

PENGARUH KELELAHAN OTOT *LOWER BODY* PADA KINEMATIKA *TAKE OFF JUMP SPIKE BOLA VOLI*

THE EFFECT OF LOWER BODY MUSCLE FATIGUE ON VOLLEYBALL TAKE OFF JUMP SPIKE KINEMATICS

^{1*}Iklima Aida Rahman, ²Agus Rusdiana, ³Iwa Ikhwan Hidayat, ⁴Tian Kurniawan, ⁵Unun Umaran, ⁶Iman Imanudin, ⁷Syam Hardwis, ⁸Tono Haryono, ⁹Badruzaman

^{1*,2,3,4,5,6,7,8,9}Program Studi Ilmu Keolahragaan, Fakultas Pendidikan Olahraga dan Kesehatan,
Universitas Pendidikan Indonesia

Kontak koresponden: iklimaaaida15@upi.edu

ABSTRAK

Kelelahan otot *lower body* secara langsung memengaruhi efisiensi gerakan *take off* dalam *jump spike*. Hubungan antara kelelahan dan perubahan kinematika ini menjadi faktor krusial dalam menentukan performa optimal atlet bola voli. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kelelahan otot *lower body* terhadap kinematika pada fase *take off* teknik *jump spike* serta hubungan antara pusat gravitasi tubuh (CG) dan gaya reaksi tanah (GRF). Sampel sebanyak 12 atlet laki-laki Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Bola Voli Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) Bandung. Penelitian ini menggunakan metode deskriptif dengan pendekatan kuantitatif menggunakan desain *pretest* dan *posttest*. Teknik analisis data yang digunakan adalah *Uji Paired T Test*. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan signifikan kadar asam laktat, yang mengindikasikan akumulasi akibat kelelahan. Pada parameter kinematika, tidak ditemukan perbedaan signifikan pada sudut *ankle*, *knee*, dan *hip*, meskipun terjadi perubahan. Namun, *jump height* menunjukkan penurunan signifikan, menunjukkan bahwa kelelahan mempengaruhi kemampuan lompatan. Selain itu, tidak ditemukan hubungan signifikan antara kelelahan dan perubahan parameter kinematika lainnya. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kelelahan otot *lower body* berdampak signifikan pada performa *jump height*, namun tidak mempengaruhi sudut tubuh selama fase *take off* teknik *jump spike*. Penelitian ini menyarankan pentingnya pengelolaan kelelahan otot untuk menjaga performa *jump spike*. Pelatih dan atlet harus fokus pada pemulihan dan penguatan *lower body*. Implikasi penelitian menunjukkan bahwa meskipun sudut tubuh tidak terpengaruh, penurunan *jump height* dapat mengurangi efektivitas permainan, sehingga latihan daya tahan dan teknik lompatan perlu ditingkatkan.

Kata Kunci: kelelahan otot; *lower body*; kinematika; *take off jump spike*; bola voli

ABSTRACT

Lower body muscle fatigue directly affects the efficiency of the take-off movement in the jump spike. The relationship between fatigue and kinematic changes is a crucial factor in determining the optimal performance of volleyball athletes. This study aims to analyze the effect of lower body muscle fatigue on kinematics in the take-off phase of the jump spike technique and the relationship between the body's center of gravity (CG) and ground reaction force (GRF). The sample consisted of 12 male Volleyball athletes from the Student Activity Unit

(UKM) of the Volleyball Indonesian Education University (UPI) Bandung. This study employed a descriptive method with a quantitative approach using a pretest-posttest design and Paired T-Test for data analysis. The results showed a significant increase in lactic acid levels, indicating accumulation due to fatigue. In the kinematic parameters, no significant differences were found in the ankle, knee, and hip angles, although there were changes. However, jump height showed a significant decrease, indicating that fatigue affects jumping ability. In addition, no significant relationship was found between fatigue and changes in other kinematic parameters. This study concludes that lower body muscle fatigue has a significant impact on jump height performance, but does not affect body angles during the take-off phase of the jump spike technique. This study suggests the importance of managing muscle fatigue to maintain jump spike performance. Coaches and athletes should focus on lower body recovery and strengthening. The implications of the study suggest that even though body angle is not affected, decreased jump height can reduce game effectiveness, so endurance training and jumping technique need to be improved.

