dalam lingkungan bulu tangkis kompetitif. Berbeda dari penelitian-penelitian terdahulu yang umumnya mengevaluasi saturasi oksigen otot secara terpisah dari indikator kelelahan dan kapasitas aerobik, penelitian ini menawarkan kebaruan dengan mengintegrasikan Rasio SmO_2 , Indeks Kelelahan, dan VO_2Max secara simultan melalui pemantauan *real-time* berbasis MOXY pada atlet bulu tangkis, sebuah pendekatan yang belum banyak dikaji pada cabang olahraga ini. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk menyelidiki pemantauan kelelahan secara *real-time* melalui teknologi MOXY pada atlet bulu tangkis dengan mengidentifikasi karakteristik kelelahan perifer berdasarkan respons oksigenasi otot dan memeriksa kemampuan pengukuran SmO_2 untuk memberikan penilaian holistik terhadap status fisiologis atlet. Temuan ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan aplikasi pemantauan yang dapat dikenakan dalam ilmu olahraga, sekaligus menawarkan rekomendasi praktis bagi pelatih, praktisi, dan atlet dalam mengoptimalkan program pelatihan dan pemulihan.

KAJIAN TEORI

Bulu tangkis merupakan olahraga intermiten berintensitas tinggi yang menuntut kemampuan aerobik dan anaerobik secara bersamaan. Selama pertandingan, atlet melakukan gerakan eksplosif seperti sprint, lompatan, perubahan arah, dan pukulan secara berulang sehingga meningkatkan kebutuhan energi dan oksigen. Kondisi tersebut menyebabkan terjadinya kelelahan fisiologis yang dipengaruhi oleh kelelahan perifer maupun sentral. Kelelahan perifer terjadi akibat menurunnya kemampuan otot menghasilkan kontraksi karena meningkatnya konsumsi oksigen dan akumulasi metabolit, sedangkan kelelahan sentral berkaitan dengan penurunan aktivasi sistem saraf pusat (Phomsoupha & Laffaye, 2015; Rusdiana et al., 2023).

Perkembangan teknologi *Near-Infrared Spectroscopy* (NIRS) memungkinkan pemantauan oksigenasi otot secara *real-time* melalui parameter *Muscle Oxygen Saturation* (SmO_2). Perangkat Moxy Monitor mampu mengukur baseline SmO_2 , SmO_2 minimum (nadir), ΔSmO_2 , dan reoxygenation sehingga memberikan informasi mengenai keseimbangan antara suplai dan konsumsi oksigen pada otot selama aktivitas fisik. Selain itu, kapasitas aerobik yang diukur melalui VO_2max serta performa anaerobik seperti *Running-based Anaerobic Sprint Test* (RAST) merupakan indikator penting dalam menggambarkan kemampuan fisiologis atlet. Integrasi ketiga parameter tersebut memberikan informasi yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan satu indikator secara terpisah dalam mengevaluasi respons latihan dan kelelahan atlet (Perrey & Ferrari, 2018; Paulauskas et al., 2022; Yogev, 2023).

Meskipun berbagai penelitian telah membahas hubungan antara oksigenasi otot, kapasitas aerobik, dan performa olahraga, sebagian besar masih mengevaluasi masing-masing parameter secara terpisah. Penelitian yang mengintegrasikan SmO_2 , VO_2max , dan indikator performa anaerobik untuk memberikan gambaran holistik mengenai status fisiologis atlet, khususnya pada cabang olahraga bulu tangkis,

masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengintegrasikan ketiga parameter tersebut untuk mengidentifikasi karakteristik kelelahan perifer berdasarkan respons performa dan oksigenasi otot secara *real-time* serta menjelaskan status fisiologis atlet secara lebih menyeluruh (Perrey & Ferrari, 2018; Rusdiana et al., 2023).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan desain penelitian korelasional kuantitatif untuk menyelidiki hubungan antara saturasi oksigen otot (SmO_2), *Fatigue Index*, dan Kapasitas Aerobik (VO_{2max}) pada atlet bulu tangkis. Pendekatan pemantauan fisiologis waktu nyata diterapkan menggunakan teknologi *Near-Infrared Spectroscopy* (NIRS) yang dapat dikenakan untuk menilai oksigenasi otot lokal selama latihan. Desain ini dipilih karena metode kuantitatif memungkinkan pengukuran objektif variabel fisiologis dan memfasilitasi pemeriksaan hubungan antar indikator kinerja melalui analisis statistik (Creswell & Creswell dalam Fiantika, 2022). Lebih lanjut, pemantauan berbasis NIRS telah diakui sebagai metode yang valid dan sensitif untuk mengevaluasi dinamika oksigen otot lokal dan kelelahan akibat latihan dalam pengaturan olahraga (Perrey & Ferrari, 2018).

