|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | JPJO 9 (2) (2024)**Jurnal Pendidikan Jasmani dan Olahraga**http://ejournal.upi.edu/index.php/penjas/index |  |
| **Pengaruh kelelahan terhadap perubahan variabel biomekanika pada teknik *batting* *softball*****Tono Haryono, Agus Rusdiana, Angga M Syahid, Iwa Ikhwan Hidayat, Tian Kurniawan, Didin Budiman, M Naufal Abdurahman**Sport Science Program Study, Faculty of Sport and Health Education, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia |
| **Info Artikel**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*Article History :**Received July 2019**Revised August 2019**Accepted August 2019**Available online September 2019* \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*Keywords:**Keywords1, keywords2, & keywords3* | **Abstrak**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**Latar Belakang**: *Softball* merupakan olahraga yang memerlukan koordinasi yang baik antara aspek fisik dan teknik. Kelelahan anaerobik dapat menjadi faktor yang mempengaruhi eksekusi teknik *batting* *softball*. Namun, pemahaman mendalam tentang dampak kelelahan anaerobik terhadap variabel biomekanika dalam konteks teknik *batting* masih kurang dieksplorasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis pengaruh kelelahan anaerobik terhadap perubahan variabel biomekanika pada teknik *batting* *softball*. Tujuan: **Tujuan**: Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi bagaimana kelelahan anaerobik memengaruhi variabel biomekanika kunci dalam teknik *batting* *softball*. Informasi ini diharapkan dapat memberikan wawasan tambahan terkait pentingnya kebugaran anaerobik dalam meningkatkan performa atlet *softball*. **Metode**: Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan melibatkan pemain *softball* berpengalaman sebagai subjek. Kelelahan anaerobik diinduksi melalui protokol latihan intensitas tinggi. Selama dan setelah latihan, variabel biomekanika seperti kecepatan ayunan *bat*, sudut ayunan, dan presisi dalam memukul bola diukur dan direkam. Data dianalisis menggunakan metode statistik untuk mengidentifikasi perubahan yang signifikan. **Hasil**: Penelitian menunjukkan bahwa kelelahan anaerobik memiliki pengaruh signifikan terhadap variabel biomekanika kunci dalam teknik *batting* *softball*. Terjadi penurunan yang signifikan dalam kecepatan ayunan bat dan presisi pukulan setelah kelelahan anaerobik. Rata-rata kecepatan ayunan sebelum kelelahan adalah 3,60 m/s, yang menurun menjadi 2,14 m/s setelah kelelahan. Selain itu, sudut ayunan dan presisi pukulan juga menunjukkan perubahan yang signifikan, dengan sudut lutut kiri yang lebih rendah mendekati permukaan pada kelompok sebelum lelah. **Kesimpulan**: Penelitian ini menemukan bukti empiris yang mendukung pengaruh kelelahan anaerobik terhadap variabel biomekanika dalam teknik *batting* *softball*. Hasil ini memberikan kontribusi penting terhadap pemahaman umum tentang hubungan antara kelelahan **anaerobik** dan kinerja teknik dalam olahraga *softball*. Implikasinya, pelatihan dan persiapan atlet perlu memperhatikan aspek kebugaran anaerobik untuk mempertahankan performa optimal selama pertandingan. |
|  Corresponding address : \*Corresponding email :  | ISSN 2580-071X (online)ISSN 2085-6180 (print) |

**INTRODUCTION**

*Softball* merupakan olahraga yang menuntut keterampilan teknis dan koordinasi yang tinggi antara pemain dan alat permainannya (M. & M., 2020). Dalam konteks teknik *batting* *softball*, faktor biomekanika memainkan peran sentral dalam keberhasilan setiap pukulan (Flyger et al., 2006). Pemahaman mendalam tentang variabel biomekanika kunci, seperti kecepatan ayunan bat dan sudut pukulan, menjadi krusial untuk meningkatkan performa pemain *softball* (Milanovich & Nesbit, 2014). Namun, belum banyak penelitian yang mendalami pengaruh kelelahan anaerobik pada aspek biomekanika dalam teknik *batting* *softball*. Oleh karena itu, penting untuk menyelidiki sejauh mana kelelahan anaerobik dapat memengaruhi perubahan dalam variabel biomekanika tersebut. Penelitian ini bertujuan memberikan dasar pengetahuan yang lebih kuat bagi pelatihan dan persiapan atlet *softball*.