Keywords: muscle fatigue; lower body; kinematics; take off jump spike; volleyball

Pendahuluan

Bola voli merupakan olahraga yang kompleks dan menuntut teknik, taktik, dan atletis. Pendaratan terjadi terutama setelah lompatan *block* atau *spike* yang berhubungan dengan manuver bertahan dan menyerang (Garcia et al., 2022). Setiap tim terdiri dari enam pemain yang bekerja sama untuk memanfaatkan kekuatan, kelincahan, dan koordinasi *neuromuskular* guna mencapai hasil yang maksimal (Edison Putra et al., 2023). Permainan bola voli juga membutuhkan tuntutan biomekanik pada sistem *muskuloskeletal* serta banyak koordinasi *neuromuskular*, kecepatan, kelincahan, dan kekuatan (Pulungan et al., 2023). *Passing*, *setting*, *spiking*, *blocking* dan servis bola adalah gerakan mendasar dalam permainan bola voli, yang membutuhkan penerapan berbagai lompatan *vertikal* atau *horizontal*, dan gerakan kecepatan (Agopyan et al., 2018). Ini menunjukkan bahwa performa atlet bola voli sangat dipengaruhi pada kemampuan fisik dan teknik yang terintegrasi dengan baik.

Jump spike menjadi teknik yang sering digunakan untuk menyerang ke arah lawan, dengan lompatan yang tinggi dan *power spike* yang kencang akan sulit diterima oleh lawan (Hidayatullah & Wahyudi, 2023). Salah satu fase penting dalam permainan bola voli yaitu fase *take off* yang mempengaruhi efektivitas serangan, seperti *spike* dan *block* (Duhe & Haryanto, 2021). Sehingga bisa dikatakan bahwa kondisi fisik seperti *power* otot lengan, dan otot tungkai merupakan kondisi fisik yang memegang peranan penting dalam olahraga bola voli khususnya dalam melakukan *spike*, karena dapat memperoleh pukulan *spike* yang keras dan tajam (Heldayana et al., 2016). Hal ini sesuai dengan temuan penelitian yang dilakukan oleh (Muklis, 2015) yang menyatakan bahwa *spiker* memberikan presentasi kemenangan yang paling berdampak pada suatu pertandingan bola voli (Farihandiandra et al., 2024). Dengan demikian, memperkuat otot-otot yang relevan dan meningkatkan teknik pada fase *take off* menjadi kunci untuk memperbaiki efektivitas serangan dalam permainan bola voli.

Selama aktivitas olahraga, kelelahan menyebabkan penurunan tenaga otot, koordinasi *neuromuskuler*, kontrol gerakan yang presisi, stabilitas sendi, kontraksi otot, dan waktu reaksi kecepatan (Bujang et al., 2022). Tingginya lompatan yang dipengaruhi oleh kekuatan otot tungkai memang sangat mempengaruhi teknik dasar *spike* dalam permainan bola voli (Yasinta et al., 2024). *Power* otot tungkai adalah kemampuan anggota gerak bawah yang bertujuan memaksimalkan otot-otot tungkai dalam mengatasi tahanan beban latihan dengan kekuatan maksimal dan dalam waktu yang sesingkat mungkin (Alfiansyah et al., 2020; Cahyadi et al., 2018; Syafei et al., 2021). Penguatan otot tungkai sangat penting untuk meningkatkan teknik dan daya serang dalam permainan bola voli.

Biomekanika dianggap sebagai salah satu bidang ilmu yang membantu penelitian interdisipliner tentang kinerja atletik tingkat tinggi (Muthia et al., 2023; Ardiansyah et al., 2024; Buekers et al., 2016). Aplikasi biomekanika dibidang olahraga dilakukan agar dapat menganalisis gerakan-gerakan sehingga hasil analisis ini dapat digunakan untuk memperbaiki teknik secara efektif. Pola gerak yang efektif akan menghasilkan teknik yang baik. Pelatih dapat meng-analisis efisiensi gerakan seorang atlet dan mencoba menentukan apakah atlet dapat melakukan gerakan yang lebih baik (Santoso & Irwanto, 2018). Hal ini menekankan betapa pentingnya penerapan pendekatan biomekanik untuk memperbaiki kualitas teknik dan meningkatkan efisiensi gerakan dalam olahraga.

