

PROFIL SISTEM ENERGI BERBASIS SATURASI OKSIGEN OTOT (SmO₂) ATLET BULUTANGKIS MENGGUNAKAN MOXY MONITOR UNTUK PENGKONDISIAN FISIK

Irman Felisiana Miftahul Khoir¹, Jajat Darajat Kusumah Negara², Agus Gumilar³

Universitas Pendidikan Indonesia^{1,2,3}
irmanfelisiana04@upi.edu¹

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis profil saturasi oksigen otot (SmO₂) atlet bulutangkis menggunakan Moxy Monitor, mengkaji hubungannya dengan sistem energi aerobik dan anaerobik, serta mengevaluasi potensinya sebagai dasar penyusunan program pengkondisian fisik. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode korelasional pada 10 atlet bulutangkis PB Mutiara Cardinal Bandung yang terpilih menggunakan teknik *purposive sampling*. Data dikumpulkan melalui pengukuran SmO₂ menggunakan Moxy Monitor selama uji fisik serta pengukuran kondisi fisik berdasarkan parameter biomotor. Analisis data dilakukan dengan menggunakan statistik deskriptif, uji normalitas Shapiro-Wilk, korelasi Pearson, regresi linier sederhana, regresi linier berganda, dan analisis jalur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Rasio SmO₂ memiliki hubungan yang signifikan dengan kemampuan aerobik ($r=0,766$; $p=0,010$) dan kondisi fisik atlet ($r=0,727$; $p=0,017$), namun tidak memiliki hubungan yang signifikan dengan kemampuan anaerobik ($r=0,361$; $p=0,305$). Kemampuan aerobik memiliki hubungan yang sangat kuat dengan kondisi fisik ($r=0,966$; $p=0,000$), sedangkan kemampuan anaerobik juga menunjukkan hubungan yang signifikan ($r=0,810$; $p=0,004$). Temuan ini menunjukkan bahwa profil sistem energi berbasis SmO₂ dapat digunakan sebagai indikator fisiologis dalam penyusunan program pengkondisian fisik yang lebih tepat berdasarkan kebutuhan individu atlet bulutangkis.

Kata Kunci: Bulu Tangkis, Monitor Moxy, Pengkondisian Fisik, Sistem Energi, SmO₂

ABSTRACT

This study aims to analyze the muscle oxygen saturation (SmO₂) profile of badminton athletes using the Moxy Monitor, to examine its relationship with the aerobic and anaerobic energy systems, and to evaluate its potential as a basis for designing physical conditioning programs. This study used a quantitative approach with a correlational method involving 10 badminton athletes from PB Mutiara Cardinal Bandung, selected through purposive sampling. Data were collected through SmO₂ measurements using the Moxy Monitor during physical testing, along with physical condition measurements based on biomotor parameters. Data were analyzed using descriptive statistics, the Shapiro-Wilk normality test, Pearson correlation, simple linear regression, multiple linear regression, and path analysis. The results showed that the SmO₂ Ratio had a

significant relationship with aerobic capacity ($r = 0.766$; $p = 0.010$) and physical condition ($r = 0.727$; $p = 0.017$), but no significant relationship with anaerobic capacity ($r = 0.361$; $p = 0.305$). Aerobic capacity had a very strong relationship with physical condition ($r = 0.966$; $p = 0.000$), while anaerobic capacity also showed a significant relationship ($r = 0.810$; $p = 0.004$). These findings indicate that an SmO_2 -based energy system profile can be used as a physiological indicator for designing more precise physical conditioning programs based on the individual needs of badminton athletes.

Keywords: *Badminton, Moxy Monitor, Physical Conditioning, Energy System, SmO_2*

PENDAHULUAN

Kemampuan atlet dalam mengelola penggunaan energi sangat menentukan kualitas performa selama pertandingan (Cádiz Gallardo et al., 2023). Atlet yang memiliki kapasitas aerobik tinggi cenderung mampu mempertahankan intensitas permainan lebih lama karena memiliki kemampuan pemulihan yang lebih baik di antara reli dan di antara set pertandingan (Laffaye et al., 2015). Sebaliknya, kapasitas anaerobik yang baik diperlukan untuk menghasilkan daya ledak pada aktivitas berdurasi pendek dengan intensitas maksimum seperti *smash* dan perubahan arah yang cepat (Kuznetsov et al., 2025). Efisiensi kerja kedua sistem energi tersebut menjadi salah satu faktor yang membedakan performa atlet elit dan non-elit dalam bulu tangkis. Seiring berkembangnya ilmu fisiologi olahraga, pemantauan respons internal atlet telah menjadi bagian penting dari proses evaluasi kinerja dan pengambilan keputusan olahraga (Perrey et al., 2024).

