

PENGARUH STATUS HIDRASI DAN DESATURASI YANG DIINDUKSI LATIHAN TERHADAP PERFORMA FISIK ATLET CLUB BULU TANGKIS

Ach Farhan Nur Hidayat¹, Jajat Darajat Kusumah Negara², Agus Gumilar³
Universitas Pendidikan Indonesia^{1,2,3}
farhannh2594@upi.edu¹

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh status hidrasi (SH) dan rasio desaturasi oksigen otot akibat latihan (Rasio SmO₂) terhadap kinerja fisik yang diwakili oleh VO₂Max pada atlet remaja klub bulu tangkis. Metode: Pendekatan kuantitatif korelasional dengan regresi linier berganda dan analisis jalur digunakan. Sepuluh atlet remaja (usia 12–15 tahun) dari PB. Mutiara Cardinal Bandung berpartisipasi sebagai subjek penelitian dengan menggunakan *sampling purposif*. Status hidrasi diukur pasca-latihan menggunakan Tanita Body Composition Analyzer (Analisis Impedansi Bioelektrik/BIA), sedangkan desaturasi oksigen otot dipantau secara *real-time* menggunakan Moxy Monitor (Spektroskopi Inframerah Dekat/NIRS) selama Uji Beep yang terstandarisasi. Data dianalisis menggunakan analisis korelasi, regresi, dan jalur. Hasil: Status hidrasi tidak menunjukkan hubungan yang signifikan baik dengan Rasio SmO₂ ($r = -0,302$, $p = 0,396$) maupun VO₂Max ($r = -0,240$, $p = 0,505$). Sebaliknya, Rasio SmO₂ menunjukkan korelasi yang sangat kuat dan signifikan dengan VO₂Max ($r = 0,859$, $p = 0,001$), yang menjelaskan 73,8% variansnya. Analisis jalur menunjukkan bahwa status hidrasi memengaruhi VO₂Max terutama melalui Rasio SmO₂. Efisiensi pemanfaatan oksigen otot, yang diukur melalui Rasio SmO₂, merupakan penentu fisiologis dominan terhadap kinerja aerobik pada atlet bulu tangkis remaja, melampaui kontribusi status hidrasi ketika atlet mempertahankan tingkat hidrasi normal. Temuan ini mendukung integrasi pemantauan berbasis NIRS ke dalam praktik latihan bulu tangkis.

Kata Kunci: Bulu Tangkis, Penurunan Saturasi Oksigen, Performa Atletik, Status Hidrasi, VO₂max

ABSTRACT

This study aimed to analyze the influence of hydration status (HS) and the exercise-induced muscle oxygen desaturation ratio (SmO₂ Ratio) on physical performance, represented by VO₂Max, in adolescent badminton club athletes. Method: A quantitative correlational approach with multiple linear regression and path analysis was used. Ten adolescent athletes (aged 12–15 years) from PB. Mutiara Cardinal Bandung participated as research subjects, selected through purposive sampling. Hydration status was measured post-exercise using a Tanita Body Composition Analyzer (Bioelectrical Impedance Analysis/BIA), while muscle oxygen desaturation was monitored in real time using a Moxy Monitor (Near-Infrared Spectroscopy/NIRS) during a standardized Beep Test. Data were analyzed using correlation, regression, and path analysis. Results: Hydration status showed

no significant relationship with either the SmO₂ Ratio ($r = -0.302$, $p = 0.396$) or VO₂Max ($r = -0.240$, $p = 0.505$). In contrast, the SmO₂ Ratio showed a very strong and significant correlation with VO₂Max ($r = 0.859$, $p = 0.001$), explaining 73.8% of its variance. Path analysis showed that hydration status influenced VO₂Max mainly through the SmO₂ Ratio. Muscle oxygen utilization efficiency, as measured by the SmO₂ Ratio, is the dominant physiological determinant of aerobic performance in adolescent badminton athletes, surpassing the contribution of hydration status when athletes maintain normal hydration levels. These findings support the integration of NIRS-based monitoring into badminton training practice.
Keywords: Badminton, Muscle Oxygen Desaturation, Athletic Performance, Hydration Status, VO₂max

PENDAHULUAN

Bulu tangkis merupakan salah satu olahraga paling populer di dunia, mulai dari tingkat pemula hingga tingkat elit. Olahraga ini membutuhkan kombinasi antara kecepatan, kelincahan, daya tahan, dan kemampuan teknis (Subarjah & Hidayat, 2007). Bulu tangkis memiliki makna budaya yang penting di Indonesia, yang memiliki tradisi panjang dalam menghasilkan atlet kelas dunia, mulai dari kemenangan bersejarah Tan Joe Hok di All England pada tahun 1957 hingga prestasi Olimpiade modern (PBSI, 2023). Olahraga ini menuntut sistem energi aerobik dan anaerobik, sehingga atlet perlu mempertahankan tingkat kebugaran kardiovaskular yang tinggi, serta kekuatan muskuloskeletal yang tinggi dan koordinasi gerakan yang presisi selama pertandingan yang dapat berlangsung dari 30 menit hingga lebih dari satu jam (Apriantono et al., 2018).