 Kelelahan anaerobik, yang berhubungan dengan kapasitas tubuh untuk melakukan aktivitas intensitas tinggi dalam waktu singkat, memiliki dampak signifikan pada performa atlet (Bateni et al., 2013). Dalam softball, di mana pemain membutuhkan ledakan energi dalam waktu singkat, kelelahan anaerobik dapat menjadi faktor kunci yang mempengaruhi performa keseluruhan (Río-Rodríguez et al., 2016). Meskipun banyak penelitian yang mengkaji efek kelelahan anaerobik dalam berbagai olahraga, belum banyak yang fokus pada hubungan kelelahan anaerobik dengan biomekanika teknik batting dalam softball. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan pengetahuan ini dengan fokus pada hubungan antara kelelahan anaerobik dan perubahan variabel biomekanika kunci dalam teknik batting.

 Kelelahan anaerobik terjadi ketika otot-otot tidak lagi mampu menghasilkan energi yang cukup dalam waktu singkat, yang seringkali disebabkan oleh penumpukan asam laktat dan penurunan kapasitas otot untuk bekerja pada intensitas tinggi. Dalam olahraga seperti softball, yang melibatkan aktivitas fisik dengan intensitas tinggi dan durasi singkat seperti sprinting, memukul, dan melempar, kelelahan anaerobik dapat dengan cepat mempengaruhi performa pemain. Ketika otot mengalami kelelahan ini, perubahan dalam pola gerakan dan biomekanika akan tampak, terutama dalam teknik pukulan, di mana ketepatan dan kecepatan ayunan sangat tergantung pada kekuatan otot dan stabilitas tubuh.

Dalam olahraga *softball*, teknik *batting* menjadi unsur kritis yang mempengaruhi performa pemain (Mohammad, 2023; Saraya, 2018). Variabel biomekanika, seperti kecepatan ayunan bat dan sudut pukulan, memiliki peran penting dalam menentukan kualitas pukulan seorang pemain *softball* (Horiuchi & Nakashima, 2022). Meskipun telah banyak penelitian yang mengeksplorasi faktor-faktor tersebut, pemahaman lebih mendalam masih dibutuhkan terkait bagaimana perubahan dalam variabel biomekanika dapat mempengaruhi teknik batting secara keseluruhan. Dalam konteks ini, mengeksplorasi dampak kelelahan anaerobik terhadap biomekanika sangat penting untuk meningkatkan kinerja atlet. Studi ini diharapkan memberikan wawasan yang lebih kaya terkait dinamika biomekanika softball dan mengidentifikasi celah pengetahuan yang belum banyak dijelajahi.

 Penelitian sebelumnya telah membahas berbagai aspek teknik batting softball, tetapi ada kekurangan pengetahuan terkait interaksi antara kelelahan anaerobik dan perubahan biomekanika dalam teknik tersebut. Banyak studi lebih fokus pada variabel individu, seperti kecepatan ayunan bat atau sudut pukulan, tanpa mempertimbangkan dampak kelelahan anaerobik sebagai variabel utama (Dowling & Fleisig, 2016; Horiuchi & Nakashima, 2022; Messier & Owen, 1984; Tago et al., 2005, 2006; Washington & Oliver, 2018; Werner et al., 2005) Kesenjangan penelitian ini menimbulkan kebutuhan untuk mengeksplorasi lebih lanjut bagaimana kelelahan anaerobik memengaruhi biomekanika kunci dalam teknik batting softball.