Kelelahan otot merupakan faktor penting yang dapat memengaruhi performa atlet dalam berbagai cabang olahraga. Dalam konteks bola voli, terutama pada fase *take off* teknik *jump spike*, pengaruh kelelahan otot terhadap parameter kinematika seperti sudut sendi, tinggi lompatan, dan waktu kontak kaki dengan tanah belum banyak diteliti. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan-perubahan tersebut serta mengkaji hubungan antara pusat gravitasi (CG) dan gaya reaksi tanah (GRF) yang dapat terjadi akibat kelelahan otot *lower body*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kelelahan terhadap efisiensi biomekanis gerakan, memberikan wawasan yang berguna bagi atlet dan pelatih dalam upaya meningkatkan performa dalam olahraga bola voli.

Metode

Pengambilan sampel dalam penelitian ini dilakukan dengan metode *purposive sampling*, yaitu teknik pemilihan sampel berdasarkan kriteria tertentu yang relevan dengan tujuan penelitian. Subjek penelitian ini adalah atlet bola voli putra yang tergabung dalam Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Bola Voli Universitas Pendidikan Indonesia (UPI). Jumlah sampel dalam penelitian ini sebanyak 12 atlet laki-laki, dengan kriteria inklusi meliputi berjenis kelamin laki-laki, memiliki riwayat pelatihan bola voli selama minimal 3 tahun pada tingkat kompetisi mahasiswa, tidak mengalami cedera yang membatasi jangkauan gerak (ROM) pada ekstremitas bawah dalam enam bulan terakhir, serta bersedia mengikuti seluruh rangkaian penelitian.

Instrumen penelitian yang digunakan meliputi dua kamera *Panasonic Handycam HC-V100 Full HD* yang diposisikan pada sudut depan dan samping untuk merekam gerakan *take off* saat

jump spike, dua *tripod* untuk menjaga stabilitas kamera selama perekaman, satu *force plate* untuk mengukur gaya reaksi tanah (GRF). Satu alat analisis *Accutrend Lactate* untuk mengukur kadar asam laktat darah sebagai indikator kelelahan, serta perangkat lunak *Kinovea* dan *Skill Spektor* untuk analisis parameter kinematika. Pengambilan data dilakukan di *Laboratorium Sport Science FPOK UPI*.

Prosedur pengumpulan data dimulai dengan (1) pengukuran data *antropometri*, mencakup tinggi badan, berat badan, persentase lemak tubuh, dan Indeks Massa Tubuh (IMT). (2) kadar asam laktat darah subjek diukur sebelum pengujian menggunakan metode pengambilan sampel darah. (3) Subjek kemudian melakukan pemanasan selama 10–15 menit untuk mempersiapkan kondisi fisik. (4) pemasangan marker reflektif pada titik-titik anatomis tubuh, seperti pergelangan kaki, lutut, pinggul, bahu, dan lengan, (5) sample melakukan kalibrasi (6) subjek melakukan tes awal *jump spike* di atas *force plate*. Pada tahap ini, data kinematika, termasuk sudut lutut, sudut pinggul, dan tinggi lompatan, direkam menggunakan dua kamera yang diposisikan di depan dan samping subjek. Setelah tes awal, (7) subjek menjalani perlakuan induksi kelelahan melalui serangkaian latihan seperti *jump height*, *counter-movement jump*, dan *split jump*, masing-masing dilakukan selama 60 detik hingga mencapai titik kelelahan. Akumulasi asam laktat terjadi dengan cepat pada latihan yang berlangsung 60-180 detik sehingga menyebabkan asidosis otot dan penurunan intensitas kerja (Wahyu Erfandy, 2020). Tingkat kelelahan subjek dikonfirmasi dengan pengukuran kadar asam laktat, dengan nilai ambang kelelahan ≥ 4 mmol/L. Setelah kondisi kelelahan tercapai, (8) subjek kembali melakukan tes *jump spike* dengan prosedur yang sama seperti tes awal.