Dari perspektif fisiologi, pemain bulu tangkis elit dapat mencapai tingkat VO₂Max rata-rata hingga 63,3 ml/kg/menit, yang menunjukkan tingkat kebugaran kardiovaskular yang tinggi (Apriantono et al., 2018). Hubungan antara performa fisik dalam bulu tangkis dan kemampuan melakukan pertukaran pukulan intensitas tinggi yang berulang disertai fase pemulihan singkat menunjukkan bahwa performa fisik bergantung pada pengiriman oksigen dan metabolisme yang efisien di dalam otot (Joummy et al., 2020). Dalam hal faktor fisiologis penentu kinerja fisik yang mungkin dipengaruhi oleh latihan dan faktor lain, hidrasi dan oksigenasi otot layak mendapat perhatian ilmiah lebih lanjut (Murray, 2007; Negara, 2024).

Status hidrasi adalah keseimbangan antara asupan cairan dan kehilangan cairan melalui mekanisme fisiologis seperti keringat, urin, pernapasan, dan buang air besar (Reza & Cerika, 2016). Hidrasi yang tepat membantu menjaga volume plasma dan termoregulasi serta pengiriman nutrisi dan efisiensi kardiovaskular selama latihan intensif (Murray, 2007). Kehilangan cairan selama pertandingan tergolong sedang (0,32–0,37% dari berat badan) pada pemain bulu tangkis profesional Spanyol, meskipun hidrasi yang tepat berkaitan dengan pemeliharaan kekuatan otot yang secara signifikan lebih unggul (Abián-Vicén et al., 2012). Sebaliknya, kondisi dehidrasi mengganggu fungsi neuromuskular, fungsi kognitif, dan kapasitas kinerja secara keseluruhan, dengan ambang batas kritis terlihat di atas 2% kehilangan berat badan (Cheuvront & Kenefick, 2014; Judelson et al., 2007).

Proses desaturasi oksigen otot, yang diukur dengan Spektroskopi Inframerah Dekat (NIRS), memberikan gambaran langsung tentang oksigen. Dalam kasus latihan fisik intens, saturasi oksigen otot (SmO₂) menurun akibat ketidakseimbangan antara pasokan oksigen dan tuntutan metabolik, sehingga

mempercepat kelelahan dan menurunkan kinerja otot (Negara, 2024). Dalam sebuah studi yang dilakukan oleh Boone et al. (2009), peneliti menemukan bahwa profil desaturasi oksigen otot selama latihan bertahap berbeda tergantung pada kebugaran aerobik, di mana individu dengan $VO_2\text{Max}$ yang lebih baik cenderung memiliki proses penyerapan oksigen yang lebih teratur. Oleh karena itu, korelasi ini sangat penting saat mengevaluasi kinerja atlet dalam permainan intermiten seperti bulu tangkis.

Meskipun jumlah literatur tentang hidrasi dan oksigenasi otot secara terpisah terus meningkat, hingga saat ini belum ada studi yang diterbitkan yang menggabungkan analisis cairan tubuh segmen menggunakan analisis impedansi bioelektrik (BIA) dan pemantauan SmO_2 otot secara *real-time* dengan perangkat NIRS pada atlet bulu tangkis. Rachman (2023) mengaitkan profil kapasitas aerobik/anaerobik dengan pemantauan hidrasi dalam bulu tangkis, namun hubungan langsung antara kompartemen hidrasi dan dinamika SmO_2 serta akhirnya $VO_2\text{Max}$ belum dimodelkan secara statistik. Pendekatan terintegrasi ini sangat penting bagi klub-klub bulu tangkis remaja Indonesia, di mana infrastruktur untuk pemantauan fisiologis semakin meningkat, namun kerangka kerja berbasis bukti masih belum memadai.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk (1) menganalisis pengaruh status hidrasi terhadap Rasio SmO_2 pada atlet bulu tangkis remaja, (2) menganalisis pengaruh Rasio SmO_2 terhadap $VO_2\text{Max}$, dan (3) menyelidiki kontribusi simultan status hidrasi dan Rasio SmO_2 terhadap performa fisik. Teori fisiologis saat ini membuat kami memperkirakan bahwa status hidrasi dan Rasio SmO_2 akan memiliki efek signifikan terhadap $VO_2\text{Max}$, dengan Rasio SmO_2 memediasi efek hidrasi terhadap kinerja aerobik. Keunikan penelitian ini adalah penggunaan gabungan analisis hidrasi berbasis BIA (Tanita) dan pemantauan oksigenasi otot berbasis NIRS (*Moxxy Monitor*) selama tes kebugaran standar pada atlet bulu tangkis, yang memungkinkan profil fisiologis komprehensif yang dapat secara langsung menjadi dasar untuk resep latihan dan protokol pemantauan.