Penelitian ini dilakukan di PB Mutiara Cardinal Badminton Club, Bandung, Jawa Barat, Indonesia. Populasi sasaran terdiri dari atlet bulu tangkis aktif yang terdaftar di klub tersebut. Peserta dipilih menggunakan pengambilan sampel bertujuan berdasarkan kriteria inklusi spesifik, termasuk: (1) aktif berpartisipasi dalam program pelatihan bulu tangkis reguler, (2) memiliki pengalaman pelatihan kompetitif minimal satu tahun, (3) bebas dari cedera muskuloskeletal selama periode pengumpulan data, dan (4) memberikan persetujuan berdasarkan informasi untuk berpartisipasi dalam penelitian. Sebanyak 10 atlet bulu tangkis berpartisipasi dalam penelitian ini; ukuran sampel ini konsisten dengan penelitian fisiologi bulu tangkis sebelumnya yang melibatkan atlet terlatih (Green et al., 2023), dan dianggap memadai karena peserta mewakili populasi atlet yang homogen dengan latar belakang pelatihan dan pengalaman kompetitif yang serupa.

Tiga variabel diteliti dalam studi ini. Variabel independen adalah rasio SmO_2 yang diperoleh dari pemantauan saturasi oksigen otot secara kontinu menggunakan MOXY Monitor. Variabel mediasi adalah Indeks Kelelahan yang diperoleh dari Tes Lari Anaerobik Cepat (RAST). Variabel dependen adalah pengambilan oksigen maksimal (VO_{2max}), yang diperkirakan melalui Tes Lari Bolak-balik Multistage 20 meter (Tes Beep). Variabel-variabel ini dipilih karena masing-masing mewakili oksigenasi otot lokal, kelelahan anaerobik, dan kebugaran aerobik, yang merupakan penentu penting kinerja bulu tangkis. Saturasi oksigen otot diukur menggunakan MOXY Monitor, perangkat NIRS portabel yang dapat dikenakan dan mampu memantau oksigenasi otot lokal secara kontinu selama latihan. Sensor dipasang pada otot *vastus lateralis* dominan sesuai dengan rekomendasi pabrikan. Studi sebelumnya telah menunjukkan validitas dan reliabilitas yang dapat diterima dari MOXY Monitor untuk mengukur saturasi oksigen otot pada populasi atlet (Feldmann et al., 2019; Mcmanus et al., 2018).

Performa anaerobik dinilai menggunakan *Running Anaerobic Sprint Test* (RAST), yang terdiri dari enam sprint maksimal 35 meter yang dipisahkan oleh periode pemulihan pasif 10 detik. Waktu sprint dicatat dan selanjutnya digunakan untuk menghitung daya puncak, daya rata-rata, dan indeks kelelahan. RAST telah dilaporkan sebagai ukuran berbasis lapangan yang valid untuk daya anaerobik dan

karakteristik kelelahan dalam olahraga intermiten (Zagatto et al., 2009). Kapasitas aerobik dievaluasi menggunakan 20-meter *Multistage Shuttle Run Test (Beep Test)*. Peserta melakukan lari bolak-balik berulang kali dengan kecepatan yang meningkat secara bertahap hingga kelelahan sukarela. Tingkat akhir yang dicapai dikonversi menjadi nilai VO_2max yang diperkirakan dan dinyatakan dalam $\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. *Beep Test* banyak digunakan sebagai penilaian praktis di lapangan untuk kebugaran aerobik pada atlet (Green et al., 2023; Tomkinson et al., 2019).

