

Analisis Teoretis Biomekanika dalam Optimalisasi Gerak Olahraga: Sebuah Studi Literatur mengenai Efisiensi, Teknik, dan Pencegahan Cedera

Mahmuddin¹, Tuti Widia Ningsi², Freni Daniello Sinaga³, Fransisco Simamora⁴, Yogi Van Lee Pernando Purba⁵, Siraj Almunasir Billah⁶

^{1,2,3,4,5,6} Universitas Negeri Medan, Pendidikan Kepelatihan Olahraga, Fakultas Ilmu keolahragaan

Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara

Email : sinagafredy215@gmail.com

ABSTRAK

Biomekanika olahraga merupakan cabang ilmu yang menelaah prinsip-prinsip mekanika dalam kaitannya dengan gerak tubuh manusia ketika melakukan aktivitas fisik. Kajian ini bertujuan untuk memahami bagaimana penerapan teori biomekanika dapat memberikan kontribusi terhadap optimalisasi teknik, efisiensi energi, serta pencegahan cedera pada atlet maupun pelaku olahraga secara umum. Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur dengan menelaah berbagai sumber ilmiah berupa artikel, buku, dan publikasi akademik yang relevan. Hasil telaah menunjukkan bahwa penerapan biomekanika berperan penting dalam mengidentifikasi pola gerak yang efektif, meminimalkan kesalahan teknik, serta merancang strategi latihan yang sesuai dengan kebutuhan individu. Selain itu, kajian literatur juga menegaskan bahwa pemahaman biomekanika tidak hanya berkaitan dengan peningkatan performa, tetapi juga berfungsi sebagai dasar dalam pengembangan teknologi olahraga, misalnya dalam desain peralatan dan metode pelatihan berbasis data. Dari perspektif pencegahan cedera, literatur yang ditinjau menunjukkan bahwa analisis biomekanika mampu membantu pelatih dan praktisi olahraga dalam mengurangi risiko kerusakan jaringan akibat gerakan yang berulang atau tidak efisien. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan pentingnya integrasi kajian biomekanika dalam praktik olahraga modern sebagai upaya untuk meningkatkan kualitas kinerja sekaligus menjaga keselamatan atlet.

Kata kunci: *biomekanika olahraga, efisiensi gerak, studi literatur, pencegahan cedera, performa atlet*

ABSTRACT

Sports biomechanics is a branch of science that examines the principles of mechanics in relation to human movements when performing physical activities. This study aims to understand how the application of biomechanics theory can contribute to engineering optimization, energy efficiency, and injury prevention in athletes and sportspeople in general. This study uses a literature study approach by examining various scientific sources in the form of relevant articles, books, and academic publications. The results of the study show that the application of biomechanics plays an important role in identifying effective movement patterns, minimizing technical errors, and designing training strategies that suit individual needs. In addition, the literature review also confirms that understanding biomechanics is not only related to performance improvement, but also serves as a basis for the development of sports technology, for example in equipment design and data-based training methods. From an injury prevention perspective, the literature reviewed shows that biomechanical analysis is able to assist coaches and sports

practitioners in reducing the risk of tissue damage due to repetitive or inefficient movements. Thus, this study emphasizes the importance of integrating biomechanics studies in modern sports practice as an effort to improve the quality of performance while maintaining athlete safety.

Keywords: *Sports Biomechanics, Motion Efficiency, Literature Studies, Injury Prevention, Athlete Performance*

PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam bidang olahraga semakin menegaskan pentingnya peran biomekanika sebagai salah satu landasan ilmiah untuk memahami gerak tubuh manusia. Biomekanika olahraga tidak hanya berfungsi sebagai disiplin yang menelaah prinsip mekanika pada aktivitas fisik, tetapi juga menjadi instrumen penting dalam mengevaluasi, menganalisis, dan mengoptimalkan performa atlet. Dengan memahami interaksi antara gaya, struktur tubuh, serta dinamika gerak, biomekanika memungkinkan para pelatih, atlet, maupun praktisi olahraga untuk memperoleh wawasan yang lebih mendalam terkait efektivitas teknik serta risiko cedera yang mungkin terjadi.