KAJIAN TEORI

Secara fisiologis, bulu tangkis merupakan cabang olahraga intermiten yang menuntut kombinasi kapasitas aerobik dan anaerobik secara bersamaan. Rangkaian reli yang berlangsung singkat namun berulang-ulang dengan intensitas tinggi menyebabkan atlet harus memiliki kapasitas pemulihan yang cepat di antara setiap poin. $VO_2\text{Max}$, sebagai indikator utama kapasitas aerobik maksimal, mencerminkan kemampuan sistem kardiorespirasi dalam mengangkut dan memanfaatkan oksigen selama aktivitas fisik intensitas tinggi. Pada pemain bulu tangkis elit, nilai $VO_2\text{Max}$ yang tinggi berkontribusi terhadap kemampuan mempertahankan kualitas pukulan dan kecepatan reaksi sepanjang pertandingan yang dapat berlangsung lebih dari satu jam (Apriantono et al., 2018).

Status hidrasi merujuk pada keseimbangan dinamis antara asupan dan pengeluaran cairan tubuh yang memengaruhi volume plasma, viskositas darah, dan efisiensi transportasi oksigen ke jaringan aktif. Dalam konteks olahraga, hidrasi yang optimal berperan penting dalam menjaga termoregulasi serta mencegah penurunan performa akibat peningkatan suhu inti tubuh selama latihan berkepanjangan. Ketika volume plasma menurun akibat dehidrasi, curah jantung dan aliran darah ke otot yang bekerja turut berkurang, sehingga berdampak pada

penurunan kapasitas kerja fisik (Murray, 2007). Oleh karena itu, pemantauan status hidrasi menjadi salah satu aspek penting dalam manajemen beban latihan atlet, termasuk atlet bulu tangkis remaja yang berada dalam tahap perkembangan fisik.

Saturasi oksigen otot (SmO_2) menggambarkan keseimbangan antara pasokan oksigen melalui aliran darah kapiler dan konsumsi oksigen oleh mitokondria pada otot yang aktif bekerja. Teknologi *Near-Infrared Spectroscopy* (NIRS) memungkinkan pengukuran non-invasif terhadap dinamika oksigenasi otot secara *real-time*, sehingga dapat menggambarkan pola desaturasi selama latihan bertahap. Pola desaturasi yang lebih teratur dan progresif umumnya diasosiasikan dengan tingkat kebugaran aerobik yang lebih baik, karena mencerminkan efisiensi ekstraksi oksigen pada level otot lokal (Boone et al., 2009). Rasio antara besarnya dan laju desaturasi oksigen otot ini kemudian dapat dijadikan indikator komposit yang merepresentasikan efisiensi metabolisme aerobik pada atlet.

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, digunakan desain penelitian kuantitatif korelasional dengan regresi linier berganda dan analisis jalur untuk menguji secara bersamaan pengaruh dua variabel independen, yaitu HS dan rasio SmO_2 , terhadap variabel dependen, yakni VO_2Max , sebagai indikator utama kinerja fisik. Strategi ini dipilih karena memungkinkan pengukuran sifat, arah, dan cara di mana parameter fisiologis saling terkait dalam lingkungan lapangan yang terkendali (Kline, 2016).

Alat-alat berikut digunakan: (1) Tanita Body Composition Analyzer (BIA) digunakan untuk mengukur status hidrasi dalam bentuk persentase total air tubuh (%TBW). Berdasarkan prinsip alat analisis Tanita, yang didasarkan pada impedansi bioelektrik multi-frekuensi, perangkat ini memberikan estimasi akurat terhadap kompartemen air intraseluler dan ekstraseluler, sehingga menjadi alat pengukuran hidrasi yang valid pada individu yang sehat dan aktif (Potter et al., 2025). (2) Moxy Monitor (sensor spektroskopi inframerah dekat) ditempatkan pada otot *vastus lateralis* (kaki dominan) untuk pemantauan *real-time* tingkat saturasi oksigen otot. Validitas dan reliabilitas Moxy Monitor dalam menilai saturasi oksigen otot telah dibuktikan dalam penelitian sebelumnya dengan uji latihan bertahap (Crum et al., 2017; Osmani et al., 2023). (3) Uji Beep (Multistage Shuttle Run 20 meter) dilakukan untuk menentukan VO_2Max (ml/kg/min), dengan mengacu pada persamaan regresi (Léger & Lambert, 1982).