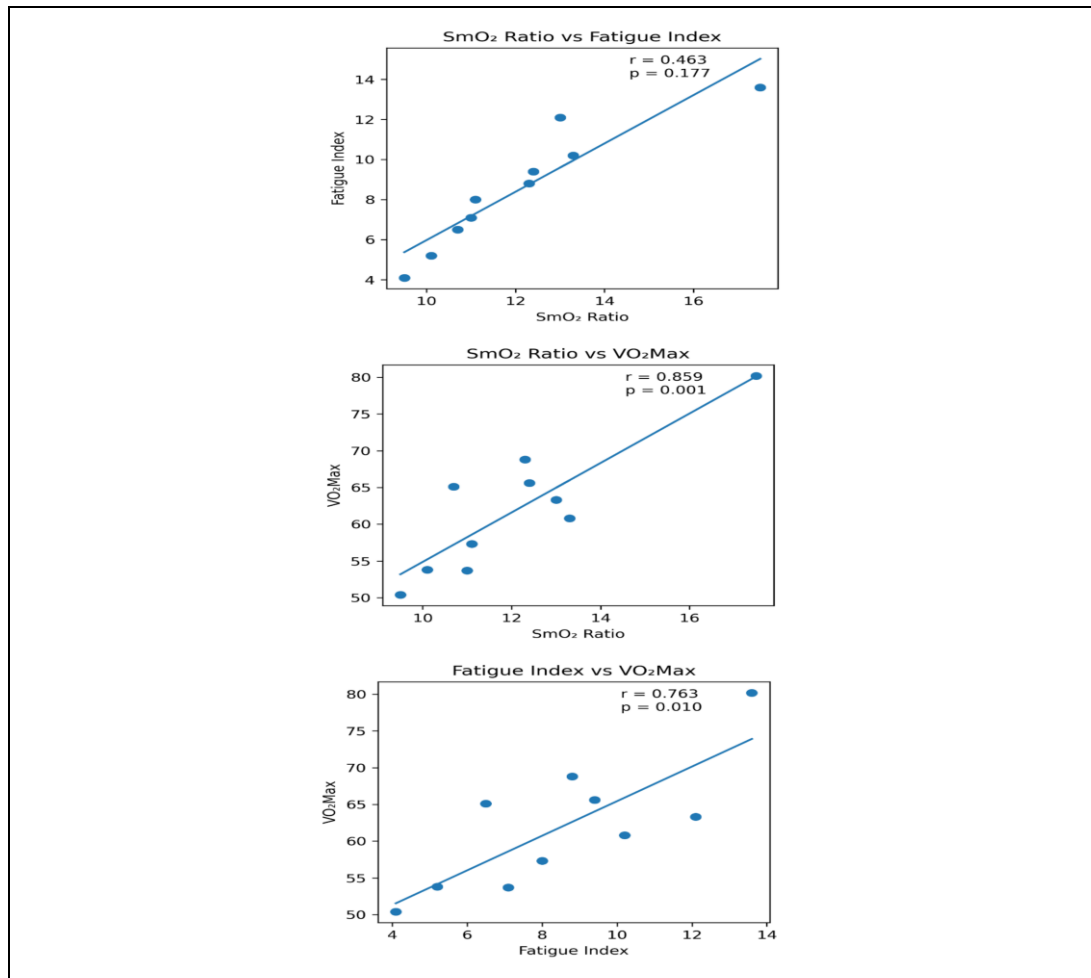
HASIL PENELITIAN

Peserta terdiri dari 10 remaja, yang merupakan atlet bulu tangkis berusia 12 hingga 15 tahun (40% berusia 13 tahun, 30% berusia 15 tahun, 20% berusia 14 tahun, dan 10% berusia 12 tahun). Mayoritas peserta (50%) memiliki pengalaman pelatihan selama tujuh tahun, 30% memiliki pengalaman 5–6 tahun, sedangkan 20% memiliki pengalaman 3–4 tahun. Sedangkan untuk gaya bermain, setengah dari peserta (50%) adalah pemain tunggal, sedangkan setengah lainnya (50%) bermain ganda. Statistik deskriptif variabel penelitian disajikan pada Tabel 1 berikut. Rata-rata Rasio SmO_2 adalah $12,08 \pm 2,27$, sedangkan rata-rata Indeks Kelelahan adalah $8,36 \pm 3,13$. Nilai VO_2max rata-rata para atlet adalah $61,90 \pm 8,79 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Statistik deskriptif variabel penelitian dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Variabel Penelitian (n=10)

Variable	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
SmO_2 Ratio (X1)	9,49	17,51	12,08	2,27
Fatigue Index (X2)	4,07	13,60	8,36	3,13
VO_2Max (Y)	50,40	80,20	61,90	8,79

Analisis korelasi Pearson dilakukan untuk memeriksa hubungan antara Rasio SmO_2 , Indeks Kelelahan, dan VO_2max . Hasilnya disajikan pada Gambar 1 berikut. Analisis tersebut mengungkapkan korelasi positif antara Rasio SmO_2 dan Indeks Kelelahan ($r = 0,463$); namun, hubungan tersebut tidak signifikan secara statistik ($p = 0,177$). Sebaliknya, korelasi positif yang signifikan diamati antara Rasio SmO_2 dan VO_2max ($r = 0,859$, $p = 0,001$), menunjukkan bahwa atlet dengan nilai Rasio SmO_2 yang lebih tinggi cenderung menunjukkan kapasitas aerobik yang lebih tinggi. Lebih lanjut, Indeks Kelelahan berkorelasi signifikan dengan VO_2max ($r = 0,763$, $p = 0,010$), menunjukkan bahwa variasi Indeks Kelelahan berhubungan dengan perbedaan kinerja aerobik di antara atlet. Secara keseluruhan, korelasi terkuat ditemukan antara Rasio SmO_2 dan VO_2max , sedangkan hubungan antara Rasio SmO_2 dan Indeks Kelelahan tidak mencapai signifikansi statistik. Temuan ini menunjukkan bahwa baik Rasio SmO_2 maupun Indeks Kelelahan berhubungan dengan VO_2max , dengan Rasio SmO_2 menunjukkan hubungan terkuat dengan kapasitas aerobik. Hasil korelasi Pearson antar variabel penelitian dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