Penelitian ini menggunakan metode *deskriptif* dengan pendekatan *kuantitatif* dengan desain *one-group pretest-posttest*. Semua data kinematika kembali direkam untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan perangkat lunak SPSS versi 30.0. Analisis statistik dilakukan dengan menghitung rata-rata, standar deviasi, serta pengujian normalitas dan homogenitas data. *Uji Paired T-Test* digunakan untuk menguji perbedaan parameter kinematika sebelum dan sesudah perlakuan.

Pada tabel, menunjukkan bahwa deskripsi data sampel yang pertama adalah jumlah sampel sebanyak 12 orang, yang kedua adalah umur, dimana nilai umur minimum yaitu 18 tahun dan nilai maksimumnya 22 tahun dengan rata-rata 20,08 tahun, yang ketiga yaitu tinggi badan dengan nilai tinggi minimum yaitu 164,5 cm dan nilai maximum yaitu 183 cm dengan rata-rata 174,4 cm, yang ke empat yaitu berat badan dengan nilai minimum 49,6 kg dan nilai maximum 86 kg dengan rata-rata 66,83 kg, setelah itu kategori Fat dimana nilai minimum nya yaitu 5,5 dan nilai maximumnya 24,8 dengan nilai rata-rata 13, yang keenam ada BMI dengan nilai minimum 17,5 dan nilai maximumnya adalah 28,1, dengan rata-rata 20,69.

Table 1. Data Antropometri Sampel

	N	Minimum	Maximum	Mean
Usia	12	18	22	20.08

Tinggi Badan (cm)	12	164,5	183	174,4
Berat Badan (kg)	12	49,6	86	66,83
<i>Fat</i> (%)	12	5,5	24,8	13
BMI (Kg/m ²)	12	17,5	28,1	21,8

Hasil

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh peneliti dengan serangkaian tes yang diberikan kepada seluruh sampel yang berjumlah 12 atlet laki-laki. Berdasarkan data pada tabel 2, dapat dilihat bahwa ada perbedaan kadar asam laktat pada saat sebelum dan sesudah kelelahan dengan nilai sig, $0.00 < 0.05$. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kadar asam laktat mengalami peningkatan yang signifikan setelah perlakuan. Rata-rata kadar asam laktat sebelum perlakuan adalah 1.7 ± 0.3 mmol/L, sedangkan setelah perlakuan meningkat menjadi 9.1 ± 3.1 mmol/L. Perbedaan ini signifikan secara statistik dengan nilai ($p = 0.001$). hal ini menunjukkan bahwa perlakuan tersebut berdampak berhasil terhadap peningkatan kadar asam laktat dalam tubuh.

Tabel 2. Asam Laktat Sebelum Kelelahan dan Sesudah Kelelahan

Variabel	<i>Average Before</i> \pm SD	<i>Average After</i> \pm SD	Signifikansi (Perbedaan)
Asam Laktat (Mmol/L)	1.7 ± 0.3	9.1 ± 3.1	0.001*

Pada tabel, menunjukkan bahwa rata-rata sudut nilai *ankle* sebelum perlakuan adalah $74.79^\circ \pm 12.9^\circ$, meningkat menjadi $78.3^\circ \pm 13.6^\circ$ setelah perlakuan. Namun, perbedaan ini tidak signifikan secara statistik ($p = 0.634$). Pada variabel sudut *knee*, rata-rata sebelum perlakuan adalah $67.0 \pm 8.5^\circ$ dan menurun menjadi $64.2 \pm 6.5^\circ$, tetapi perubahan ini juga tidak signifikan ($p = 0,226$). Sementara itu, rata-rata nilai sudut *hip* sebelum perlakuan adalah $79.9^\circ \pm 12.5^\circ$ dan sedikit menurun menjadi $77.9^\circ \pm 12.4^\circ$, namun perbedaannya tidak signifikan secara statistik ($p = 0, 378$). Sebaliknya dengan *jump height* menunjukkan penurunan yang signifikan secara statistik, yaitu dari $29,6 \pm 7,8^\circ$ sebelum perlakuan menjadi $24.3^\circ \pm 7.1^\circ$ setelah perlakuan, dengan nilai ($p = 0.033$). secara keseluruhan, perubahan yang signifikan hanya terlihat pada variabel tinggi lompatan, sedangkan variabel lainnya tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan.