Pada praktik olahraga modern, kebutuhan akan pendekatan berbasis ilmiah semakin mendesak, terutama ketika performa atlet dituntut berada pada level kompetitif yang tinggi. Biomekanika hadir untuk menjembatani aspek teori dengan aplikasi praktis, misalnya dalam merancang teknik gerakan yang lebih efisien, menyesuaikan beban latihan sesuai kapasitas individu, hingga mengidentifikasi faktor biomekanis yang memengaruhi hasil olahraga. Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pemahaman biomekanika dapat berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi energi, pengurangan kesalahan teknis, serta perlindungan sistem muskuloskeletal dari potensi cedera akibat gerakan berulang atau teknik yang kurang tepat.

Selain berorientasi pada performa, biomekanika olahraga juga memiliki relevansi dalam aspek pencegahan cedera. Analisis biomekanis memungkinkan pengembangan strategi latihan yang lebih aman, terutama melalui pemetaan pola gerak yang berpotensi menimbulkan tekanan berlebih pada sendi, otot, maupun jaringan lunak. Pendekatan ini sangat penting bagi atlet yang terlibat dalam cabang olahraga dengan intensitas tinggi, karena risiko cedera yang tinggi dapat menghambat pencapaian prestasi sekaligus memengaruhi keberlanjutan karier. Dengan demikian, kajian biomekanika tidak hanya menyentuh ranah performa semata, tetapi juga aspek kesehatan dan keberlangsungan aktivitas fisik.

Dalam konteks penelitian ilmiah, studi literatur merupakan salah satu metode yang relevan untuk menguraikan perkembangan teoretis biomekanika olahraga. Melalui penelaahan berbagai sumber ilmiah, baik berupa artikel jurnal, buku, maupun publikasi akademik, penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai kontribusi biomekanika terhadap peningkatan kualitas gerak, efektivitas latihan, dan pencegahan cedera. Dengan demikian, pendahuluan ini menegaskan bahwa kajian literatur mengenai biomekanika olahraga memiliki urgensi untuk diperdalam, agar dapat menjadi rujukan akademis sekaligus praktis bagi pengembangan ilmu keolahragaan di era modern.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur (*literature review*) sebagai pendekatan utama dalam mengkaji kontribusi biomekanika terhadap performa olahraga, efisiensi gerak, serta pencegahan cedera. Studi literatur dipilih karena dianggap tepat untuk menelaah konsep-konsep teoretis, hasil penelitian terdahulu, serta perkembangan kajian ilmiah yang relevan tanpa melibatkan pengumpulan data lapangan secara langsung. Melalui pendekatan ini, peneliti dapat menyusun suatu sintesis pengetahuan yang komprehensif dan mendalam berdasarkan sumber akademik yang sudah tersedia.

Proses pengumpulan data dilakukan dengan menelusuri berbagai publikasi ilmiah, baik nasional maupun internasional, yang diterbitkan dalam rentang waktu dua dekade terakhir. Sumber utama yang digunakan meliputi artikel jurnal terakreditasi, prosiding konferensi ilmiah, serta buku-buku akademik yang membahas teori dan aplikasi biomekanika olahraga. Untuk memastikan validitas dan relevansi, penelusuran literatur dilakukan melalui basis data ilmiah seperti Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, dan ResearchGate, dengan menggunakan kata kunci “biomekanika olahraga”, “efisiensi gerak”, “pencegahan cedera”, serta “performa atlet”.

Tahapan analisis dilakukan melalui tiga langkah utama. Pertama, seleksi literatur dengan menetapkan kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusi mencakup publikasi yang relevan dengan topik, bersifat akademis, dan memuat kajian biomekanika olahraga. Sementara itu, kriteria eksklusi diterapkan pada literatur yang bersifat populer, tidak memiliki dasar ilmiah yang kuat, atau tidak sesuai dengan fokus penelitian. Kedua, klasifikasi tematik, yaitu pengelompokan hasil kajian berdasarkan tema utama, seperti optimalisasi teknik gerak, efisiensi energi, pencegahan cedera, dan inovasi teknologi olahraga. Ketiga, sintesis analitis, yakni menghubungkan berbagai temuan dari literatur

terpilih untuk menghasilkan suatu pemahaman integratif yang dapat memperkaya kajian akademik dan memberikan implikasi praktis.