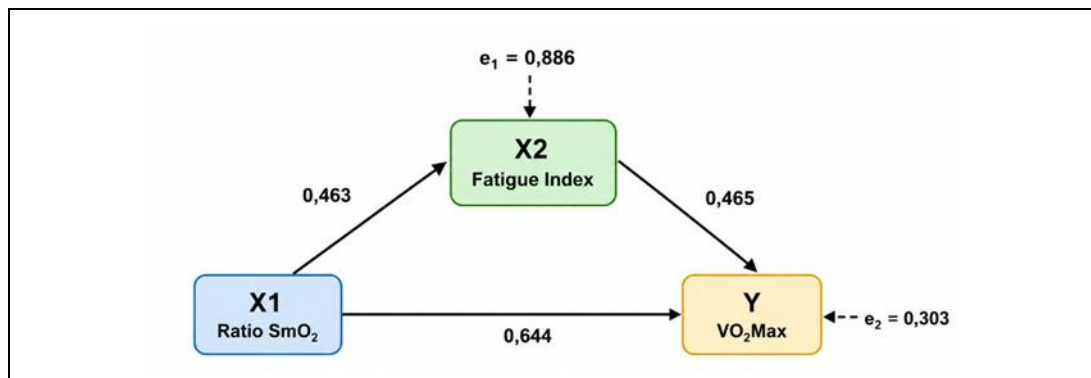
Gambar 1. Hasil Korelasi Pearson Antar Variabel Penelitian

Analisis regresi linier sederhana dilakukan untuk memeriksa efek individual dari Rasio SmO₂ dan Indeks Kelelahan pada VO₂Max, serta efek Rasio SmO₂ pada Indeks Kelelahan. Analisis regresi Rasio SmO₂ pada Indeks Kelelahan menghasilkan $R^2 = 0,215$, $F = 2,187$, dan $p = 0,177$, yang menunjukkan bahwa Rasio SmO₂ menjelaskan 21,5% varians pada Indeks Kelelahan. Namun, model regresi tersebut tidak signifikan secara statistik, menunjukkan bahwa Rasio SmO₂ bukanlah prediktor yang signifikan untuk Indeks Kelelahan. Sebaliknya, analisis regresi Rasio SmO₂ pada VO₂Max menghasilkan $R^2 = 0,738$, $F = 22,527$, dan $p = 0,001$, yang menunjukkan bahwa Rasio SmO₂ menjelaskan 73,8% varians pada VO₂Max. Model regresi tersebut signifikan secara statistik, menunjukkan bahwa nilai Rasio SmO₂ yang lebih tinggi berhubungan dengan kapasitas aerobik yang lebih tinggi.

Koefisien regresi menunjukkan bahwa setiap peningkatan satu unit pada Rasio SmO₂ dikaitkan dengan peningkatan 3,327 unit pada VO₂Max. Analisis regresi linier berganda dilakukan untuk menentukan kontribusi gabungan Rasio SmO₂ dan Indeks Kelelahan terhadap VO₂Max. Analisis tersebut menghasilkan model regresi yang signifikan dengan $R^2 = 0,908$, R^2 yang disesuaikan = 0,881, $F = 34,375$, dan $p < 0,001$. Temuan ini menunjukkan bahwa Rasio SmO₂ dan Indeks Kelelahan secara bersama-sama menjelaskan 90,8% varians pada VO₂Max. Persamaan regresi yang dihasilkan adalah:

$$VO_2\text{Max} = 20,872 + 2,493(\text{SmO}_2 \text{ Ratio}) + 1,305(\text{Fatigue Index})$$

Kedua variabel prediktor tersebut memberikan kontribusi signifikan terhadap model, dengan Rasio SmO₂ ($\beta = 0,644$, $p = 0,002$) menunjukkan kontribusi yang lebih kuat daripada Indeks Kelelahan ($\beta = 0,465$, $p = 0,009$). Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi saturasi oksigen otot dan respons fisiologis terkait kelelahan memberikan prediksi yang kuat terhadap kapasitas aerobik pada atlet bulu tangkis. Hasil analisis jalur antar variabel penelitian disajikan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Analisis Jalur

Analisis jalur pada Gambar 2 mengungkapkan bahwa Rasio SmO₂ memberikan pengaruh positif langsung pada VO₂Max dengan koefisien standar sebesar 0,644. Selain itu, Rasio SmO₂ menunjukkan pengaruh langsung pada Indeks Kelelahan ($\beta = 0,463$), sedangkan Indeks Kelelahan memiliki pengaruh positif langsung pada VO₂Max ($\beta = 0,465$). Pengaruh tidak langsung Rasio SmO₂ pada VO₂Max melalui Indeks Kelelahan adalah 0,215, menunjukkan bahwa sebagian pengaruh saturasi oksigen otot pada kapasitas aerobik dimediasi oleh respons fisiologis terkait kelelahan. Namun, pengaruh tidak langsung jauh lebih kecil daripada pengaruh langsung. Pengaruh total Rasio SmO₂ pada VO₂Max adalah 0,859, menunjukkan hubungan keseluruhan yang sangat kuat. Temuan ini menunjukkan bahwa pengaruh Rasio SmO₂ pada kapasitas aerobik terutama terjadi melalui jalur langsung, sedangkan Indeks Kelelahan memberikan pengaruh mediasi yang lebih kecil. Oleh karena itu, pemanfaatan oksigen otot tampaknya merupakan faktor fisiologis dominan yang terkait dengan VO₂Max pada atlet bulu tangkis.