Sepuluh atlet remaja (12–15 tahun) dari PB. Mutiara Cardinal Bandung direkrut dengan teknik seleksi purposif, dan kriteria inklusi sebagai berikut: (a) anggota klub aktif dengan pengalaman latihan minimal 3 tahun; (b) tidak sedang cedera atau sakit; dan (c) tidak mengalami dehidrasi akut sebelum pengujian. Ukuran sampel memang terbatas, namun hal ini sejalan dengan praktik penelitian fisiologi olahraga yang menggunakan peralatan invasif atau khusus. Misalnya, Negara (2024) menganalisis saturasi oksigen otot pada atlet bersepeda dengan $n = 6$ saja, Crum et al. (2017) memvalidasi Moxy Monitor dengan $n = 8$, dan Green et al. (2023) meneliti bagaimana tubuh pemain bulu tangkis junior bereaksi selama pertandingan menggunakan sepuluh pemain remaja yang sangat bugar. Eserhaut et al. (2025) menganalisis kinetika oksigen otot rangka selama latihan bertahap pada $n = 9$ pendayung wanita. Studi-studi ini mengonfirmasi validitas analisis studi fisiologis sampel kecil ketika instrumen objektif digunakan.

Semua pengukuran dilakukan dalam satu sesi di GOR PB. Mutiara Cardinal Bandung. Para atlet melakukan prosedur pemanasan standar. Sensor Moxy Monitor dipasang pada otot vastus lateralis selama seluruh tes berlangsung. Pengukuran SmO_2 dicatat secara terus-menerus. Komposisi tubuh dan status hidrasi dievaluasi segera setelah Beep Test dan setelah istirahat selama 1 menit menggunakan alat analisis Tanita.

Status Hidrasi (*Hydration Status*) HS dicatat sebagai pembacaan Tanita mengenai persentase total air tubuh (%TBW). Rasio SmO_2 dihitung sebagai rasio antara delta waktu dan perubahan delta SmO_2 selama Beep Test, yang memberikan ukuran gabungan dari besarnya dan laju desaturasi oksigen:

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

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

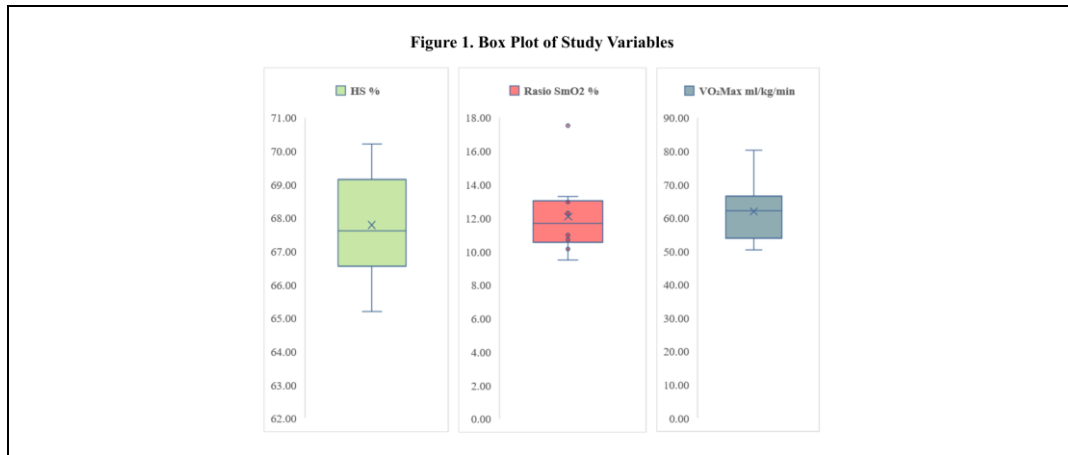
$VO_2\text{Max}$ diperkirakan dari Uji Beep sesuai protokol Léger & Lambert (1982) dan dinyatakan dalam ml/kg/min. Persamaan regresi adalah $VO_2\text{Max} = 31,025 + (3,238 \times \text{kecepatan akhir}) - (3,248 \times \text{usia}) + (0,1536 \times \text{usia} \times \text{kecepatan akhir})$.

Analisis statistik yang digunakan dalam studi ini meliputi SPSS v26. Untuk menguji normalitas data, digunakan uji Shapiro-Wilk karena direkomendasikan untuk kumpulan data dengan $n < 50$ (Razali & Wah, 2011). Koefisien korelasi antara HS, Rasio SmO_2 , dan $VO_2\text{Max}$ diperoleh menggunakan koefisien korelasi Pearson. Analisis regresi linier dan regresi berganda dilakukan untuk menentukan efek prediktif. Penguraian efek total menjadi efek langsung dan tidak langsung dilakukan menggunakan analisis jalur (Kline, 2016). Nilai koefisien beta terstandarisasi (Tabachnick & Fidell, 2013) diperoleh dari prosedur analisis jalur.