Tabel 3. Analisis Sudut Saat *Take Off*

No	Variabel	<i>Average Before</i> \pm SD	<i>Average After</i> \pm SD	Signifikansi (Perbedaan)
1	Sudut Fleksi <i>Ankle</i> ($^\circ$)	74.7 ± 12.9	78.3 ± 13.6	0.634
2	Sudut Fleksi <i>Knee</i> ($^\circ$)	67.0 ± 8.5	64.2 ± 6.5	0.226

3	Sudut Fleksi <i>Hip</i> (°)	79.9 ± 12.5	77.9 ± 12.4	0.378
4	<i>Jump Height</i> (cm)	29.6 ± 7.8	24.3 ± 7.1	0.033*

Pada tabel, hasil menunjukkan bahwa tidak ada hubungan yang signifikan antara CG dan GRF, baik sebelum kelelahan maupun setelah kelelahan. nilai korelasi $r = 0,139$ menunjukkan hubungan yang sangat lemah, dan dengan nilai signifikansi $p = 0,666$. Begitu pula pada saat *take off* setelah kelelahan, nilai korelasi $r = -0,153$ menunjukkan arah hubungan yang sangat lemah dan negatif, sementara nilai signifikansi $p = 0,636$ menunjukkan bahwa hubungan ini juga tidak signifikan. Pada kondisi landing sebelum kelelahan, meskipun nilai korelasi sebesar $r = 0,197$ menunjukkan hubungan positif yang sangat lemah, nilai signifikansi $p = 0,540$ menunjukkan bahwa hubungan ini tidak signifikan. Demikian juga, pada landing setelah kelelahan, nilai korelasi $r = -0,042$ hampir menunjukkan tidak adanya hubungan, dan dengan nilai signifikansi $p = 0,897$, hubungan ini juga tidak signifikan secara statistik.

Tabel 4. Hubungan Antara CG, GRF Take Off dan Landing

Variable	Kondisi	Nilai Korelasi (r)	Signifikansi (p)	Interpretasi (Hubungan)
<i>Take Off</i>	Sebelum Kelelahan	0,139	0,666	Hubungan Sangat Lemah, Tidak Signitifikan
	Setelah Kelelahan	-0,153	0,636	Hubungan Sangat Lemah, Tidak Signitifikan
<i>Landing</i>	Sebelum Kelelahan	0,197	0,540	Hubungan Sangat Lemah, Tidak Signitifikan
	Setelah Kelelahan	-0,042	0,897	Hubungan Sangat Lemah, Tidak Signitifikan

Pembahasan

Hasil dari penelitian yang dilakukan terhadap 12 orang atlet laki-laki UKM Bola Voli UPI Bandung, dalam *take of jump spike* pada saat sebelum dan sesudah kelelahan dalam parameter yang dianalisis ialah sudut *ankle*, sudut *knee*, sudut *hip*, *jump height*, pusat gravitasi tubuh (CG) dan gaya reaksi tanah (GRF). Dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan pada kadar asam laktat sebelum dan sesudah kelelahan (Tabel 2). Hal ini disebabkan oleh aktivitas anaerobik yang dapat memicu peningkatan kadar asam laktat (Rusdiawan & Habibi, 2019). Peningkatan kadar asam laktat direspons oleh tubuh dengan mengeluarkan asam laktat yang ada di otot untuk digunakan oleh organ yang lain sebagai upaya untuk mereduksi tingginya kadar asam laktat di otot (Fitrianto & Maarif, 2020). Latihan fisik dapat memicu berbagai respons tubuh, seperti adaptasi kardiovaskular, respon imun, serta kelelahan dan nyeri otot. Kelelahan ini, salah satunya, disebabkan oleh akumulasi asam laktat di otot (Mighra & Djaali, 2021). Hal

ini menekankan perlunya kemampuan tubuh dalam mengelola kelelahan dan beradaptasi secara fisiologis untuk menjaga performa atlet tetap optimal.