Salah satu indikator fisiologis yang banyak digunakan untuk menggambarkan respons metabolisme otot adalah saturasi oksigen otot (SmO_2) (Pilotto et al., 2022). Parameter ini menjelaskan keseimbangan antara suplai oksigen ke jaringan otot dan konsumsi oksigen oleh otot selama aktivitas fisik (Itokazu et al., 2018). Oleh karena itu, SmO_2 dianggap dapat memberikan informasi yang lebih spesifik tentang keadaan metabolisme otot daripada indikator fisiologis konvensional seperti detak jantung (Born et al., 2016). Pengukuran SmO_2 umumnya dilakukan menggunakan teknologi *Near-Infrared Spectroscopy* (NIRS) yang memungkinkan pemantauan oksigenasi otot non-invasif dan real-time (Jeppesen et al., 2021).

Teknologi NIRS telah digunakan secara luas dalam penelitian olahraga untuk mengevaluasi keseimbangan antara pasokan dan permintaan oksigen dalam jaringan otot aktif selama berolahraga (Tuesta et al., 2022). Penggunaan NIRS juga memungkinkan identifikasi ambang metabolisme dan perubahan dominasi sistem energi yang terjadi selama aktivitas fisik bertingkat (Born et al., 2016). Kemampuan ini menjadikan NIRS sebagai salah satu teknologi potensial dalam mendukung pendekatan pembinaan berbasis bukti terhadap prestasi olahraga (Perrey, 2018).

Salah satu perangkat NIRS yang banyak digunakan dalam praktik olahraga adalah Moxy Monitor yang dirancang untuk terus mengukur saturasi oksigen otot selama aktivitas fisik (Feldmann et al., 2019). Validitas penggunaan Moxy Monitor dalam pengukuran SmO_2 telah dibuktikan melalui pengujian laboratorium menggunakan metode oklusi arteri yang menunjukkan tingkat keandalan dan reproduktibilitas yang baik (Crum et al., 2017). Selain itu, perangkat

ini memiliki keunggulan karena dapat digunakan langsung di lapangan tanpa mengganggu aktivitas atlet selama latihan atau pertandingan (Jones et al., 2014). Kemudahan penggunaan ini membuat Moxy Monitor semakin banyak digunakan dalam penelitian fisiologi olahraga terapan (McManus et al., 2018).

Dalam cabang olahraga bulu tangkis, penggunaan SmO_2 mulai mendapat perhatian karena mampu menggambarkan karakteristik penggunaan sistem energi secara lebih spesifik. Negara et al. (2024) menunjukkan bahwa kapasitas aerobik memiliki hubungan yang signifikan dengan dinamika saturasi oksigen otot pada atlet bulu tangkis. Atlet dengan kapasitas aerobik yang lebih tinggi cenderung memiliki kemampuan untuk menjaga oksigenasi otot dan pulih lebih cepat setelah aktivitas intensitas tinggi (Negara, 2023).

Kondisi ini menunjukkan bahwa informasi yang diperoleh dari pengukuran SmO_2 berpotensi digunakan untuk menggambarkan profil sistem energi atlet individu (Vasquez-Bonilla et al., 2025). Namun, penerapan data SmO_2 sebagai dasar penyusunan program pengkondisian fisik pada atlet bulutangkis masih tergolong terbatas (Alaba et al., 2023). Sebagian besar program latihan masih disusun berdasarkan indikator eksternal seperti volume latihan, intensitas latihan, dan persepsi kelelahan atlet (Perrey, 2022). Pendekatan ini belum dapat sepenuhnya menggambarkan kondisi metabolisme otot secara spesifik sehingga individualisasi olahraga seringkali tidak optimal (Baker et al., 2010). Akibatnya, pelatih mengalami kesulitan dalam menentukan intensitas latihan yang benar-benar sesuai dengan kebutuhan fisiologis masing-masing atlet (Hetlelid et al., 2015).

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjelaskan kemampuan untuk mengembalikan oksigenasi otot setelah aktivitas intensitas tinggi, yang merupakan indikator penting dalam menilai kapasitas pemulihan atlet. Tingkat pemulihan SmO_2 mencerminkan kemampuan sistem kardiorespirasi dan peredaran darah untuk memulihkan suplai oksigen ke jaringan otot serta mempercepat proses resintesis energi setelah aktivitas eksplosif (Arnold et al., 2024). Dalam bulu tangkis, keterampilan pemulihan yang baik merupakan komponen penting karena pertandingan berlangsung dalam pola kerja yang berulang, di mana atlet harus dapat kembali beraksi dengan cepat dan kuat dalam waktu singkat antara reli dan antar set (Phomsoupha & Laffaye, 2015). Penelitian-penelitian terdahulu mengenai SmO_2 pada atlet bulu tangkis umumnya baru mengaitkannya secara terpisah dengan kapasitas aerobik (Negara et al., 2024; Negara, 2023), sementara keterkaitannya dengan kapasitas anaerobik dan kondisi fisik atlet secara menyeluruh belum banyak diungkap. Kebaruan penelitian ini terletak pada upaya mengintegrasikan profil SmO_2 dengan kapasitas aerobik, kapasitas anaerobik, dan kondisi fisik atlet bulu tangkis sekaligus melalui analisis jalur, sehingga dapat menggambarkan pola hubungan langsung maupun tidak langsung yang selama ini belum banyak dikaji sebagai dasar penyusunan program pengkondisian fisik yang lebih individual.