Temuan yang dihasilkan dari penelitian ini memiliki implikasi praktis yang signifikan bagi pelatih dan atlet softball. Dengan memahami bagaimana kelelahan anaerobik mempengaruhi biomekanika teknik batting, pelatih dapat mengembangkan program pelatihan yang lebih spesifik dan terfokus pada pengelolaan kelelahan. Misalnya, pelatihan yang mencakup latihan kekuatan dan conditioning untuk meningkatkan toleransi tubuh terhadap aktivitas anaerobik dapat membantu menjaga stabilitas teknik pukulan meskipun dalam kondisi kelelahan. Selain itu, pemahaman ini juga dapat membantu dalam pengaturan strategi permainan, seperti penggantian pemain atau pengelolaan istirahat yang lebih baik

Penelitian terdahulu belum secara eksplisit mengevaluasi interaksi kompleks antara kelelahan anaerobik dan variabel biomekanika, yang dapat mengurangi pemahaman menyeluruh tentang bagaimana kelelahan memodifikasi eksekusi teknik. Oleh karena itu, penelitian ini mencoba melengkapi dan memperluas pemahaman tersebut dengan mendetailkan dampak kelelahan anaerobik pada variabel biomekanika kunci, menciptakan wawasan yang lebih holistik dalam meningkatkan kualitas pukulan pemain *softball*. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kualitas teknik pukulan pemain softball serta memberikan dasar bagi pengembangan strategi pelatihan yang lebih efektif.

## METHODS

**Participants.** Partisipan dalam penelitian ini terdiri dari 15 pemain *softball* yang dipilih secara *purposive* dari klub Bumi Asri. Pemilihan dilakukan dengan memfokuskan pada pemain spesialis *batting* atau batter, yang memiliki pengalaman dan keterampilan khusus dalam teknik pukulan *softball*. Para peserta memiliki usia rata-rata 20 ± 0.6 tahun, menciptakan kelompok yang relatif homogen dalam aspek usia. Selain itu, tinggi badan para partisipan berkisar antara 1.71 ± 1,2 meter, dan berat badan rata-rata adalah 59 ± 3.7 kilogram. Pemilihan sampel yang cermat ini diharapkan dapat memberikan data yang representatif dan relevan untuk menggambarkan pengaruh kelelahan anaerobik terhadap perubahan biomekanika dalam teknik *batting* *softball*.

  **Instruments.** Penelitian ini menggunakan tiga kamera aksi berkecepatan tinggi (GoPro Hero 11, USA), 14 penanda manual, seperangkat kalibrasi tiga dimensi, perangkat lunak analisis gerak (Kinovea, Spanyol), analisis gas langsung dengan menggunakan gas analisis (COSMED Fitmate Pro, Italia), sensor detak jantung (Polar H10, Finlandia), dan alat radar kecepatan (Bushnell 101922, Jerman). Alat-alat tersebut dipilih untuk mendukung pengumpulan data yang teliti dan terinci terkait variabel biomekanika serta parameter kelelahan anaerobik yang menjadi fokus utama penelitian ini.

 **Procedures.** Kamera 1 ditempatkan secara tegak lurus di area subjek bagian atas dengan jarak 5 meter untuk merekam pergerakan sendi bahu dan pinggul selama pukulan *softball*. Kamera 2 ditempatkan di sisi kanan area subjek. Pada saat yang sama, yang ketiga ditempatkan secara tegak lurus di belakang untuk mendapatkan gambaran komprehensif dari seluruh pergerakan sendi tubuh bagian atas. Para partisipan diinstruksikan untuk melakukan pemanasan selama 15 menit. Setelah periode istirahat selama 3 menit, mereka diminta untuk melakukan pukulan bola secepat mungkin dengan melompat. Kecepatan bola diukur menggunakan radar Bushnell 101922, diproduksi di Jerman. Nilai rata-rata dari enam pukulan juga dihitung, dan kecepatan bola diukur dalam km/jam. Selain itu, semua subjek dipasang dengan sistem pemantauan detak jantung Polar H10, dan diminta untuk melakukan uji kelelahan anaerobik yang menargetkan tubuh bagian atas. Sesi pemanasan dimulai dengan melakukan push-up eksplosif selama 1 menit, diikuti dengan latihan repetitif menggunakan medicine ball seberat 5 kg. Latihan ini melibatkan lemparan overhead dan chest pass berulang-ulang selama 2 menit dengan intensitas maksimal. Setiap interval berlangsung selama 30 detik, diikuti dengan istirahat 10 detik. Uji berakhir ketika subjek tidak lagi dapat mempertahankan intensitas maksimal. Selanjutnya, semua subjek diminta untuk terus-menerus dan dengan cepat melakukan batting softball 6 kali untuk menentukan nilai kecepatan rata-rata dalam km/jam.