Sementara itu, pada variabel sudut biomekanika seperti *ankle*, *knee*, dan *hip* pada fase *take off*, tidak ditemukan perbedaan yang signifikan setelah perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa kelelahan tidak berdampak besar terhadap perubahan sudut tubuh ekstremitas bawah pada fase *take off*. Selain itu, variasi individu, seperti kondisi fisik, tingkat pelatihan, dan kontrol motorik, turut memengaruhi hasil. Di sisi lain, atlet terlatih cenderung memiliki toleransi kelelahan yang lebih tinggi sehingga mampu mempertahankan pola biomekanika yang stabil. Hal ini serupa dengan hasil penelitian (Lin et al., 2021) Selama lompatan spike, meskipun otot *rektus abdominis* kelelahan, tidak ditemukan perbedaan signifikan pada sudut sendi lainnya. Begitu pula, tidak ada perubahan signifikan pada sudut touchdown sendi sebelum dan setelah kelelahan otot RA pada salah satu lompatan. Namun, pada variabel *jump height* ini menandakan bahwa kelelahan mempengaruhi kinerja atlet dalam lompat *vertical*, yang merupakan indikator penting dalam olahraga bola voli. Penelitian sebelumnya mengindikasikan bahwa ketika atlet mulai melakukan lepas landas dalam kondisi kelelahan, energi potensial gravitasi yang dihasilkan berkurang, sehingga mereka tidak dapat mencapai ketinggian lompatan secara maksimal (Struzik & Zawadzki, 2019). Selain berkurangnya energi potensial gravitasi, kelelahan juga mengurangi efisiensi kontraksi otot dan koordinasi *neuromuskular*, yang menyebabkan penurunan kekuatan saat *take-off*.

Selanjutnya, analisis hubungan atau korelasi antara pusat gravitasi tubuh (CG) dan gaya reaksi tanah (GRF) pada fase *take off* dan landing menunjukkan bahwa korelasi negatif berarti bahwa saat posisi CG meningkat, GRF cenderung menurun, sementara korelasi positif menunjukkan bahwa peningkatan posisi CG berhubungan dengan peningkatan GRF. Namun, tidak ada hubungan yang signifikan antara keduanya, baik sebelum kelelahan maupun setelah kelelahan. Nilai korelasi yang sangat lemah dan tidak signifikan, mengindikasikan bahwa kelelahan tidak berpengaruh pada perubahan posisi pusat gravitasi tubuh (CG) dan gaya reaksi tanah (GRF) selama fase *take off* dan fase *landing*. Faktor neuromuskular juga dapat memengaruhi cara individu menghasilkan dan mengelola gaya selama fase *take-off* dan *landing*. Hal ini dapat menjadi alasan mengapa hubungan antara posisi CG dan besaran GRF tidak begitu kuat dalam kedua fase tersebut. Selain itu, variasi teknik yang digunakan saat melompat atau mendarat dapat memengaruhi pola distribusi GRF. Hal ini mungkin dipengaruhi oleh hubungan yang kompleks antara berbagai faktor, seperti perbedaan teknik pendaratan dan pengendalian neuromuskular (Finnasih et al., 2024).

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa kelelahan memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kadar asam laktat dalam tubuh, yang dapat mempengaruhi kinerja fisik, terutama dalam *jump height*. Namun, kelelahan tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap aspek biomekanika lainnya, seperti sudut tubuh dan hubungan antara CG dan GRF. Hasil ini memberikan gambaran penting bagi program pelatihan dan pemulihan atlet, terutama dalam mengelola kelelahan untuk menjaga performa optimal dalam olahraga bola voli.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa kelelahan berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kadar asam laktat dalam tubuh atlet, yang dapat mempengaruhi kinerja fisik, terutama dalam *jump height*. Meskipun terjadi peningkatan pada beberapa variabel biomekanika seperti sudut *ankle, knee, dan hip*, perubahan tersebut tidak signifikan secara statistik. Selain itu, tidak ditemukan hubungan yang signifikan antara pusat gravitasi tubuh (CG) dan gaya reaksi tanah (GRF) pada fase *take off* dan *landing*, baik sebelum kesalahan maupun setelah kelelahan. Hasil ini menyarankan perlunya perhatian pada pengelolaan kelelahan dalam program latihan, agar dapat mempertahankan kinerja optimal dan meminimalkan risiko penurunan performa yang disebabkan oleh akumulasi asam laktat.