KAJIAN TEORI

Secara konseptual, saturasi oksigen otot (SmO_2) merupakan parameter fisiologis yang menggambarkan proporsi oksigen yang terikat pada hemoglobin dan mioglobin di dalam jaringan otot pada suatu waktu tertentu. Nilai ini mencerminkan hasil interaksi dinamis antara laju pengiriman oksigen melalui

aliran darah dan laju konsumsi oksigen oleh mitokondria otot selama kontraksi (Pilotto et al., 2022). Ketika intensitas aktivitas fisik meningkat, kebutuhan oksigen pada otot yang aktif turut meningkat sehingga menyebabkan penurunan nilai SmO_2 apabila suplai oksigen tidak dapat mengimbangi laju konsumsinya. Karakteristik respons inilah yang menjadikan SmO_2 sebagai penanda tidak langsung dari kapasitas oksidatif otot serta efisiensi metabolisme aerobik seseorang (Itokazu et al., 2018).

Pengukuran SmO_2 secara non-invasif dimungkinkan melalui teknologi *Near-Infrared Spectroscopy* (NIRS), yang bekerja dengan memancarkan cahaya inframerah ke jaringan otot dan menganalisis pola serapannya oleh hemoglobin serta mioglobin. Salah satu instrumen berbasis NIRS yang telah diuji validitas dan reliabilitasnya melalui metode oklusi arteri adalah Moxy Monitor, yang terbukti mampu memberikan data SmO_2 yang konsisten pada kondisi istirahat maupun saat beraktivitas fisik (Crum et al., 2017). Keunggulan portabilitas dan kemudahan aplikasi lapangan menjadikan perangkat ini relevan digunakan untuk memantau respons metabolisme otot atlet secara langsung tanpa mengganggu proses latihan atau pertandingan (Feldmann et al., 2019).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain deskriptif korelasional. Desain ini dipilih untuk mengidentifikasi profil sistem energi atlet bulutangkis berdasarkan respons saturasi oksigen otot (SmO_2) dan menganalisis hubungannya dengan kemampuan aerobik, kemampuan anaerobik, dan kondisi fisik atlet. Pendekatan kuantitatif memungkinkan pengukuran variabel secara objektif melalui data numerik yang diperoleh dari instrumen fisiologis dan tes kondisi fisik standar.

Penelitian ini melibatkan 10 atlet bulutangkis aktif yang dipilih menggunakan teknik *purposive sampling*. Jumlah sampel mengacu pada penelitian (Green et al., 2023) yang menggunakan 10 atlet bulutangkis pria terlatih ($n = 10$) untuk menganalisis respons fisiologis dan metabolisme selama pertandingan bulu tangkis, sehingga angka tersebut dianggap mewakili penelitian fisiologis pada populasi atlet bulu tangkis. Kriteria inklusi termasuk atlet yang berpartisipasi aktif dalam program olahraga teratur, dalam keadaan sehat, dan tidak memiliki riwayat gangguan muskuloskeletal atau kardiovaskular yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran fisiologis.

Seluruh peserta telah mendapatkan penjelasan mengenai prosedur penelitian dan diberikan persetujuan untuk berpartisipasi dalam seluruh rangkaian pendataan. Pengukuran saturasi oksigen otot (SmO_2) dilakukan dengan menggunakan Moxy Monitor yang bekerja berdasarkan teknologi *Near-Infrared Spectroscopy* (NIRS). Teknologi ini memungkinkan pemantauan oksigenasi otot non-invasif dan real-time dengan mengukur keseimbangan antara pasokan dan konsumsi oksigen dalam jaringan otot aktif (Perrey et al., 2024). Validitas dan keandalan Moxy Monitor sebagai alat pengukur SmO_2 telah dilaporkan baik untuk aplikasi olahraga maupun pemantauan fisiologis selama aktivitas fisik (Feldmann et al., 2022).

Sensor Moxy Monitor ditempatkan pada otot *vastus lateral* ekstremitas yang dominan karena otot tersebut memiliki kontribusi besar terhadap aktivitas gerakan

dalam bulu tangkis. Pengukuran dilakukan selama Uji Bip untuk mendapatkan respons desaturasi oksigen otot dan saturasi selama peningkatan aktivitas fisik.

$$\text{Rasio } SmO_2 = \Delta Waktu / \Delta SmO_2$$

Di mana $\Delta SmO_2 = (\text{baseline } SmO_2 - \text{minimum } SmO_2)$ dan $\Delta Time = \text{waktu berlalu hingga minimum } SmO_2$