 **Analisis Statistik.** Data dianalisis menggunakan program SPSS versi 21.0 untuk Windows dengan melakukan statistik deskriptif untuk menentukan mean ± SD. Uji t sampel berpasangan diterapkan untuk mengidentifikasi perbedaan antara kondisi sebelum kelelahan dan kondisi kelelahan dalam hal kecepatan maksimal bola selama *batting softball* pada tingkat kepercayaan 95%. Data posisi-waktu difilter dengan filter low-pass Butterworth orde keempat dengan frekuensi potong sebesar 13,5 Hz.

**Parameter Kinematika.** Parameter ini digunakan untuk menentukan karakteristik mekanisme *batting softball*, model yang relevan dengan prinsip anatomi gerak. Parameter yang dipilih untuk menggambarkan gerakan pukulan *softball* selanjutnya didasarkan pada data biomekanika. Kinematika dan kinetika dihitung menggunakan informasi dua dimensi yang dihasilkan selama uji. Penanda reflektif (marker) yang menentukan kinematika umum, termasuk perpindahan dan kecepatan untuk pengukuran linear. Parameter ini digunakan untuk menentukan karakteristik mekanisme *batting* *softball*, model yang relevan dengan prinsip anatomi gerakan.

## RESULT

Penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan data melalui video pada keterampilan teknik *batting* dalam *softball*. Selanjutnya, hasil pengumpulan data dianalisis menggunakan pendekatan statistik, yaitu melalui perangkat lunak IBM SPSS v.26. Hasil yang dianalisis adalah data yang diperoleh dari sampel yang merupakan pemain unit kegiatan mahasiswa *softball* UPI dan pemain nasional *softball* Indonesia.

Antropometri Sebelum pengumpulan data, sampel diukur secara individual terlebih dahulu. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini:

Tabel 1. Antropometri

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| No | Item | Rata-rata | Stdev |
| 1 | Usia (tahun) | 20 | 0.60 |
| 2 | Tinggi Badan (cm) | 171 | 1.62 |
| 3 | Berat Badan (kg) | 59 | 3.70 |
| 4 | BMI (kg/m²) | 22 | 1.45 |
| 5 | V02max (ml/kg/min) | 50 | 2.12 |

Pada tabel di atas, terlihat bahwa terdapat 5 item yang membentuk *subtest*. Dengan hasil rata-rata usia 20 tahun, tinggi badan 171 cm, berat badan 59 kg, BMI (indeks massa tubuh) 22 kg/m2, dan VO2 Max 50 ml/kg/min, sangat penting untuk memenuhi standar kapasitas aerobik karena *softball* membutuhkan VO2 maksimal dari pemainnya karena keterlibatan dalam permainan dengan intensitas tinggi yang besar (Artikel et al., 2016). Logis bahwa VO2 Max berkorelasi karena pemain dengan kapasitas aerobik yang lebih tinggi akan mampu tampil lebih dekat dengan upaya maksimal mereka (Girard et al., 2015), sehingga pemain yang memiliki tingkat kapasitas aerobik yang baik, di sini terlihat melalui peningkatan VO2 Max, memiliki kemampuan yang lebih baik dalam melakukan *batting* dalam permainan *softball* karena kemampuan ini dilakukan berulang kali dalam permainan. Terdapat hubungan antara kekuatan otot lengan yang lebih besar yang mempengaruhi akurasi pukulan dan teknik *batting* yang lebih akurat (Septianingrum et al., 2018), serta kekuatan genggaman dan akurasi pukulan yang saling mempengaruhi.