Referensi

- Agopyan, A., Ozbar, N., & Ozdemir, S. N. (2018). Effects of 8-Week Thera-Band Training on Spike Speed, Jump Height and Speed of Upper Limb Performance of Young Female Volleyball Players. *International Journal of Applied Exercise Physiology*, 7(1), 63–76. <https://doi.org/10.22631/ijaep.v7i1.218>
- Ardiansyah, R. T., Setiawan, D., & Farhanto, G. (2024). Analisis Biomekanika Jarak Langkah Take off Pada Lompat Jauh. *Jurnal Olahraga dan Kesehatan Indonesia (JOKI)*, 4(2), 171-177. <https://doi.org/10.55081/joki.v4i2.2855>
- Bujang, Rusdiana, A., & Samsudin. (2022). Three-Dimensional Kinematical Analysis of Jump Serve In Volleyball: Muscle Fatigue Effects. *Annals of Applied Sport Science*, 10(3). <https://doi.org/10.52547/aassjournal.1034>
- Duhe, E. D. P., & Haryanto, A. I. (2021). Persepsi Kinestetik, Koordinasi Mata Tangan dan Motivasi terhadap Jump Smash. *Sporta Saintika*, 6(1), 1-18. <https://doi.org/10.24036/sporta.v6i1.156>
- Edison Putra, M., Kurniawan, F., Resmi Ningrum, N. (2023). Analisis Mekanika Gerak Fase Mendarat Teknik Open Smash Bola Voli Mechanical Analysis of Landing Phase in Open Smash Technique of Volleyball. *Jambura Health and Sport Journal*, 5(2). <https://doi.org/10.37311/jhsj.v5i2.18961>
- Erfandy, A. E. (2020). Analisis Kadar Asam Laktat Atlet Putri UKM Bola Basket Universitas Muhammadiyah Cirebon. *Sains Olahraga: Jurnal Ilmiah Ilmu Keolahragaan*. <http://jurnal.unimed.ac.id/2012/index.php/so>
- Farihandiandra, Y., Gumilar, A., Subroto, T., & Negara, J. D. K. (2024). Analysis of the effectiveness of the Open Spike movement in Volleyball, viewed from the biomechanical aspect. *Jambura Sports Coaching Academic Journal*, 3(1), 20-28. <https://doi.org/10.37905/jscaj.v3i1.23658>
- Finnasih, Rusdiana, A., Ikhwan Hidayat, I., Kurniawan, T., & Haryono, T. (2025). The Effect of Leg Muscle Fatigue on Landing Biomechanics in Volleyball Athletes. *Jurnal Muara Olahraga*, 7(1), 81–92. <https://doi.org/10.52060/jmo.v7i1.2668>
- Fitrianto, E. J., & Maarif, S. (2020). Pengaruh Active Recovery Terhadap Kadar Asam Laktat Pada Mahasiswa Program Studi Ilmu Keolahragaan Universitas Negeri Jakarta. In *Jurnal Ilmiah Sport Coaching and Education* (Vol. 4). <https://doi.org/10.21009/JSCE.04105>