HASIL PENELITIAN

Para peserta terdiri dari 10 remaja, yang merupakan atlet bulu tangkis berusia antara 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 latihan selama tujuh tahun, 30% di antaranya memiliki pengalaman 5-6 tahun, sedangkan 20% memiliki pengalaman 3-4 tahun. Mengenai gaya bermain, setengah dari peserta (50%) adalah pemain tunggal, sedangkan setengah lainnya (50%) bermain ganda.

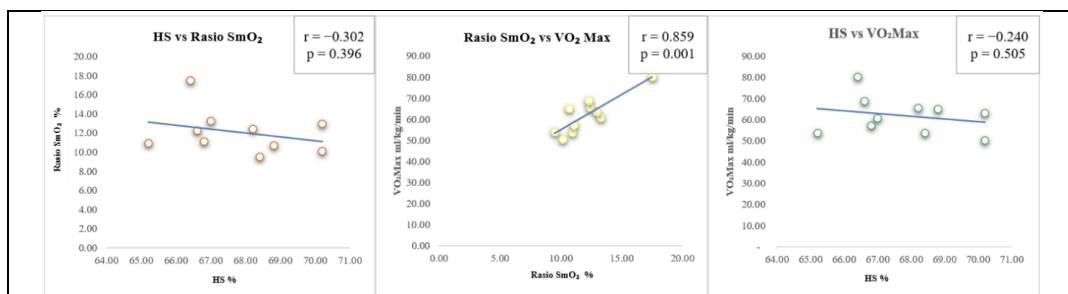
Gambar 1 di bawah ini menyajikan statistik deskriptif mengenai tiga variabel dependen yang dianalisis dalam penelitian ini. Dari hasil di atas terlihat bahwa rata-rata HS peserta adalah 67,78% dengan simpangan baku 1,66%. Hal ini menunjukkan bahwa semua atlet dalam kondisi terhidrasi. Rata-rata Rasio SmO_2 adalah 12,08% dengan standar deviasi 2,27%, yang menunjukkan variasi sedang. Rata-rata $VO_2\text{Max}$ adalah 61,90 ml/kg/menit dengan standar deviasi 8,79.



Gambar 1. Box Plot Variabel Penelitian

Hasil uji Shapiro-Wilk menunjukkan distribusi normal pada semua variabel dependen: HS ($W = 0,941$, $p = 0,566$); Rasio SmO_2 ($W = 0,866$, $p = 0,089$); VO_2Max ($W = 0,946$, $p = 0,617$), sehingga memungkinkan penggunaan statistik parametrik.

Temuan analisis korelasi Pearson bivariat telah disajikan pada Gambar 2. Korelasi antara HS dan Rasio SmO_2 ditemukan tidak signifikan dan sangat lemah ($-0,302$). Demikian pula, HS berkorelasi negatif tetapi lemah dengan VO_2Max (koefisien korelasi = $-0,240$). Di sisi lain, Rasio SmO_2 berkorelasi secara signifikan dengan VO_2Max (koefisien korelasi = $0,859$).



Gambar 2. Hasil Korelasi Pearson Antara Variabel-Variabel Penelitian

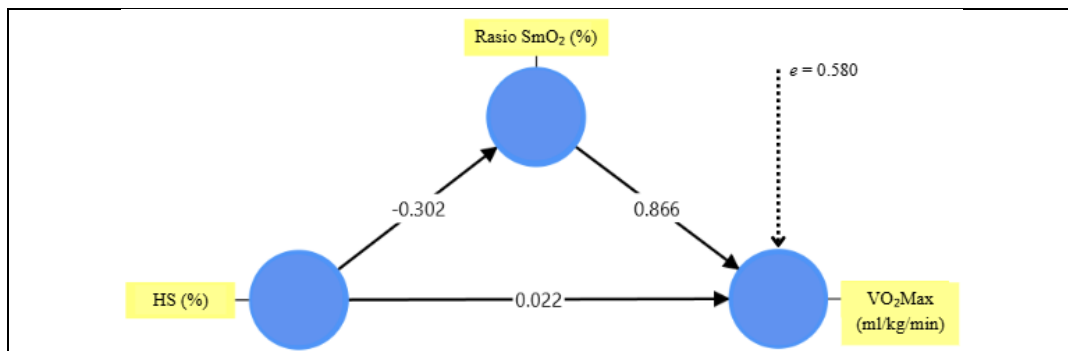
Regresi sederhana antara status hidrasi (HS) dan rasio SmO_2 menghasilkan $R^2 = 0,091$, $F = 0,803$, $p = 0,396$, yang menunjukkan bahwa status hidrasi hanya menjelaskan 9,1% varians pada rasio SmO_2 dan efeknya tidak signifikan secara statistik. Demikian pula, regresi sederhana HS terhadap VO_2Max menghasilkan $R^2 = 0,057$, $F = 0,488$, $p = 0,505$, yang berarti HS hanya menjelaskan 5,7% varians VO_2Max . Sebaliknya, regresi sederhana Rasio SmO_2 terhadap VO_2Max sangat signifikan ($R^2 = 0,738$, $F = 22,527$, $p = 0,001$), dengan Rasio SmO_2 sendiri menjelaskan 73,8% varians VO_2Max .