Deskripsi data dari hasil rekapitulasi selama fase pendekatan hingga fase kontak disajikan dalam bentuk tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2. Fase Pendekatan – Kontak

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| No | Variabel | Sebelum Lelah | Setelah Lelah |
|  |  | Rata-rata | Stdev | Rata-rata | Stdev |
| 1 | Waktu Pendekatan (Detik) | 1.13 | 0.28 | 1.24 | 0.45 |
| 2 | Jarak Total Pendekatan (cm) | 54.04 | 2.45 | 38.88 | 3.48 |
| 3 | Waktu Kontak Tongkat dengan Bola (Detik) | 0.71 | 0.07 | 0.53 | 0.26 |

Jarak total pendekatan mempengaruhi koefisien hasil akhir *batting* karena salah satu penentu keberhasilan *batting* adalah posisi awal *batting*. Pada nilai rata-rata kelompok sebelum lelah, ditemukan skor 54.04 cm lebih tinggi dibandingkan 38.88 cm pada kelompok setelah lelah. Hasil ini menunjukkan nilai rata-rata yang signifikan antara kedua kelompok yang mempengaruhi kecepatan akhir bola saat diluncurkan dari tongkat pada fase akhir *batting*.

Deskripsi data dari akurasi setiap langkah *batting* dan fase lanjutan disajikan dalam bentuk Tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 3. Fase *Batting* – Follow Through

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| No | Variabel | Sebelum Lelah | Setelah Lelah |
|  |  | Rata-rata | Stdev | Rata-rata | Stdev |
| 1 | Kecepatan *Batting* (m/det) | 3.60 | 0.45 | 2.14 | 0.75 |
| 2 | Sudut Lutut Kiri (derajat) | 45.47 | 1.96 | 49.14 | 2.72 |
| 3 | Kecepatan Tongkat (m/det) | 18.18 | 2.30 | 12.21 | 21.11 |
| 4 | Total Waktu *Batting* (detik) | 1.99 | 0.24 | 1.90 | 0.29 |

**Tabel 3 menunjukkan bahwa pemain sebelum lelah memiliki kecepatan *batting* yang lebih tinggi, sudut lutut kiri yang lebih optimal, kecepatan tongkat yang lebih cepat, dan waktu pelepasan bola yang lebih singkat dibandingkan dengan pemain setelah lelah, menunjukkan teknik dan fisik yang lebih unggul dalam fase *batting* hingga *follow* *through*.**

## DISCUSSION

Panjang *batting* memiliki hubungan langsung dengan kecepatan bola yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, kelompok sebelum mengalami kelelahan menunjukkan rata-rata panjang *batting* sebesar 307.60 cm, yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kelompok setelah lelah yang hanya mencapai rata-rata 130.81 cm. Selain itu, waktu pelepasan bola akhir juga menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kelompok sebelum dan setelah kelelahan, di mana kelompok sebelum lelah memiliki rata-rata waktu pelepasan sebesar 0.36 detik, sementara kelompok setelah lelah memiliki rata-rata waktu pelepasan sebesar 0.67 detik. Kecepatan tongkat yang tinggi berperan penting dalam menghasilkan momentum dan gaya yang lebih besar, yang keduanya terkait langsung dengan kecepatan bola yang dihasilkan saat *batting* (Bartlett, 2007). Dalam konteks ini, sudut lutut kiri yang lebih rendah pada kelompok sebelum lelah menunjukkan postur tubuh yang lebih optimal dan stabilitas yang lebih baik selama pukulan. Stabilitas dan postur tubuh yang baik memungkinkan transfer energi yang lebih efisien dari tubuh ke bola, yang pada akhirnya meningkatkan kecepatan bola. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan dari penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa kelelahan otot dapat mempengaruhi mekanika tubuh dan kinerja atletik, seperti yang ditunjukkan oleh (Nissen et al., 2009) bahwa kelelahan otot dapat menyebabkan perubahan dalam kinematika tubuh, berdampak pada efisiensi gerakan dan kekuatan yang dihasilkan. Oleh karena itu, penting bagi atlet untuk menjaga kebugaran anaerobik dan kekuatan otot untuk mempertahankan performa optimal, terutama dalam olahraga yang membutuhkan kombinasi kekuatan, kecepatan, dan koordinasi yang baik seperti *softball*.