- Garcia, S., Delattre, N., Berton, E., Divrechy, G., & Rao, G. (2022). Comparison of landing kinematics and kinetics between experienced and novice volleyball players during block and spike jumps. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s13102-022-00496-0>
- Heldayana, H., Supriyatna, A., & Imanudin, I. (2016). Hubungan antara power otot lengan dan otot tungkai dengan hasil spike semi pada cabang olahraga bola voli. *JTIKOR (Jurnal Terapan Ilmu Keolahragaan)*, 1(1), 45-49. <https://doi.org/10.17509/jtikor.v1i1.1553>
- Hidayatullah, A. F., & Wahyudi, A. (2023). Analisis Keterampilan Gerak Spike Bola Voli Pemain Junior di Sekolah Bolavoli PERVOPA Patemon Tahun 2022. *Indonesian Journal for Physical Education and Sport*, 4(2), 646-652. <https://doi.org/10.15294/inapes.v4i2.56280>
- Lin, H. T., Huang, Y. C., Li, Y. Y., & Chang, J. H. (2021). The effect of rectus abdominis fatigue on lower limb jumping performance and landing load for volleyball players. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(15). <https://doi.org/10.3390/app11156697>
- Mighra, B. A., & Djaali, W. (2021). Pengaruh RAST (Running-Based Anaerobic Sprint Test) terhadap Denyut Jantung dan Kadar Asam Laktat pada Atlet Futsal FIK UNJ. *Jurnal Ilmiah Kesehatan*, 13(1), 113-119. <https://doi.org/10.37012/jik.v13i1.530>
- Pulungan, K. A., Perdana, S., Haryanto, A. I., Haryani, M., & Kadir, S. S. (2023). The psychological skill characteristics of Indonesian volleyball players from player positions. *Jurnal Keolahragaan*, 11(1), 122-130. <http://dx.doi.org/10.21831/jk.v11i1.54931>
- Rusdiana, A., Hidayat, I. I., Kurniawan, T., & Haryono, T. (2024). The Effect of Leg Muscle Fatigue on Landing Biomechanics in Volleyball Athletes. *Jurnal Muara Olahraga*, 7(1), 81-92. <https://doi.org/10.52060/jmo.v7i1.2668>
- RusdiawanA., & HabibiA. I. (2019). Perbedaan Kadar Asam Laktat Dan Tingkat Kelelahan Anaerobic Setelah Diberikan Jus Semangka Kuning Dan Aktivitas Anaerobik. *Prosiding Seminar Nasional IPTEK Olahraga (SENALOG)*, 2(1), Kepelatihan-Or 31. Retrieved from <https://ejournal.unibabwi.ac.id/index.php/semnassenalog/article/view/581>
- Santoso, D. A. S., & Irwanto, E. (2018). Studi Analisis Biomechanics Langkah Awalan (Footwork Step) Open Spike Dalam Bola Voli Terhadap Power Otot Tungkai. *Jorpres (Jurnal Olahraga Prestasi)*, 14(1), 81-89. <http://dx.doi.org/10.21831/jorpres.v14i1.19985>
- Septian, G., Rusdiana, A., Imanudin, I., Badruzaman, B., Hidayat, I. I., Hardwis, S., ... & Syahid, A. M. (2024). Pengaruh Kelelahan Otot Lower Body Terhadap Parameter Kinematika Teknik Tendangan Roundhouse Pada Olahraga Muaythai. *Jumper: Jurnal Mahasiswa Pendidikan Olahraga*, 5(1), 371-382. <https://doi.org/10.55081/jumper.v5i1.2835>
- Struzik, A., & Zawadzki, J. (2019). Estimation of potential elastic energy during the countermovement phase of a vertical jump based on the force-displacement curve. *Acta of bioengineering and biomechanics*, 21(1), 153-160.
- Syafei, M., Budi, D. R., Suhartoyo, T., & Nurcahyo, P. J. (2021). Plyometric Double Leg Tuck Jump: Pengaruhnya Terhadap Power Otot Tungkai Atlet Bola Voli. *SPRINTER: Jurnal Ilmu Olahraga*, 2(1), 112-119. <https://doi.org/10.46838/spr.v2i1.92>
- Yasinta, C. Y., Lengkana, A. S., & Sudrazat, A. (2024). Pengaruh Penggunaan Media Karet Dalam Meningkatkan Power Otot Tungkai Pada Permainan Bola Voli. *Journal of SPORT (Sport, Physical Education, Organization, Recreation, and Training)*, 8(2), 606-619. <https://doi.org/10.37058/sport.v8i2.10427>