Regresi linier berganda dengan HS dan Rasio SmO_2 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:

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

Dalam model regresi berganda, hanya Rasio SmO_2 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. Path Analysis Coefficient Summary

Model jalur tersebut juga menunjukkan bahwa varians sisa yang tidak dapat dijelaskan ($e = 0,580$, $e^2 = 0,336$) mengindikasikan bahwa 33,6% variabilitas VO₂Max disebabkan oleh faktor-faktor di luar model ini, seperti massa otot rangka, curah jantung, konsentrasi hemoglobin, riwayat latihan, dan ambang anaerobik.

PEMBAHASAN

Kesimpulan utama dari penelitian ini adalah bahwa efisiensi penggunaan oksigen otot yang dioperasikan sebagai Rasio SmO₂, merupakan prediktor fisiologis utama dari kinerja aerobik (VO₂Max) pada atlet bulu tangkis remaja yang menjelaskan 73,8% dari variansnya ($r = 0,859$, $p = 0,001$). Temuan ini secara jelas menjawab isu penelitian utama dan mendukung hipotesis alternatif (H_a) untuk hubungan Rasio SmO₂–VO₂Max, sementara menolak H_a untuk hubungan HS–VO₂Max dalam kondisi hidrasi normal.

Hubungan Rasio SmO₂–VO₂Max yang diidentifikasi di sini memiliki makna fisiologis dan didukung dengan baik oleh teori ilmu olahraga. Kapasitas aerobik yang lebih tinggi, secara definisi, menuntut kepadatan mitokondria yang lebih tinggi, rasio kapiler-ke-serat, dan aktivitas enzim oksidatif yang lebih tinggi, yang bersama-sama memungkinkan ekstraksi dan penggunaan oksigen yang lebih efektif pada tingkat otot lokal (Bassett & Howley, 2000). Oleh karena itu, Rasio SmO₂ memberikan ukuran yang valid terhadap profil efisiensi ini dengan menggabungkan tingkat dan laju desaturasi oksigen. Boone et al. (2009) mengamati pola deoksigenasi otot yang lebih progresif dan teratur selama latihan bertahap pada atlet dengan VO₂Max yang lebih tinggi dibandingkan dengan individu yang kurang bugar, yang mendukung kesimpulan kami bahwa nilai Rasio SmO₂ yang lebih tinggi terkait dengan VO₂Max yang lebih tinggi pada atlet bulu tangkis.

Hasil ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Negara (2024), yang menunjukkan bahwa pemantauan SmO₂ menggunakan Moxy Monitor memberikan informasi fisiologis mengenai rasio pasokan dan konsumsi oksigen pada atlet yang melakukan aktivitas fisik intensif. Kesimpulan ini serupa dengan temuan Perrey & Ferrari (2018) dalam tinjauan sistematis tentang aplikasi oksimetri otot dalam ilmu olahraga, yang menunjukkan bahwa pengukuran NIRS merupakan penanda yang valid untuk kapasitas aerobik dan berguna dalam mengelola beban latihan. Penelitian ini berkontribusi pada literatur tersebut dengan hasil yang diperoleh dari sampel tim bulu tangkis remaja Indonesia.

Hubungan yang tidak signifikan antara status hidrasi dan Rasio SmO_2 serta VO_2Max (masing-masing $p = 0,396$ dan $p = 0,505$) harus ditafsirkan dengan hati-hati. Temuan ini tidak mengurangi pentingnya hidrasi bagi kinerja atletik. Sebaliknya, hal ini mencerminkan kondisi khusus dalam studi ini, di mana semua atlet berada dalam rentang hidrasi normal (HS: 65,20–70,20%, rata-rata 67,78%) dan dengan variasi antarindividu yang sangat rendah ($\text{SD} = 1,66\%$). Ketika seseorang dalam keadaan terhidrasi optimal, konsekuensi fisiologis dari perbedaan tingkat hidrasi minimal karena volume plasma, kapasitas pengangkutan oksigen, dan fungsi kardiovaskular memadai dalam rentang sempit ini. Demikian pula, Abián-Vicén et al. (2012) menunjukkan bahwa pemain bulu tangkis elit hanya mengalami kehilangan cairan yang moderat ($<0,5\%$ berat badan) selama pertandingan, dan perbedaan kinerja pada tingkat hidrasi moderat ini tidak dramatis. Judelson et al. (2007) menegaskan bahwa penurunan besar pada kekuatan dan daya otot biasanya tidak teramati hingga dehidrasi melebihi 2–3% dari massa tubuh, jauh melampaui apa yang kami amati pada sampel kami.