Kinerja teknik *batting* dalam *softball* sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik dan teknik atlet. Penurunan kinerja *batting* setelah kelelahan menunjukkan betapa pentingnya kondisi fisik dalam mempertahankan teknik yang optimal selama permainan. Studi menunjukkan bahwa kelelahan dapat mempengaruhi mekanika tubuh, yang pada gilirannya mempengaruhi kecepatan dan akurasi pukulan (Oliver et al., 2019) Ketika seorang atlet kelelahan, mereka cenderung mengalami penurunan stabilitas inti dan kontrol motorik, yang dapat menyebabkan perubahan yang tidak diinginkan dalam teknik pukulan mereka (Escamilla et al., 1998). Kelelahan anaerobik, khususnya, dapat menyebabkan perubahan dalam postur tubuh dan distribusi beban, mengurangi efektivitas transfer energi dari tubuh ke *bat*.. Hal ini mengakibatkan penurunan kecepatan bat dan presisi pukulan, seperti yang terlihat pada hasil penelitian ini di mana kelompok sebelum lelah menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan kelompok setelah lelah. Lebih lanjut, sudut lutut kiri yang lebih rendah mendekati permukaan pada kelompok sebelum lelah menunjukkan bahwa atlet yang tidak kelelahan mampu mempertahankan postur optimal yang mendukung stabilitas dan kekuatan pukulan. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Zult et al., 2014), yang mengungkapkan bahwa kelelahan otot dapat mengurangi stabilitas sendi dan kinerja atletik. Oleh karena itu, untuk meningkatkan dan mempertahankan kinerja batting, atlet perlu fokus pada latihan yang meningkatkan daya tahan anaerobik dan kekuatan otot inti, serta strategi pemulihan yang efektif untuk mengurangi dampak negatif kelelahan.

Selain itu, penurunan sudut lutut kiri yang lebih rendah mendekati permukaan sebelum lelah dibandingkan setelah lelah menunjukkan bahwa atlet memiliki kontrol yang lebih baik terhadap postur dan mekanika tubuh mereka sebelum kelelahan terjadi. Ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa sudut sendi yang optimal dapat mempengaruhi hasil akhir dari pukulan, di mana sudut lutut yang lebih optimal memungkinkan transfer energi yang lebih efisien dari tubuh ke bola (Inoue et al., 2013). Sudut lutut yang optimal membantu atlet dalam menjaga stabilitas dan kekuatan selama pukulan, memaksimalkan momentum dan gaya yang diteruskan ke bola. Ketika atlet tidak dalam kondisi lelah, mereka mampu mempertahankan sudut lutut yang mendukung postur tubuh yang ideal, memungkinkan mereka untuk melakukan pukulan dengan kekuatan dan akurasi yang lebih tinggi. Kelelahan, di sisi lain, menyebabkan perubahan mekanika tubuh yang tidak diinginkan, termasuk peningkatan sudut lutut yang mengarah pada postur tubuh yang kurang stabil dan efisien. Melalui latihan yang tepat, atlet dapat dilatih untuk mempertahankan sudut sendi yang optimal bahkan dalam kondisi kelelahan, sehingga kinerja mereka dapat tetap optimal sepanjang pertandingan.

Dalam konteks ini, latihan fisik yang fokus pada peningkatan daya tahan otot dan stabilitas inti bisa menjadi sangat penting untuk mempertahankan performa optimal sepanjang permainan. Program latihan yang mencakup penguatan otot inti dan latihan stabilitas dapat membantu atlet mempertahankan teknik *batting* yang optimal meskipun dalam kondisi kelelahan (szymanski et al., 2007). Selain itu, pemantauan dan manajemen beban kerja serta strategi pemulihan yang efektif juga memainkan peran penting dalam menjaga kinerja atletik selama musim kompetisi yang panjang.