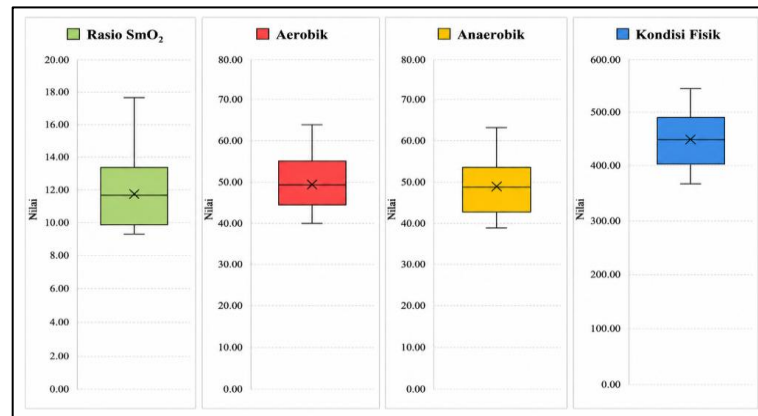
Variabel utama penelitian ini adalah Rasio SmO_2 , yang dihitung berdasarkan perubahan saturasi oksigen otot dari waktu ke waktu selama pengujian. Rasio diperoleh dari perbandingan antara besarnya penurunan saturasi oksigen otot (ΔSmO_2) dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik terendah saturasi oksigen selama aktivitas. Pendekatan ini digunakan untuk menggambarkan kemampuan otot untuk memanfaatkan oksigen selama latihan intensitas yang meningkat.

Kemampuan aerobik dan anaerobik atlet diperoleh melalui pengelompokan profil sistem energi berdasarkan hasil pengukuran fisiologis dan uji lapangan. Sementara itu, kondisi fisik atlet diukur menggunakan beberapa komponen biomotor yang mengacu pada parameter uji kondisi fisik prestasi olahraga sebagaimana tertuang dalam Peraturan Menteri Pemuda dan Olahraga Republik Indonesia Nomor 15 Tahun 2024. Komponen yang diukur meliputi kekuatan otot (tes push-up), fleksibilitas (uji duduk dan jangkauan dan uji fleksibilitas bahu), dan kekuatan otot lengan (tes lemparan di atas kepala).

Data dianalisis menggunakan IBM SPSS Statistics 26. Analisis deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik sampel dan distribusi data. Uji normalitas dilakukan dengan menggunakan tes Shapiro-Wilk. Hubungan antar variabel dianalisis menggunakan korelasi Pearson, sedangkan pengaruh antar variabel diuji menggunakan regresi linier sederhana, regresi linier berganda, dan analisis jalur. Semua tes statistik menggunakan tingkat signifikansi $p < 0,05$.

HASIL PENELITIAN

Para peserta terdiri dari 10 remaja, yang merupakan atlet bulutangkis pada rentang usia 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 tujuh tahun, 30% dari mereka memiliki 5-6 tahun, sedangkan 20% memiliki pengalaman 3-4 tahun. Sedangkan untuk gaya bermain, setengah dari peserta (50%) adalah pemain tunggal, sedangkan separuh lainnya (50%) bermain ganda. Distribusi variabel penelitian disajikan pada Gambar 1 berikut.

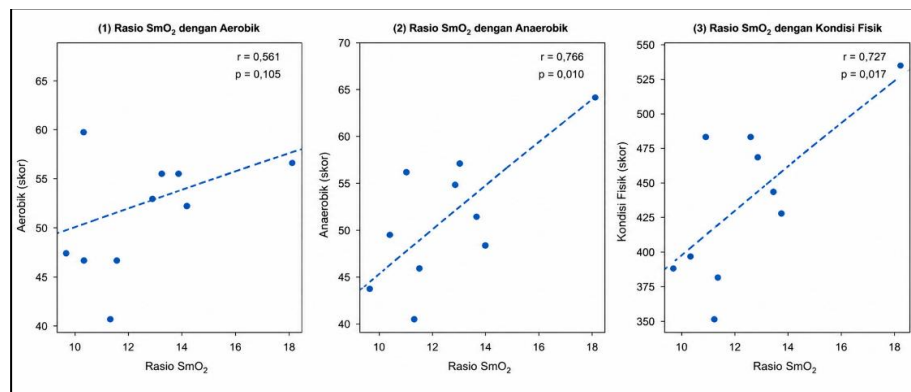


Gambar 1. Kotak Plot Variabel Studi

Berdasarkan Gambar 1, distribusi variabel Rasio SmO₂, Aerobik, Anaerobik, dan Kondisi Fisik diperiksa untuk 10 atlet yang termasuk dalam penelitian ini. Variabel Rasio SmO₂ menunjukkan bahwa median dan rata-rata relatif dekat, menunjukkan distribusi data yang cukup seimbang. Namun, satu pengamatan muncul di atas kumis atas, menunjukkan adanya *outlier* dengan nilai Rasio SmO₂ jauh lebih tinggi daripada atlet lainnya. Terlepas dari *outlier* ini, sebagian besar titik data terkonsentrasi dalam kisaran yang relatif sempit, menunjukkan variabilitas yang dapat diterima di antara peserta. Variabel Aerobik menunjukkan distribusi yang relatif simetris, dengan rata-rata terletak dekat dengan median. Tidak ada *outlier* yang diamati, menunjukkan bahwa kapasitas aerobik atlet relatif homogen. Penyebaran kotak dan kumis yang sedang menunjukkan variasi yang wajar dalam kinerja aerobik di antara peserta tanpa nilai ekstrem.