PEMBAHASAN

Studi ini mengungkapkan hubungan positif antara Rasio SmO₂ dan Indeks Kelelahan; namun, hubungan tersebut tidak signifikan secara statistik ($\beta = 0,463$, $p = 0,177$). Temuan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan oksigen otot saja mungkin tidak cukup menjelaskan variasi respons kelelahan di antara atlet bulu tangkis. Kelelahan adalah fenomena multifaktorial yang dipengaruhi oleh beberapa mekanisme fisiologis, termasuk resintesis fosfokreatin, akumulasi metabolit, aktivasi neuromuskular, dan kontribusi energi anaerobik. Oleh karena itu, perubahan saturasi oksigen otot mungkin tidak selalu disertai dengan perubahan proporsional dalam kinerja kelelahan.

Temuan ini konsisten dengan tinjauan sistematis yang dilakukan oleh Perrey et al., (2024), yang menyimpulkan bahwa saturasi oksigen otot yang diperoleh melalui NIRS memberikan informasi berharga mengenai pemanfaatan oksigen

lokal dan stres metabolik, tetapi harus diinterpretasikan bersama dengan penanda fisiologis tambahan ketika menilai kelelahan. Demikian pula, A. Vasquez-bonilla et al., (2024) melaporkan bahwa variabel yang berasal dari SmO_2 berguna untuk memantau beban latihan dan intensitas olahraga; namun, respons kelelahan dipengaruhi oleh berbagai sistem fisiologis di luar ekstraksi oksigen saja. Oleh karena itu, hubungan yang tidak signifikan yang diamati dalam penelitian ini menunjukkan bahwa kelelahan pada atlet bulu tangkis tidak dapat dijelaskan secara eksklusif oleh karakteristik oksigenasi otot lokal.

Tidak adanya hubungan yang signifikan antara Rasio SmO_2 dan Indeks Kelelahan mungkin mencerminkan sifat multifaktorial dari kelelahan. Meskipun saturasi oksigen otot memberikan informasi mengenai ekstraksi oksigen lokal, perkembangan kelelahan juga dipengaruhi oleh fungsi neuromuskular, akumulasi metabolit, pola perekrutan otot, dan kinetika pemulihan. Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa respons reoksigenasi dan deoksigenasi berbeda secara substansial di antara kelompok otot dan kondisi latihan, menunjukkan bahwa kelelahan tidak dapat sepenuhnya dijelaskan oleh satu parameter oksigenasi tunggal (Perrey et al., 2024). Tuesta et al., (2022) lebih lanjut mencatat bahwa respons oksigenasi otot yang diperoleh dari NIRS harus diinterpretasikan bersama dengan indikator fisiologis lainnya karena kinerja latihan dan kelelahan dipengaruhi oleh berbagai adaptasi metabolik dan neuromuskular.

Temuan utama adalah bahwa Rasio SmO_2 muncul sebagai prediktor fisiologis terkuat dari VO_{2Max} di antara atlet bulu tangkis. Analisis regresi menunjukkan bahwa Rasio SmO_2 menjelaskan 73,8% varians dalam VO_{2Max} ($R^2 = 0,738$, $p = 0,001$), menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara efisiensi pemanfaatan oksigen otot dan kapasitas aerobik. Temuan ini mendukung hipotesis alternatif dan menunjukkan bahwa atlet dengan kemampuan ekstraksi oksigen otot yang lebih unggul cenderung memiliki tingkat kebugaran aerobik yang lebih tinggi.

Dari perspektif fisiologis, kapasitas aerobik ditentukan tidak hanya oleh kemampuan sistem kardiovaskular untuk mengantarkan oksigen, tetapi juga oleh kemampuan otot rangka aktif untuk mengekstrak dan menggunakan oksigen untuk metabolisme oksidatif. Atlet dengan kepadatan mitokondria, jaringan kapiler, dan aktivitas enzim oksidatif yang lebih tinggi umumnya menunjukkan pemanfaatan oksigen yang lebih efisien selama berolahraga. Akibatnya, Rasio SmO_2 dapat berfungsi sebagai indikator tidak langsung dari kapasitas oksidatif otot dan kinerja aerobik.