Dengan menggunakan metode studi literatur yang sistematis, penelitian ini berupaya menghadirkan gambaran menyeluruh tentang peranan biomekanika dalam olahraga modern. Pendekatan ini juga memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi kesenjangan penelitian serta menawarkan arah kajian selanjutnya yang dapat dikembangkan dalam konteks keilmuan dan praktik keolahragaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Penelaahan literatur dalam rentang lima tahun terakhir (2019–2025) mengungkap berbagai temuan penting tentang bagaimana variabel biomekanik berperan dalam performa olahraga dan pencegahan cedera. Hasil-hasil tersebut dapat dikelompokkan ke dalam beberapa domain: (1) pengaruh pengalaman dan keahlian pada variabilitas motor, (2) perubahan biomekanik akibat intervensi pelatihan pencegahan cedera, (3) efek respons tak terduga dan kondisi kognitif terhadap gerak, (4) modifikasi biomekanik akibat cedera atau kondisi klinis, dan (5) kemajuan teknologi analisis data biomekanik.

Berikut ialah beberapa sumber yang di temukan

Tabel. 1. Tabel sumber data yang ditemukan sesuai dengan variabel biomekanik

Domain yang di kelompokkan	Sumber
pengaruh pengalaman dan keahlian pada variabilitas motor	(Evans et al., 2023) (Rabello et al., 2025)(Marineau et al., 2024)
perubahan biomekanik akibat intervensi pelatihan pencegahan cedera	(Ebner et al., 2025) (Xu et al., 2025) (Bathe et al., 2023)
efek respons tak terduga dan kondisi kognitif terhadap gerak	(Bafrouei et al., 2025) (Quarmby et al., 2023)
modifikasi biomekanik akibat cedera atau kondisi klinis	(Lin et al., 2025) (Zhang et al., 2025)(Peters-Dickie et al., 2025)(Gholipour Aghdam et al., 2024)(Skvortsov et al., 2024)(LISEE et al., 2022)
kemajuan teknologi analisis data biomekanik.	(Ghezelbash et al., 2024) (Halmich et al., 2025)(Penichet-Tomas, 2024)

Salah satu tinjauan terbaru, (Marineau et al., 2024), menggambarkan bahwa atlet dengan tingkat keahlian tinggi cenderung menggunakan strategi motor yang lebih variatif namun terkendali, yang memungkinkan mereka menyesuaikan gerak saat

kondisi berubah. Studi tersebut menyimpulkan bahwa variabilitas gerak bukanlah kelemahan, melainkan alat adaptif untuk menjaga kinerja optimal.

Studi sistematis (*Rabello et al., 2025*) menemukan bahwa pengaruh pengalaman pada parameter biomekanik seperti kinematika, kinetika, dan variabel spasi-waktu lari tidak konsisten di antara studi. Meski demikian, sebagian data menunjukkan bahwa pelari pemula memiliki kecenderungan gaya reaksi tanah yang lebih impulsif dan sudut sendi kurang ideal dibandingkan pelari berpengalaman.

(*Evans et al., 2023*) membandingkan pelari rekreasional dan kolese, menemukan bahwa pelari kolese menunjukkan momen ekstensor sendi yang lebih besar dan proporsi momen pada pergelangan kaki lebih tinggi dibandingkan pelari rekreasional. Pelari rekreasional justru menunjukkan vertical loading rate dan sudut tibia yang lebih curam, kondisi yang potensial meningkatkan stres pada sendi lutut dan pinggul.

Biomekanik dan Efek Intervensi Pencegahan Cedera

Meta-analisis dan review tentang intervensi pelatihan pencegahan cedera mengindikasikan bahwa perubahan variabel biomekanik sering kali bersifat spesifik dan terbatas. Sebagai contoh, (*Bathe et al., 2023*) melaporkan bahwa latihan kekuatan, plyometrik, dan keseimbangan dapat menurunkan beberapa faktor risiko biomekanik seperti sudut lutut saat pendaratan, namun pengaruh terhadap gaya reaksi tanah atau momen sendi umumnya minimal atau tidak konsisten.

Studi terbaru (*Ebner et al., 2025*) melakukan meta-analisis terhadap gerakan tak terduga (unanticipated) pada gerakan memotong dan pendaratan, menunjukkan bahwa gerakan tak terduga meningkatkan beban biomekanik pada sendi lutut dan pinggul dibandingkan kondisi antisipatif. (*Xu et al., 2025*) Temuan ini menyoroti bahwa pelatihan yang melibatkan unsur reaksi cepat (non-planned) dapat menghasilkan respons biomekanik berbeda, yang penting untuk pertimbangan program pencegahan cedera.