Demikian pula, variabel Anaerobik menampilkan kumpulan data yang terdistribusi dengan baik tanpa *outlier* yang jelas. Median dan rata-rata diposisikan di dekat pusat distribusi, menunjukkan penyebaran skor anaerobik yang seimbang. Kisaran interkuartil yang relatif kompak menunjukkan bahwa para atlet memiliki kapasitas anaerobik yang sebanding. Variabel Kondisi Fisik menunjukkan rentang nilai terluas di antara semua variabel. Hal ini tercermin dalam kumis yang lebih panjang dan rentang interkuartil yang lebih besar, menunjukkan variabilitas yang lebih besar dalam kondisi fisik secara keseluruhan di antara para atlet. Namun demikian, tidak ada *outlier* ekstrem, dan kedekatan antara rata-rata dan median menunjukkan bahwa data tetap didistribusikan secara normal.

Secara keseluruhan, plot kotak menunjukkan bahwa variabel penelitian memiliki distribusi yang memuaskan dengan nilai ekstrem terbatas. Kecuali untuk satu *outlier* dalam variabel Rasio SmO₂, data tampak relatif homogen dan didistribusikan secara simetris. Temuan ini mendukung hasil tes normalitas dan menunjukkan bahwa kumpulan data memenuhi asumsi yang diperlukan untuk analisis parametrik berikutnya, termasuk korelasi Pearson, analisis regresi, dan analisis jalur. Hasil uji korelasi Pearson antar variabel penelitian disajikan pada Gambar 2 berikut.



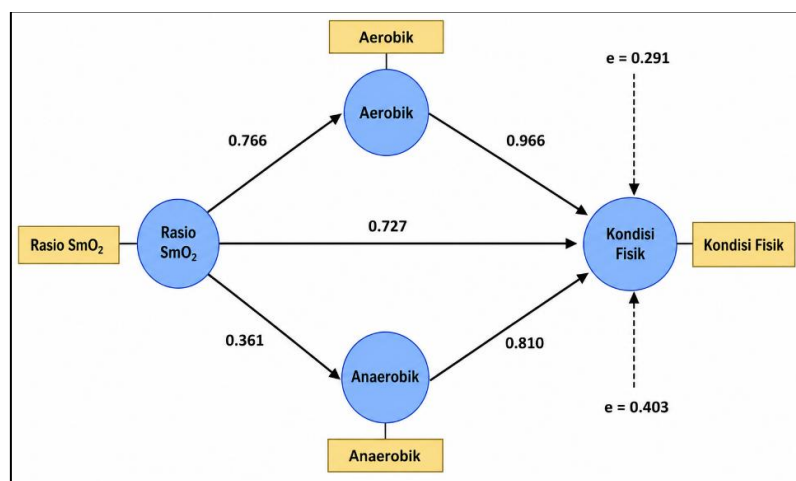
Gambar 2. Hasil Korelasi Pearson Antar Variabel Studi

Regresi sederhana HS pada Rasio SmO₂ menghasilkan $R^2 = 0,091$, $F = 0,803$, $p = 0,396$, menunjukkan bahwa status hidrasi hanya menjelaskan 9,1% varians dalam Rasio SmO₂ dan efeknya tidak signifikan secara statistik. Demikian pula, regresi sederhana HS pada VO₂Max menghasilkan $R^2 = 0,057$, $F = 0,488$, $p = 0,505$, yang berarti HS hanya menjelaskan 5,7% dari varians VO₂Max. Sebaliknya, regresi sederhana Rasio SmO₂ pada VO₂Max sangat signifikan ($R^2 = 0,738$, $F = 22,527$, $p = 0,001$), dengan Rasio SmO₂ saja menyumbang 73,8% dari varians VO₂Max.

Regresi linier berganda dengan Rasio HS dan SmO₂ sebagai prediktor menghasilkan model keseluruhan yang signifikan ($R^2 = 0,738$, R^2 yang Disesuaikan = 0,664, $F = 9,877$, $p = 0,009$). Persamaan regresi yang dihasilkan adalah:

$$VO_2Max = 13.625 + 0.115 + 3.353(Rasio SmO_2)$$

Dalam model regresi ganda, hanya Rasio SmO₂ yang tetap menjadi prediktor independen yang signifikan ($\beta = 0,866$, $t = 4,268$, $p = 0,004$), sedangkan HS tidak signifikan ($\beta = 0,022$, $t = 0,107$, $p = 0,918$). Gambar 3 menyajikan ringkasan koefisien analisis jalur lengkap:



Gambar 3. Ringkasan Koefisien Analisis Jalur

Gambar 3 menggambarkan model analisis jalur yang memeriksa efek langsung dan tidak langsung dari Rasio SmO₂ pada Kondisi Fisik melalui

kapasitas Aerobik dan Anaerobik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Rasio SmO_2 memiliki efek positif langsung terhadap Kondisi Fisik ($\beta = 0,727$). Selain itu, Rasio SmO_2 secara positif mempengaruhi kapasitas Aerobik ($\beta = 0,766$) dan kapasitas Anaerobik ($\beta = 0,361$). Di antara variabel mediasi, kapasitas Aerobik menunjukkan efek terkuat pada Kondisi Fisik ($\beta = 0,966$), diikuti oleh Kapasitas Anaerobik ($\beta = 0,810$). Temuan ini menunjukkan bahwa atlet dengan Rasio SmO_2 yang lebih tinggi cenderung menunjukkan kinerja aerobik dan anaerobik yang lebih baik, yang kemudian berkontribusi pada peningkatan kondisi fisik.