Temuan saat ini sangat konsisten dengan penelitian yang dilakukan oleh Negara et al., (2024), yang melaporkan adanya hubungan signifikan antara saturasi oksigen otot dan VO_{2Max} pada atlet bulu tangkis universitas. Temuan mereka menunjukkan bahwa atlet dengan kebugaran aerobik yang lebih tinggi menunjukkan pola pemanfaatan oksigen otot yang lebih efisien selama latihan. Temuan saat ini bahwa Rasio SmO_2 merupakan prediktor kuat kebugaran aerobik didukung oleh bukti terbaru yang menunjukkan hubungan erat antara dinamika oksigenasi otot dan performa aerobik. Venckunas et al., (2024) melaporkan bahwa spektroskopi inframerah dekat (NIRS) memberikan penilaian yang dapat direproduksi terhadap kapasitas aerobik otot dan metabolisme oksidatif, menyoroti pentingnya pemanfaatan oksigen lokal sebagai indikator adaptasi fisiologis terhadap latihan. Lebih lanjut, McCully et al., (2024) menunjukkan bahwa respons saturasi oksigen otot yang diukur selama latihan mencerminkan metabolisme

oksidatif dan ekstraksi oksigen otot, yang keduanya merupakan penentu penting dari performa daya tahan. Secara kolektif, temuan-temuan ini memperkuat hasil penelitian saat ini, menunjukkan bahwa Rasio SmO_2 merupakan penanda fisiologis yang bermakna untuk kebugaran aerobik dan dapat berfungsi sebagai alat praktis untuk memantau adaptasi pelatihan pada atlet bulu tangkis.

Pengaruh Indeks Kelelahan terhadap VO_2Max menunjukkan pengaruh positif yang signifikan dari Indeks Kelelahan terhadap VO_2Max ($\beta = 0,465$, $p = 0,009$). Temuan ini menunjukkan bahwa kapasitas aerobik memberikan kontribusi substansial terhadap pemeliharaan performa selama upaya intensitas tinggi yang berulang. Atlet dengan kebugaran aerobik yang lebih baik umumnya menunjukkan pemulihan yang lebih cepat antar upaya, efisiensi pengiriman oksigen yang lebih besar, dan resintesis fosfokreatin yang lebih baik, sehingga mengurangi penurunan performa selama latihan berulang.

Studi ini menunjukkan hubungan positif yang signifikan antara Indeks Kelelahan dan VO_2Max ($r = 0,763$, $p = 0,010$), yang mengindikasikan bahwa atlet dengan kapasitas aerobik yang lebih baik cenderung mempertahankan performa secara lebih efektif selama upaya intensitas tinggi yang berulang. Temuan ini konsisten dengan Nemoto et al., (2024), yang melaporkan bahwa kapasitas penyerapan oksigen dan dinamika oksigenasi otot rangka sangat terkait dengan daya tahan otot dan toleransi latihan. Demikian pula, ditemukan bahwa peningkatan VO_2Max setelah latihan interval sprint disertai dengan peningkatan output daya dan performa latihan berulang, yang menyoroti pentingnya adaptasi aerobik dalam mempertahankan aktivitas intensitas tinggi. Hasil saat ini juga selaras dengan temuan dari Ulupinar et al., (2024), yang menunjukkan bahwa performa sprint berulang dipengaruhi oleh interaksi antara jalur energi aerobik dan anaerobik, menekankan peran metabolisme aerobik dalam mengurangi penurunan performa selama latihan intermiten. Oleh karena itu, hubungan signifikan yang diamati antara Indeks Kelelahan dan VO_2Max dalam penelitian ini mendukung gagasan bahwa kebugaran aerobik yang unggul berkontribusi pada peningkatan ketahanan terhadap kelelahan dan kinerja upaya berulang pada atlet bulu tangkis. Hubungan signifikan antara Indeks Kelelahan dan VO_2Max dapat dijelaskan oleh peran penting metabolisme aerobik dalam pemulihan antara upaya intensitas tinggi yang berulang. Atlet dengan kebugaran aerobik yang unggul umumnya menunjukkan pemulihan fosfokreatin yang lebih cepat, ketersediaan oksigen yang lebih besar, dan pemulihan metabolisme yang lebih baik, memungkinkan mereka untuk mempertahankan kinerja selama latihan berulang (Hov et al., 2022). Bukti terbaru juga menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas aerobik sangat terkait dengan peningkatan toleransi latihan dan keberlanjutan kinerja selama latihan interval intensitas tinggi (Yogev et al., 2024).

Studi metodologis terbaru semakin menekankan bahwa oksigenasi otot yang diperoleh dari NIRS mencerminkan kapasitas oksidatif otot rangka dan fungsi mitokondria, yang keduanya merupakan penentu mendasar dari kinerja aerobik. Atlet dengan kapasitas oksidatif yang lebih besar umumnya menunjukkan ekstraksi dan pemanfaatan oksigen yang lebih efisien selama latihan, sehingga menghasilkan tingkat kebugaran aerobik yang lebih unggul. Oleh karena itu, variabel yang diperoleh dari SmO_2 dapat memberikan representasi langsung dari adaptasi otot lokal yang terkait dengan perkembangan VO_2Max (Rasica et al., 2024).

SIMPULAN

Studi ini meneliti hubungan antara Rasio SmO_2 , Indeks Kelelahan, dan VO_2Max pada atlet bulu tangkis menggunakan pemantauan oksigenasi otot secara *real-time*. Temuan menunjukkan bahwa Rasio SmO_2 merupakan prediktor terkuat kapasitas aerobik, menunjukkan efek positif yang signifikan pada VO_2Max . Hasil ini menunjukkan bahwa atlet dengan pemanfaatan oksigen otot yang lebih efisien cenderung menunjukkan kebugaran aerobik yang lebih unggul. Sebaliknya, hubungan antara Rasio SmO_2 dan Indeks Kelelahan bersifat positif tetapi tidak signifikan secara statistik, menunjukkan bahwa respons kelelahan dipengaruhi oleh berbagai faktor fisiologis di luar oksigenasi otot lokal saja.