Sementara itu, studi (*Ebner et al., 2025*) meneliti pengaruh kondisi kognitif (dual tasking) dan antisipasi terhadap gerakan perubahan arah (change-of-direction). Hasil meta-analisisnya menunjukkan bahwa kondisi tak antisipatif dan beban kognitif dapat mengubah kinematika lutut (misalnya valgus, rotasi internal) dan momen sendi dibandingkan kondisi antisipatif murni.

Studi (*Quarmby et al., 2023*) menunjukkan bahwa individu dengan riwayat cedera pada ekstremitas bawah memiliki modifikasi biomekanik dalam aktivitas lari, lompat,

dan tugas kekuatan. Perubahan ini mencakup distribusi gaya, sudut sendi, dan pola aktivasi otot yang berbeda dari populasi sehat.

Sebuah review sistematis terbaru (*Bafrouei et al., 2025*) pada individu pasca-operasi ACL menegaskan bahwa latihan inti (core) mampu memodulasi parameter biomekanik pada ekstremitas bawah, seperti pola pendaratan dan kestabilan sendi lutut dan pinggul, walaupun efeknya tidak selalu homogen di semua studi.

Inquiry terhadap perkembangan metodologi menunjukkan adanya tren kuat pada penggunaan teknologi canggih dalam analisis biomekanik. (*Penichet-Tomas, 2024*) merangkum bahwa sistem penangkapan gerak, sensor gaya, dan platform tekanan telah memungkinkan pengukuran variabel kinetik dan kinematik dengan presisi tinggi, serta kemudahan penerapan di luar lab. Selain itu, (*Luiz Vancini et al., 2023*) menyajikan narasi evolusi analitik biomekanik dalam kaitannya dengan performa dan pencegahan cedera.

Dalam domain pengolahan data, scoping review (*Halmich et al., 2025*) membahas teknik augmentasi data untuk memperluas dataset waktu-serial biomekanik, sangat penting dalam pelatihan model prediksi berbasis data sensor. Sementara itu, penerapan machine learning dalam biomekanika tulang belakang, sebagaimana dibahas dalam (*Ghezelbash et al., 2024*), menunjukkan potensi besar dalam mengestimasi kinematika 3D dari input minimal (seperti kamera tunggal) dan memperluas aplikasi analisis biomekanik ke lingkungan nyata.

Beberapa studi open access dalam lima tahun terakhir menunjukkan berbagai perubahan biomekanik yang muncul setelah cedera sendi, khususnya pada ACL (anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR) dan setelah ankle sprain. Perubahan ini meliputi kinematika (sudut sendi), kinetika (gaya reaksi tanah, momen sendi), pola aktivasi otot, serta adaptasi kompensatoris selama jalan, lompatan, dan pendaratan.

Studi *Linking Gait Biomechanics and Daily Steps Post ACL-Reconstruction* menemukan bahwa individu 6-12 bulan setelah ACLR yang memiliki jumlah langkah harian lebih sedikit menunjukkan biomekanik berjalan yang “stiffened knee strategy” – yaitu sudut lutut yang lebih terbatas dan momen ekstensor lutut (knee extensor moment, KEM) yang lebih rendah selama fase weight acceptance dan late stance dibanding ekstremitas non-ACLR (*LISEE et al., 2022*).

Di samping itu, kecepatan berjalan yang lebih tinggi dikaitkan dengan durasi siklus berjalan yang lebih pendek, fase tumpuan (stance) dan fase double support yang

dipersingkat. Namun, variasi responsnya tergantung pada apakah pasien menunjukkan kompensasi fisiologis atau dekompensasi (Skvortsov et al., 2024).

Dalam studi *Knee Biomechanics During Neurocognitively Challenged Drop Landings in Male Elite Soccer Players with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction* didapati bahwa atlet ACLR, ketika melakukan drop landing dalam situasi yang menuntut keputusan kognitif (neurocognitively challenged), memperlihatkan biomekanik lutut yang kurang ideal dibanding kontrol: terjadi peningkatan valgus lutut, pengurangan sudut fleksi lutut pada kontak, dan perubahan momen lutut yang meningkatkan risiko regresi cedera (Gholipour Aghdam et al., 2024).