Secara keseluruhan, model menunjukkan bahwa kapasitas Aerobik memainkan peran mediasi paling dominan dalam hubungan antara Rasio SmO_2 dan Kondisi Fisik, sedangkan kapasitas Anaerobik juga berkontribusi positif tetapi pada tingkat yang lebih rendah. Ini menyoroti pentingnya pemanfaatan oksigen otot dalam mendukung kinerja sistem energi dan kebugaran fisik secara keseluruhan pada atlet.

PEMBAHASAN

Studi ini menyelidiki hubungan antara profil sistem energi berbasis saturasi oksigen otot (SmO_2) dan kondisi fisik atlet bulutangkis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Rasio SmO_2 secara signifikan terkait dengan kapasitas aerobik dan kondisi fisik, sedangkan hubungannya dengan kapasitas anaerobik tidak signifikan secara statistik. Temuan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan oksigen otot memainkan peran penting dalam menentukan kinerja fisiologis dan pengkondisian fisik pada atlet bulutangkis. Hubungan yang signifikan antara Rasio SmO_2 dan kapasitas aerobik menunjukkan bahwa atlet dengan pemanfaatan oksigen otot yang lebih efisien cenderung menunjukkan kinerja aerobik yang unggul. Secara fisiologis, SmO_2 mencerminkan keseimbangan antara pengiriman oksigen dan konsumsi oksigen dalam jaringan otot aktif, menjadikannya indikator berharga dari status metabolisme otot selama berolahraga (Perrey et al., 2024).

Atlet dengan kebugaran aerobik yang lebih tinggi umumnya menunjukkan kemampuan yang lebih besar untuk mengekstrak dan memanfaatkan oksigen secara efisien, menghasilkan peningkatan kinerja daya tahan dan kelelahan yang tertunda. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa kapasitas aerobik terkait erat dengan dinamika saturasi oksigen otot selama berolahraga (Negara et al., 2024). Hubungan yang kuat antara Rasio SmO_2 dan kapasitas aerobik sangat relevan dalam bulu tangkis, olahraga intermiten yang ditandai dengan reli intensitas tinggi berulang yang diselingi dengan periode pemulihan yang singkat.

Selama kompetisi, atlet harus berulang kali memulihkan cadangan energi dan mempertahankan kinerja dalam waktu lama. Oleh karena itu, sistem aerobik yang berkembang dengan baik sangat penting untuk mempertahankan intensitas gerakan dan memfasilitasi pemulihan antar reli (Laffaye et al., 2015). Temuan ini mendukung gagasan bahwa atlet dengan pemanfaatan oksigen otot yang lebih baik memiliki karakteristik aerobik yang unggul, memungkinkan mereka untuk mempertahankan kinerja lebih efektif selama pertandingan.

Sebaliknya, hubungan antara Rasio SmO_2 dan kapasitas anaerobik tidak signifikan secara statistik. Meskipun korelasi positif diamati, besarnya hubungan tidak cukup untuk menunjukkan asosiasi fisiologis yang bermakna. Temuan ini

dapat dijelaskan oleh fakta bahwa kinerja anaerobik sebagian besar dipengaruhi oleh fosfagen dan jalur energi glikolitik, yang kurang bergantung pada ketersediaan oksigen daripada metabolisme aerobik (Baker et al., 2010). Kinerja anaerobik juga dipengaruhi oleh karakteristik neuromuskular, komposisi serat otot, dan ketersediaan fosfokreatin, yang mungkin tidak diwakili secara memadai oleh pengukuran SmO_2 saja. Akibatnya, sementara SmO_2 memberikan informasi penting mengenai metabolisme oksidatif, mungkin memiliki kapasitas terbatas untuk menjelaskan variasi kinerja anaerobik di antara atlet.

Hasil selanjutnya menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara kapasitas aerobik dan kondisi fisik. Kapasitas aerobik muncul sebagai variabel paling berpengaruh yang terkait dengan kondisi fisik secara keseluruhan, menunjukkan bahwa kebugaran kardiorespirasi memainkan peran sentral dalam menentukan kesiapan atletik. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa atlet dengan tingkat kebugaran aerobik yang lebih tinggi dapat pulih lebih cepat, menahan kelelahan dengan lebih efektif, dan mempertahankan upaya intensitas tinggi dalam waktu yang lebih lama (Cádiz Gallardo et al., 2023). Karena bulu tangkis membutuhkan pola gerakan terus menerus dan akselerasi berulang sepanjang pertandingan, kemampuan untuk memanfaatkan oksigen secara efisien menjadi penentu penting dari kinerja fisik secara keseluruhan. Kapasitas anaerobik juga menunjukkan hubungan yang signifikan dengan kondisi fisik.