Selanjutnya, Indeks Kelelahan menunjukkan efek positif yang signifikan pada VO_2Max , yang mengindikasikan bahwa kapasitas aerobik berkontribusi pada kemampuan atlet untuk mempertahankan performa selama upaya intensitas tinggi yang berulang. Analisis jalur menunjukkan bahwa efek langsung Rasio SmO_2 pada VO_2Max lebih besar daripada efek tidak langsungnya melalui Indeks Kelelahan, yang menegaskan bahwa pemanfaatan oksigen otot memainkan peran utama dalam menentukan performa aerobik. Secara kolektif, Rasio SmO_2 dan Indeks Kelelahan menjelaskan sebagian besar varians pada VO_2Max , menyoroti pentingnya mengintegrasikan oksigenasi otot dan indikator terkait kelelahan dalam pemantauan atlet. Oleh karena itu, pemantauan SmO_2 secara *real-time* menggunakan teknologi MOXY dapat berfungsi sebagai alat praktis dan berbasis bukti untuk mengevaluasi status fisiologis, mengoptimalkan program pelatihan, dan mendukung pengembangan performa pada atlet bulu tangkis.

DAFTAR PUSTAKA

- Feldmann, A., Erlacher, D., Schmitz, R., & Erlacher, D. (2019). Muscle oxygen saturation on a 0% to 100% scale: Reliability and validity of the Moxy Monitor. *Journal of Biomedical Optics*, 24(11), 1–11. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.24.11.115001>
- Fiantika, F. R., Wasil, M., Jumiyati, S., Honesti, L., Wahyuni, S., Mouw, E., Jonata, Mashudi, I., Hasanah, N., Maharani, A., Ambarwati, K., Noflidaputri, R., Nuryami, & Waris, L. (2022). *Metodologi penelitian kualitatif*. Global Eksekutif Teknologi.
- Flatt, A. A., Globensky, L., Bass, E., Sapp, B. L., & Riemann, B. L. (2019). Heart rate variability, neuromuscular and perceptual recovery following resistance training. *Sports*, 7(10), 225. <https://doi.org/10.3390/sports7100225>
- Girard, O., & Millet, G. P. (2009). Neuromuscular fatigue in racquet sports. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 20(1), 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2008.10.008>
- Green, R., West, A. T., & Willems, M. E. T. (2023). Notational analysis and physiological and metabolic responses of male junior badminton match play. *Sports*, 11(2), 35. <https://doi.org/10.3390/sports11020035>
- Hov, H., Wang, E., Lim, Y. R., Trane, G., Hemmingsen, M., Hoff, J., & Helgerud, J. (2022). Aerobic high-intensity intervals are superior to improve $\dot{\text{V}}\text{O}_2\text{max}$ compared with sprint intervals in well-trained men. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 33(2), 146–159. <https://doi.org/10.1111/sms.14251>