## CONCLUSION

Penelitian ini menyoroti pentingnya menyesuaikan faktor-faktor kinerja *batting* berdasarkan variabel biomekanika untuk meningkatkan performa secara keseluruhan. Penelitian ini menemukan pengaruh signifikan terhadap kecepatan akhir bola saat *batting*. Berdasarkan analisis data antara kelompok sebelum lelah dan setelah lelah dalam fase pendekatan hingga kontak pada variabel jarak total pendekatan yang mempengaruhi koefisien hasil akhir *batting*, terdapat perbedaan signifikan sebesar 54.04 cm oleh kelompok sebelum lelah yang lebih tinggi dibandingkan kelompok setelah lelah yang hanya 38.88 cm. Beberapa perbedaan signifikan mempengaruhi kecepatan bola yang lebih tinggi. Kecepatan *batting* kelompok sebelum lelah yang menghasilkan skor 3.60 m/s, sementara setelah lelah hanya pada skor 2.14 m/s. Selain itu, yang membuat perbedaan signifikan antara kelompok sebelum lelah dan setelah lelah adalah sudut gesekan lutut kiri saat *batting* karena posisi tubuh dan konsentrasi titik massa rendah mempengaruhi kecepatan tongkat (stick velocity). Kelompok sebelum lelah memiliki sudut lutut yang lebih rendah dekat dengan permukaan. Hasil analisis menunjukkan perbedaan signifikan dalam berbagai aspek biomekanika, yang berkontribusi pada penurunan performa *batting* saat kelelahan terjadi. Hal ini menekankan pentingnya latihan yang berfokus pada peningkatan daya tahan otot dan stabilitas inti, serta strategi pemulihan yang efektif untuk mempertahankan performa optimal sepanjang permainan. Dengan demikian, pengelolaan kondisi fisik dan biomekanika tubuh yang baik sangat krusial dalam mempertahankan dan meningkatkan performa atlet selama pertandingan.

## ACKNOWLEDGEMENT

Penelitian ini didanai oleh Unviersitas Pendidikan Indonesia, yang dukungannya sangat penting dalam memungkinkan penyelesaian studi ini dengan sukses. Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada universitas atas penyediaan sumber daya keuangan dan fasilitas yang diperlukan untuk melaksanakan penelitian kami. Selain itu, kami ingin mengucapkan terima kasih kepada semua peserta yang telah meluangkan waktu dan usaha mereka untuk berpartisipasi dalam penelitian ini. Kontribusi mereka sangat berharga. Kami juga menghargai bimbingan dan masukan dari rekan-rekan dan pembimbing kami, yang wawasannya sangat meningkatkan kualitas penelitian ini. Terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam proyek ini.

## REFERENCES

Bartlett, R. (2007). Introduction to sports biomechanics: Analysing human movement patterns. In *Introduction to Sports Biomechanics: Analysing Human Movement Patterns*. https://doi.org/10.4324/9780203462027

Bateni, H., Leno, G., Manjarres, R., Ouellette, B., & Wolber, M. (2013). Effect of cardiovascular fatigue on postural stability. *International Journal of Athletic Therapy and Training*, *18*(5). https://doi.org/10.1123/ijatt.18.5.38

Dowling, B., & Fleisig, G. S. (2016). Kinematic comparison of baseball batting off of a tee among various competition levels. *Sports Biomechanics*, *15*(3). https://doi.org/10.1080/14763141.2016.1159320

Escamilla, R. F., Fleisig, G. S., Barrentine, S. W., Zheng, N., & Andrews, J. R. (1998). Kinematic comparisons of throwing different types of baseball pitches. *Journal of Applied Biomechanics*, *14*(1). https://doi.org/10.1123/jab.14.1.1

Flyger, N., Button, C., & Rishiraj, N. (2006). The science of softball: Implications for performance and injury prevention. *Sports Medicine*, *36*(9), 797–816. https://doi.org/10.2165/00007256-200636090-00006/METRICS

Girard, O., Brocherie, F., & Bishop, D. J. (2015). Sprint performance under heat stress: A review. In *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* (Vol. 25, Issue S1). https://doi.org/10.1111/sms.12437

Horiuchi, G., & Nakashima, H. (2022). Torso dynamics during follow through in baseball batting. *Sports Biomechanics*. https://doi.org/10.1080/14763141.2022.2071328

Inoue, K., Uematsu, M., Maruoka, H., Hara, K., Kanemura, N., Masuda, T., & Morita, S. (2013). Influence of lower limb muscle fatigue on balance function. *Journal of Physical Therapy Science*, *25*(3). https://doi.org/10.1589/jpts.25.331

M., T., & M., S. (2020). Early sports specialization in collegiate softball players: The perspective of players and coaches. *Clinical Journal of Sport Medicine*, *30*(2).