Temuan ini menyoroti pentingnya produksi energi yang cepat selama aksi bulu tangkis eksplosif seperti *smash*, lompatan, *lunges*, dan perubahan arah yang cepat. Menurut (Kuznetsov et al., 2025), sistem energi anaerobik berkontribusi secara substansial pada tindakan otot intensitas tinggi yang membutuhkan produksi gaya segera. Oleh karena itu, atlet dengan kapasitas anaerobik yang unggul cenderung tampil lebih efektif selama gerakan eksplosif, sehingga berkontribusi positif pada kondisi fisik secara keseluruhan.

Analisis jalur mengungkapkan bahwa Rasio SmO_2 mempengaruhi kondisi fisik baik secara langsung maupun tidak langsung melalui kapasitas aerobik dan anaerobik. Efek langsung dari Rasio SmO_2 pada kondisi fisik menunjukkan bahwa pemanfaatan oksigen otot itu sendiri merupakan penentu penting kebugaran fisik. Lebih penting lagi, efek tidak langsung melalui kapasitas aerobik lebih besar daripada efek tidak langsung melalui kapasitas anaerobik.

Temuan ini menunjukkan bahwa kapasitas aerobik berfungsi sebagai mediator utama antara pemanfaatan oksigen otot dan kondisi fisik. Dari perspektif praktis, temuan ini mendukung penggunaan Moxy Monitor sebagai alat pemantauan untuk program pengkondisian atlet. Penilaian saturasi oksigen otot secara real-time dapat membantu pelatih mengidentifikasi respons fisiologis individu terhadap pelatihan dan mengembangkan strategi pengkondisian yang lebih personal. Pendekatan semacam itu konsisten dengan rekomendasi saat ini yang menganjurkan resep pelatihan berbasis bukti menggunakan teknologi pemantauan fisiologis (Feldmann et al., 2022).

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa Rasio SmO_2 adalah indikator fisiologis yang bermakna yang terkait dengan kinerja aerobik dan kondisi fisik secara keseluruhan pada atlet bulu tangkis. Hasilnya menyoroti potensi penerapan pemantauan saturasi oksigen otot sebagai alat praktis untuk pembuatan profil sistem energi dan pengkondisian fisik individual. Studi masa

depan yang melibatkan ukuran sampel yang lebih besar dan populasi atletik yang berbeda direkomendasikan untuk lebih memvalidasi kegunaan pemantauan berbasis SmO₂ dalam pengoptimalan kinerja olahraga.

SIMPULAN

Penelitian ini menyelidiki penggunaan profil sistem energi berbasis saturasi oksigen otot (SmO₂) sebagai dasar pengkondisian fisik pada atlet bulutangkis. Temuan ini mengungkapkan bahwa Rasio SmO₂ secara signifikan dikaitkan dengan kapasitas aerobik dan kondisi fisik, menunjukkan bahwa atlet dengan pemanfaatan oksigen otot yang lebih efisien cenderung menunjukkan kinerja aerobik yang lebih baik dan kebugaran fisik secara keseluruhan. Namun, hubungan antara Rasio SmO₂ dan kapasitas anaerobik tidak signifikan secara statistik, menunjukkan bahwa kinerja anaerobik dipengaruhi oleh faktor fisiologis tambahan di luar dinamika oksigen otot. Hasilnya juga menunjukkan bahwa kapasitas aerobik dan anaerobik secara signifikan berkontribusi pada kondisi fisik, dengan kapasitas aerobik menunjukkan pengaruh terkuat.

Analisis jalur lebih lanjut menunjukkan bahwa Rasio SmO₂ mempengaruhi kondisi fisik baik secara langsung maupun tidak langsung melalui kapasitas aerobik dan anaerobik. Efek tidak langsung melalui kapasitas aerobik lebih besar daripada melalui kapasitas anaerobik, menyoroti peran mediasi penting kebugaran aerobik dalam hubungan antara pemanfaatan oksigen otot dan kondisi fisik. Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa pemantauan SmO₂ menggunakan Moxy Monitor dapat berfungsi sebagai alat fisiologis yang berharga untuk pembuatan profil sistem energi dan evaluasi atlet.

Penerapan pemantauan berbasis SmO₂ dapat membantu pelatih dalam merancang program pengkondisian fisik yang lebih individual dan berbasis bukti yang bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja atletik dalam bulu tangkis. Studi masa depan yang melibatkan ukuran sampel yang lebih besar dan atlet dari tingkat kompetitif yang berbeda direkomendasikan untuk lebih memvalidasi efektivitas pemantauan berbasis SmO₂ dalam penilaian kinerja olahraga dan resep pelatihan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alaba, O. A., Chiwire, P., Siya, A., Saliu, O. A., Nhakaniso, K., Nzeribe, E., Okova, D., & Lukwa, A. T. (2023). Socio-economic inequalities in the double burden of malnutrition among under-five children: Evidence from 10 selected sub-Saharan African countries. 1–15.
- Arnold, J. I., Yorgev, A., Nelson, H., Van Hooff, M., & Koehle, M. S. (2024). Muscle reoxygenation is slower after higher cycling intensity, and is faster and more reliable in locomotor than in accessory muscle sites. *Frontiers in Physiology*, 15, Article 1449384. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1449384>
- Baker, J. S., McCormick, M. C., & Robergs, R. A. (2010). Interaction among skeletal muscle metabolic energy systems during intense exercise. *Journal of Nutrition and Metabolism*, 2010, Article 905612. <https://doi.org/10.1155/2010/905612>
- Born, D.-P., Stöggl, T., Swarén, M., & Björklund, G. (2016). Running in hilly terrain: NIRS is more accurate to monitor intensity than heart rate.