- McCully, K. K., Stoddard, S. N., Reynolds, M. A., & Ryan, T. E. (2024). Skeletal muscle oxidative metabolism during exercise measured with near infrared spectroscopy. *NDT*, 2(4), 417–429. <https://doi.org/10.3390/ndt2040025>
- Mcmanus, C. J., Collison, J., & Cooper, C. E. (2018). Performance comparison of the MOXY and PortaMon near-infrared spectroscopy muscle oximeters at rest and during exercise. *Journal of Biomedical Optics*, 23(1), 1–11. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.23.1.015007>
- Negara, J. D. K. (2023). Cycling athlete performance: Analysis of muscle oxygen saturation through Moxy measurement. *Jurnal Pendidikan Jasmani dan Olahraga*, 8(1), 9–15. <https://doi.org/10.17509/jpjo.v8i1.56177>
- Negara, J. D. K., Nuryadi, N., Firmansyah, H., Gumilar, A., Hambali, B., Purnomo, E., Festiawan, R., & Ockta, Y. (2024). The effect of VO2max on muscle oxygen saturation (SMO2) in university badminton athletes. *Retos*, 61, 1184–1190. <https://doi.org/10.47197/retos.v61.108861>
- Nemoto, S., Nakabo, T., Tashiro, N., Kishino, A., Yoshikawa, A., Nakamura, D., & Geshi, E. (2024). Relationship among muscle strength, muscle endurance, and skeletal muscle oxygenation dynamics during ramp incremental cycle exercise. *Scientific Reports*, 14, 11676. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61529-x>
- Paulauskas, R., Nekriošius, R., Dadelienė, R., Sousa, A., & Figueira, B. (2022). Muscle oxygenation measured with near-infrared spectroscopy following different intermittent training protocols in a world-class kayaker—A case study. *Sensors*, 22(21), 8238. <https://doi.org/10.3390/s22218238>
- Perrey, S., & Ferrari, M. (2018). Muscle oximetry in sports science: A systematic review. *Sports Medicine*, 48(3), 597–616. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0820-1>
- Perrey, S., Quaresima, V., & Ferrari, M. (2024). Muscle oximetry in sports science: An updated systematic review. *Sports Medicine*, 54(4), 975–996. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01987-x>
- Phomsoupha, M. (2020). Physiological, neuromuscular and perceived exertion responses in badminton games. *International Journal of Racket Sports Science*, 1(1), 16–25. <https://doi.org/10.30827/digibug.57323>
- Phomsoupha, M., & Laffaye, G. (2015). The science of badminton: Game characteristics, anthropometry, physiology, visual fitness and biomechanics. *Sports Medicine*, 45(4), 473–495. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0287-2>
- Rasica, L., Calaine, E., Raffaele, I., Danilo, M., & Juan, I. (2024). Methodological considerations on near-infrared spectroscopy derived muscle oxidative capacity. *European Journal of Applied Physiology*, 124(7), 2069–2079. <https://doi.org/10.1007/s00421-024-05421-6>
- Rusdiana, A., Komaini, A., & Nugraha, S. (2023). Impact of cardiovascular fatigue on kinematic changes in badminton overhead jump smash: A descriptive analysis. *Journal of Physical Education and Sport*, 23(10), 2786–2793. <https://doi.org/10.7752/jpes.2023.10318>
- Saw, A. E., Main, L. C., & Gastin, P. B. (2016). Monitoring the athlete training response: Subjective self-reported measures trump commonly used objective measures: A systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, 50(5), 281–291. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-094758>

- Tai, C. C., Chen, Y. L., Kalfirt, L., Masodsai, K., Su, C. T., & Yang, A. L. (2022). Differences between elite male and female badminton athletes regarding heart rate variability, arterial stiffness, and aerobic capacity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ijerph19063206>
- Tomkinson, G. R., Lang, J. J., Blanchard, J., Léger, L. A., & Tremblay, M. S. (2019). The 20-m shuttle run: Assessment and interpretation of data in relation to youth aerobic fitness and health. *Pediatric Exercise Science*, 31(2), 152–163. <https://doi.org/10.1123/pes.2018-0179>
- Tuesta, M., Yáñez-Sepúlveda, R., Verdugo-Marchese, H., Mateluna, C., & Alvear-Ordenes, I. (2022). Near-infrared spectroscopy used to assess physiological muscle adaptations in exercise clinical trials: A systematic review. *Biology*, 11(7), 1073. <https://doi.org/10.3390/biology11071073>
- Ulupınar, S., Özbay, S., Gençoğlu, C., Ouergui, I., Öget, F., Kışalı, N. F., Kıyıcı, F., Yılmaz, H. H., & Ardigo, L. P. (2024). Evaluating bioenergetic pathway contributions from single to multiple sprints. *Scientific Reports*, 14(1), 27295. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78916-z>
- Vasquez-Bonilla, A. A., Yáñez-Sepúlveda, R., Tuesta, M., Martin, E. B.-S., Monsalves-Álvarez, M., Olivares-Arancibia, J., Duclos-Bastías, D., Recabarren-Dueñas, C., & Alacid, F. (2024). Acute fatigue impairs heart rate variability and resting muscle oxygen consumption kinetics. *Applied Sciences*, 14(20), 9166. <https://doi.org/10.3390/app14209166>
- Vasquez-Bonilla, A., Yáñez-Sepúlveda, R., Gómez-Carmona, C. D., Olcina, G., Olivares-Arancibia, J., & Rojas-Valverde, D. (2024). Calculating load and intensity using muscle oxygen saturation data. *Sports*, 12(4), 113. <https://doi.org/10.3390/sports12040113>
- Venckunas, T., Satas, A., Brazaitis, M., Eimantas, N., Sipaviciene, S., & Kamandulis, S. (2024). Near-infrared spectroscopy provides a reproducible estimate of muscle aerobic capacity, but not whole-body aerobic power. *Sensors*, 24(7), 2277. <https://doi.org/10.3390/s24072277>
- Yogev, A. (2023). *Measuring muscle oxygenation in endurance sports with wearable NIRS: From validation to application* [Doctoral dissertation, University of British Columbia]. UBC Open Collections.
- Yogev, A., Arnold, J. I., Nelson, H., Rosenblat, M. A., Clarke, D. C., Guenette, J. A., Sporer, B. C., & Koehle, M. S. (2024). The effects of endurance training on muscle oxygen desaturation during incremental exercise tests: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Sports and Active Living*, 6, 1406987. <https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1406987>
- Zagatto, A. M., Beck, W. R., & Gobatto, C. A. (2009). Validity of the running anaerobic sprint test for assessing anaerobic power and predicting short-distance performances. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(6), 1820–1827. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181b3df32>