Analisis jalur lebih lanjut menjelaskan cara variabel-variabel tersebut saling terkait. Meskipun efek langsung HS terhadap VO_2Max kecil (0,022), efek tidak langsung HS terhadap VO_2Max melalui Rasio SmO_2 (–0,262) secara numerik lebih besar daripada efek langsung (0,022), jalur ini harus diinterpretasikan dengan hati-hati karena hubungan HS– SmO_2 tidak signifikan secara statistik. Hal ini menunjukkan bahwa apapun efek status hidrasi terhadap kinerja aerobik pada kohort ini sebagian besar dimediasi oleh pengaruhnya terhadap dinamika oksigenasi otot dan bukan melalui proses kardiovaskular langsung. Rute tidak langsung ini secara fisiologis masuk akal karena hidrasi memengaruhi viskositas darah dan volume plasma, yang pada gilirannya mengubah transportasi oksigen ke otot aktif dan karenanya SmO_2 (Montain & Coyle, 1992). Namun, rantai pengaruh ini tidak cukup kuat untuk memberikan efek yang dapat dibedakan secara statistik dalam rentang hidrasi normal kelompok saat ini.

Secara metodologis, satu faktor yang patut disebutkan adalah bahwa studi ini menggunakan ukuran sampel yang relatif kecil ($n = 10$). Meskipun ukuran sampel yang kecil secara inheren menimbulkan batasan statistik, korelasi yang kuat antara kedua variabel (SmO_2 dan VO_2Max ; $r = 0,859$, $p = 0,001$) menunjukkan adanya korelasi fisiologis. Terdapat preseden untuk studi fisiologis dengan ukuran sampel kecil yang melibatkan peralatan khusus, termasuk Crum et al. (2017), yang memverifikasi Moxy Monitor melalui ukuran sampel $n = 8$; Negara (2024), yang mengeksplorasi fisiologi pesepeda dengan $n = 6$; dan Eserhaut et al. (2025), yang meneliti kinetika saturasi oksigen menggunakan uji latihan bertahap pada atlet dayung wanita dari institusi NCAA Divisi I dengan $n = 9$. Oleh karena itu, konsistensi hasil-hasil ini, yang melibatkan penggunaan peralatan NIRS, memvalidasi metodologi yang digunakan dalam studi ini.

Temuan ini memiliki implikasi praktis yang signifikan bagi pelatih bulu tangkis dan ilmuwan olahraga. Kemampuan prediktif Rasio SmO_2 terhadap VO_2Max yang ditunjukkan di sini mendukung penggunaan pemantauan NIRS secara *real-time* selama latihan sebagai alternatif yang hemat biaya dibandingkan dengan pengujian aerobik berbasis laboratorium. Pelatih dapat menggunakan data SmO_2 untuk mengidentifikasi atlet yang tidak menggunakan oksigen secara optimal dan meresepkan intervensi latihan khusus, seperti latihan interval dan pengondisian daya tahan, untuk meningkatkan kapasitas tersebut. Selain itu, Rasio SmO_2

menggabungkan kedalaman dan kecepatan deoksigenasi otot, sehingga sensitif terhadap adaptasi latihan aerobik dan kondisi kelelahan akut, yang berguna untuk manajemen beban latihan harian.

Status hidrasi bukanlah prediktor independen yang signifikan pada sampel yang terhidrasi dengan baik ini, namun status hidrasi tidak boleh diabaikan dalam kaitannya dengan kinerja. Hidrasi yang memadai tetap menjadi prasyarat untuk mempertahankan volume plasma, termoregulasi, dan fungsi kognitif selama pertandingan bulu tangkis yang berlangsung lama (Murray, 2007; Orrù et al., 2018). Oleh karena itu, rekomendasi praktis yang dapat diambil dari studi ini bersifat dua arah. Pertama, pelatih harus menggunakan oksigenasi otot real-time sebagai ukuran fisiologis utama dalam latihan yang harus ditargetkan dan dipantau. Kedua, atlet harus mengikuti protokol hidrasi yang konsisten sebelum, selama, dan setelah sesi latihan untuk mempertahankan lingkungan fisiologis di mana respons SmO_2 optimal dapat dicapai.