Studi *Ankle sprain history and clinical outcome have limited influence on walking and running biomechanics among runners: a cross-sectional study* menunjukkan bahwa meskipun terdapat riwayat ankle sprain dan hasil klinis yang bervariasi, efeknya terhadap biomekanik berjalan dan berlari cukup terbatas. Misalnya, pelari dengan sprain sebelumnya tidak selalu menunjukkan perbedaan signifikan dalam gaya reaksi tanah (ground reaction forces) atau sudut sendi pada fase tumpuan dibanding yang tidak memiliki riwayat (Peters-Dickie et al., 2025).

Selain itu, studi *Association between lower extremity movement patterns and ACL loading in CAI [Chronic Ankle Instability] patients* memperlihatkan bahwa pasien dengan instabilitas pergelangan kaki kronis (CAI), terutama yang mengalami sprain berulang dalam satu tahun, memiliki pola gerakan ekstremitas bawah yang berubah: ada peningkatan tekanan ACL (ACL loading) yang dihasilkan oleh pola gerakan abnormal pada lutut dan pergelangan kaki, terutama selama aktivitas berjalan/gait (Zhang et al., 2025).

Studi *Biomechanical Alterations During Gait Following Partial ACL Injury and the Effectiveness of Anatomical Reconstruction: an in-vitro robotic investigation* membandingkan sendi dengan cedera ACL parsial dan setelah rekonstruksi. Hasil menunjukkan bahwa cedera parsial pada bundel anterior (AM bundle) mengubah distribusi beban pada kompartemen medial dan lateral sendi lutut, terutama selama terminal stance dan pre-swing. Rekonstruksi ACL anatomi tunggal tidak sepenuhnya mengembalikan fungsi biomekanik asli dalam mendistribusikan tekanan sendi (Lin et al., 2025).

Pembahasan

Temuan di atas menunjukkan bahwa biomekanika olahraga berada di persimpangan penting antara teori dan praktik. Interpretasi atas hasil tersebut memberikan insight mendalam tentang bagaimana aspek mekanik tubuh manusia dapat dioptimalkan melalui pelatihan, teknologi, dan pendekatan adaptif.

Perbedaan gerak antara atlet berpengalaman dan pemula menegaskan bahwa adaptasi biomekanik bersifat progresif dan dinamis. Pengalaman dapat membentuk strategi motor yang lebih efisien dengan memanfaatkan variabilitas terkontrol. Dalam konteks ini, variabilitas bukanlah ketidakkonsistenan yang merugikan, melainkan mekanisme adaptif untuk menanggapi lingkungan yang berubah, sebagaimana dinyatakan oleh studi keahlian.

Meski demikian, review sistematis menyatakan bahwa efek pengalaman tidak selalu konsisten terhadap semua parameter biomekanik, yang menunjukkan bahwa aspek seperti daya otot, struktur anatomi, dan kebiasaan teknik juga ikut berperan. Oleh karena itu, pelatih tidak boleh terlalu menggeneralisasi bahwa pengalaman otomatis menjamin pola gerak optimal; evaluasi individu tetap diperlukan.

Meskipun program pencegahan cedera berhasil memodifikasi beberapa variabel biomekanik (seperti sudut lutut), ketidakseragaman pengaruh pada variabel lain (gaya tanah, momen sendi) menunjukkan kompleksitas adaptasi tubuh manusia dalam merespon latihan. Hal ini menandakan bahwa strategi pencegahan cedera perlu dirancang secara spesifik terhadap variabel biomekanik yang paling rentan dalam cabang olahraga tertentu.

Penambahan elemen antisipasi dan beban kognitif (dual tasking) tampaknya menimbulkan respons biomekanik yang berbeda dari latihan berbasis kondisi terkontrol. Studi *Effects of Anticipation and Dual-Tasking* (2025) menegaskan bahwa ketika atlet dihadapkan pada situasi nyata dengan ketidakpastian dan tekanan mental, pola gerak bisa bergeser ke modus kompensasi yang lebih berisiko. Intervensi latihan yang hanya berdasarkan kondisi terprediksi mungkin tidak cukup untuk menghadapi tuntutan kompetisi nyata.