- International Journal of Sports Physiology and Performance*.
<https://doi.org/10.1123/ijssp.2016-0101>
- Cádiz Gallardo, M. P., Pradas de la Fuente, F., Moreno-Azze, A., & Carrasco Páez, L. (2023). Physiological demands of racket sports: A systematic review. *Frontiers in Psychology*, 14, Article 1149295. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1149295>
- Crum, E. M., O'Connor, W. J., Van Loo, L., Valckx, M., & Stannard, S. R. (2017). Validity and reliability of the Moxy oxygen monitor during incremental cycling exercise. *European Journal of Sport Science*, 17(8), 1037–1043. <https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1330899>
- Feldmann, A., Ammann, L., Gächter, F., Zibung, M., & Erlacher, D. (2022). Muscle oxygen saturation breakpoints reflect ventilatory thresholds in both cycling and running. *Journal of Human Kinetics*, 83, 87–97. <https://doi.org/10.2478/hukin-2022-0054>
- Feldmann, A., Schmitz, R., & Erlacher, D. (2019). Near-infrared spectroscopy-derived muscle oxygen saturation on a 0% to 100% scale: Reliability and validity of the Moxy Monitor. *Journal of Biomedical Optics*, 24(11), 115001. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.24.11.115001>
- 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), Article 35. <https://doi.org/10.3390/sports11020035>
- Hetlelid, K. J., Plews, D. J., Herold, E., Laursen, P. B., & Seiler, S. (2015). Rethinking the role of fat oxidation: Substrate utilisation during high-intensity interval training in well-trained and recreationally trained runners. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 1(1), Article e000047. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2015-000047>
- Itokazu, Y., Tsai, Y. T., & Yu, R. K. (2018). Epigenetic regulation of ganglioside expression in neural stem cells and neuronal cells. *Glycoconjugate Journal*, 34(6), 749–756. <https://doi.org/10.1007/s10719-016-9719-6>
- Jeppesen, T. D., Madsen, K. L., Poulsen, N. S., Løkken, N., & Vissing, J. (2021). Exercise testing, physical training and fatigue in patients with mitochondrial myopathy related to mtDNA mutations. *Journal of Clinical Medicine*, 10(8), Article 1796. <https://doi.org/10.3390/jcm10081796>
- Jones, B., Dat, M., & Cooper, C. E. (2014). Underwater near-infrared spectroscopy measurements of muscle oxygenation: Laboratory validation and preliminary observations in swimmers and triathletes. *Journal of Biomedical Optics*, 19(12), Article 127002. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.12.127002>
- Kuznetsov, A. V., Margreiter, R., Hagenbuchner, J., & Ausserlechner, M. J. (2025). Energy metabolism in different skeletal muscles and muscle fibers: Implications for injury and dietary supplementation. *Pflügers Archiv – European Journal of Physiology*, 477(10), 1231–1240. <https://doi.org/10.1007/s00424-025-03112-5>
- Laffaye, G., Phomsoupha, M., & Dor, F. (2015). Changes in the game characteristics of a badminton match: A longitudinal study through the Olympic Game finals analysis in men's singles. *Journal of Sports Science and Medicine*, 14(3), 584–590.

- 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), 1–14. <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. *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>
- Perrey, S. (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. (2022). Muscle oxygenation unlocks the secrets of physiological responses to exercise: Time to exploit it in the training monitoring. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4, Article 864825. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.864825>
- 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., & 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>
- Pilotto, A. M., Adami, A., Mazzolari, R., Brocca, L., Crea, E., Zuccarelli, L., Pellegrino, M. A., Bottinelli, R., Grassi, B., Rossiter, H. B., & Porcelli, S. (2022). Near-infrared spectroscopy estimation of combined skeletal muscle oxidative capacity and O2 diffusion capacity in humans. *The Journal of Physiology*, 600(18), 4153–4168. <https://doi.org/10.1113/JP283267>
- 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), Article 1073. <https://doi.org/10.3390/biology11071073>
- Vasquez-Bonilla, A. A., Yáñez-Sepúlveda, R., Monsalves-Álvarez, M., Tuesta, M., Duclos-Bastiás, D., Cortés-Roco, G., Olivares-Arancibia, J., Guzmán-Muñoz, E., & López-Gil, J. F. (2025). Reliability of muscle oxygen saturation for evaluating exercise intensity and knee joint load indicators. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 10(2), Article 136. <https://doi.org/10.3390/jfmk10020136>