SIMPULAN

Sebagai kesimpulan, temuan penelitian ini membuktikan bahwa Rasio SmO_2 merupakan prediktor yang andal dan signifikan secara statistik terhadap kinerja aerobik (VO_{2Max}) pada atlet bulu tangkis remaja, sedangkan status hidrasi dalam rentang normal tidak secara independen memprediksi Rasio SmO_2 atau VO_{2Max} . Model simultan dari kedua prediktor tersebut menjelaskan proporsi varians yang besar dan signifikan secara statistik terhadap VO_{2Max} . Hasil ini menyoroti pentingnya pemantauan oksigenasi otot berbasis NIRS dalam program pengembangan bulu tangkis remaja dan memberikan bukti empiris baru bagi literatur yang sedang berkembang mengenai pemantauan fisiologis pada atlet bulu tangkis Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Abián-Vicén, J., Del Coso, J., González-Millán, C., Salinero, J. J., & Abián, P. (2012). Analysis of dehydration and strength in elite badminton players. *PLoS ONE*, 7(5), e37821. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037821>
- Apriantono, T., Hidayat, I. I., & Syafriani, R. (2018). Karakteristik fisiologi atlet bulutangkis ganda campuran (physical test). *Jurnal Sositologi*, 17(3), 384–390. <https://doi.org/10.5614/sostek.itbj.2018.17.3.6>
- Bassett, D. R., Jr., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(1), 70–84. <https://doi.org/10.1097/00005768-200001000-00012>
- Boone, J., Koppo, K., Barstow, T. J., & Bouckaert, J. (2009). Pattern of deoxy[Hb+Mb] during ramp cycle exercise: Influence of aerobic fitness status. *European Journal of Applied Physiology*, 105(6), 851–859. <https://doi.org/10.1007/s00421-008-0969-2>
- Cheuvront, S. N., & Kenefick, R. W. (2014). Dehydration: Physiology, assessment, and performance effects. *Comprehensive Physiology*, 4(1), 257–285. <https://doi.org/10.1002/cphy.c130017>
- 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>
- Eserhaut, D. A., DeLeo, J. M., Provost, J. A., Ackerman, K. E., & Fry, A. C. (2025). Monitoring skeletal muscle oxygen saturation kinetics during graded exercise testing in NCAA Division I female rowers. *Frontiers in Physiology*, 16, Article 1538465. <https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1538465>
- 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>
- Joumy, A. J., Suppiah, P. K., & Samsir, M. S. (2020). Strength and endurance in badminton athletes. *Asian Journal of Sports Medicine*, 11(2), 45–52.
- Judelson, D. A., Maresh, C. M., Farrell, M. J., Yamamoto, L. M., Armstrong, L. E., Kraemer, W. J., Volek, J. S., Spiering, B. A., Casa, D. J., & Anderson, J. M. (2007). Effect of hydration state on strength, power, and resistance exercise performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(10), 1817–1824. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3180de5f22>
- Kline, R. B. (2016). *Principles and practice of structural equation modeling* (4th ed.). Guilford Press.
- Léger, L. A., & Lambert, J. (1982). A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict $\dot{V}O_{2\max}$. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 49(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/BF00428958>
- Montain, S. J., & Coyle, E. F. (1992). Influence of graded dehydration on hyperthermia and cardiovascular drift during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 73(4), 1340–1350. <https://doi.org/10.1152/jappl.1992.73.4.1340>
- Murray, B. (2007). Hydration and physical performance. *Journal of the American College of Nutrition*, 26(Suppl. 5), 542S–548S. <https://doi.org/10.1080/07315724.2007.10719656>
- 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>
- Orrù, S., Imperlini, E., Nigro, E., Alfieri, A., Cevenini, A., Polito, R., Daniele, A., Buono, P., & Mancini, A. (2018). Role of functional beverages on sport performance and recovery. *Nutrients*, 10(10), Article 1470. <https://doi.org/10.3390/nu10101470>
- Osmani, F., Lago-Fuentes, C., Alemany-Iturriaga, J., & Barcala-Furelos, M. (2023). The relationship of muscle oxygen saturation analyzer with other monitoring and quantification tools in a maximal incremental treadmill test. *Frontiers in Physiology*, 14, Article 1155037. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1155037>
- 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>
- Persatuan Bulu Tangkis Seluruh Indonesia. (2023). *Sejarah dan organisasi PBSI*. <https://pbsi.id/organisasi/>

- Potter, A. W., Ward, L. C., Chapman, C. L., Tharion, W. J., Looney, D. P., & Friedl, K. E. (2025). Real-world assessment of multi-frequency bioelectrical impedance analysis (MFBIA) for measuring body composition in healthy physically active populations. *European Journal of Clinical Nutrition*, 79, Article 514. <https://doi.org/10.1038/s41430-025-01664-4>
- Rachman, F. (2023). *Profil anaerobik dan aerobik capacity pada atlet bulu tangkis*.
- Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21–33.
- Reza, R. I., & Cerika, R. (2016). *Hubungan antara status hidrasi serta konsumsi cairan pada atlet bola basket*.
- Subarjah, H., & Hidayat, Y. (2007). *Permainan bulutangkis*. FPOK Universitas Pendidikan Indonesia.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). *Using multivariate statistics* (6th ed.). Pearson.