Messier, S. P., & Owen, M. G. (1984). Bat dynamics of female fast pitch softball batters. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *55*(2). https://doi.org/10.1080/02701367.1984.10608390

Milanovich, M., & Nesbit, S. M. (2014). A three-dimensional kinematic and kinetic study of the college-level female softball swing. *Journal of Sports Science and Medicine*, *13*(1).

Mohammad, H. (2023). Pengembangan Alat Spin Ball Untuk Batting Softball. *Journal of Physical Activity and Sports (JPAS)*, *3*(3). https://doi.org/10.53869/jpas.v3i3.163

Nissen, C. W., Westwell, M., Õunpuu, S., Patel, M., Solomito, M., & Tate, J. (2009). A biomechanical comparison of the fastball and curveball in adolescent baseball pitchers. *American Journal of Sports Medicine*, *37*(8). https://doi.org/10.1177/0363546509333264

Oliver, G. D., Plummer, H., Henning, L., Saper, M., Glimer, G., Brambeck, A., & Andrews, J. R. (2019). Effects of a Simulated Game on Upper Extremity Pitching Mechanics and Muscle Activations among Various Pitch Types in Youth Baseball Pitchers. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, *39*(8). https://doi.org/10.1097/BPO.0000000000000980

Río-Rodríguez, D., Iglesias-Soler, E., & del Olmo, M. F. (2016). Set configuration in resistance exercise: Muscle fatigue and cardiovascular effects. *PLoS ONE*, *11*(3). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151163

Saraya, A. E. (2018). Anthropometric Factors and Physical Condition Dominant Determinants Batting Skills In Softball. *JURNAL PENDIDIKAN JASMANI DAN OLAHRAGA*, *3*(1). https://doi.org/10.17509/jpjo.v3i1.10331

Szymanski, D. J., Szymanski, J. M., Bradford, T. J., Schade, E. L., & Pascoe, D. D. (2007). Effect of twelve weeks of medicine ball training on high school baseball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *21*(3). https://doi.org/10.1519/R-18415.1

Tago, T., Ae, M., Fujii, N., Koike, S., & Kawamura, T. (2006). Effects of inside and outside hitting point on joint angular kinematics in baseball batting. *Japanese Journal of Biomechanics, 10 (4)*, 222–234.

Tago, T., Ae, M., & Koike, S. (2005). The trunk twist angle during baseball batting at the different hitting points. *Poster Session Presented at International Society of Biomechanics XXth Congress, Cleveland, OH*.

Washington, J., & Oliver, G. (2018). Kinematic differences between hitting off a tee versus front toss in collegiate softball players. *International Biomechanics*, *5*(1). https://doi.org/10.1080/23335432.2018.1472038

Werner, S. L., Guido, J. A., McNeice, R. P., Richardson, J. L., Delude, N. A., & Stewart, G. W. (2005). Biomechanics of youth windmill softball pitching. *American Journal of Sports Medicine*, *33*(4). https://doi.org/10.1177/0363546504269253

Zult, T., Goodall, S., Thomas, K., Hortobagyi, T., Howatson, G., Zoghi, M., Pearce, S. L., Nordstrom, M. A., Zheng, X., Alsop, D. C. D., Schlaug, G., Zehr, E. P., Stein, R. B., Yin, H. H., Knowlton, B. J. B. B. J., Yao, W., Fuglevand, R. J., Enoka, R. M., Xiao, G., … A. (2014). Evaluación Detallada Evaluación Detallada. *The Journal of Experimental Biology*, *115*(1).