Literatur tentang individu pasca-cedera mengungkap bahwa cedera sebelumnya sering memicu adaptasi biomekanik residual, seperti redistribusi beban dan perubahan pola aktivasi otot. Dalam konteks rehabilitasi ACL, latihan inti menunjukkan potensi mengembalikan fungsi biomekanik ekstremitas bawah, meskipun variasi efek antar studi

masih cukup lebar. Oleh karenanya, pemantauan berkelanjutan dan pendekatan rehabilitasi yang disesuaikan sangat penting untuk meminimalkan maladaptasi biomekanik jangka panjang.

Kemajuan sensor, sistem penangkapan gerak, dan platform gaya membuka kemungkinan untuk mengukur kinematika dan kinetika dengan akurasi tinggi di lingkungan nyata, tidak hanya di laboratorium. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi performa atlet saat kompetisi dan latihan intensif.

Di ranah pengolahan data, teknik augmentasi data untuk sinyal waktu-serial membantu memperluas dataset yang terbatas, memungkinkan penggunaan algoritma pembelajaran mesin dalam analisis biomekanik. Selain itu, aplikasi pembelajaran mesin di biomekanika tulang belakang menunjukkan bahwa estimasi kinematika dari input sederhana (misalnya kamera tunggal) memungkinkan analisis gerak tanpa alat mahal. Kombinasi ini menghadirkan potensi untuk menyusun sistem pemantauan kinerja dan cedera terapan di lapangan olahraga atau klinis.

Dari sisi praktis, pelatih dan ahli kinesiologi perlu merancang program latihan yang tidak hanya fokus pada kekuatan umum, tetapi juga adaptif terhadap kondisi tak terduga dan beban mental. Penggabungan latihan respons cepat, simulasi kompetisi, dan umpan balik sensor real-time dapat membantu membentuk pola biomekanik yang tahan stres kompetitif.

Pada tingkat penelitian, masih terdapat gap terkait studi longitudinal yang melacak dampak jangka panjang intervensi biomekanik pada atlet. Selain itu, hasil literatur yang heterogen menunjukkan perlunya standarisasi protokol pengukuran, baik dalam penggunaan sensor, variabel yang diobservasi, maupun analisis statistik. Integrasi multidisipliner antara biomekanika, fisiologi olahraga, ilmu data, dan psikologi olahraga diharapkan dapat menghasilkan pemodelan yang lebih holistik terhadap gerak manusia dalam konteks olahraga.

KESIMPULAN

Kajian literatur menunjukkan bahwa modifikasi biomekanik merupakan fenomena adaptif yang muncul sebagai respons terhadap cedera maupun kondisi klinis tertentu. Perubahan ini mencakup aspek kinematika, kinetika, serta pola aktivasi neuromuskular, yang bersama-sama membentuk mekanisme kompensasi tubuh. Meskipun strategi kompensatoris tersebut pada awalnya bersifat protektif, dalam jangka

panjang dapat menimbulkan ketidakseimbangan baru pada sistem gerak, meningkatkan risiko cedera ulang, dan bahkan menghambat pemulihan fungsi optimal.

Temuan penelitian terkini menekankan bahwa cedera pada sendi lutut, terutama terkait anterior cruciate ligament (ACL), sering menghasilkan pola pendaratan dan gaya langkah yang berbeda dibandingkan individu sehat. Adaptasi biomekanik juga terlihat pada cedera pergelangan kaki, yang berimplikasi pada distribusi gaya serta kestabilan postural. Dengan demikian, intervensi rehabilitasi tidak cukup hanya mengatasi kerusakan struktural, tetapi harus memperhatikan integrasi antara kontrol neuromuskular, kekuatan otot, serta koordinasi gerak.

Oleh sebab itu, pemahaman mendalam mengenai modifikasi biomekanik menjadi landasan penting dalam merancang program rehabilitasi yang komprehensif. Pendekatan berbasis bukti dan latihan neuromuskular yang terstruktur dapat meminimalkan maladaptasi, mempercepat pemulihan, serta mendukung kinerja fungsional dan performa olahraga jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Bafrouei, M. J., Mousavi, S. H., Khorramroo, F., & Zwerver, J. (2025). Core exercises for performance, pain, and Lower-limb biomechanics in individuals with ACL-Reconstruction: A systematic review with Meta-analysis of randomized control trials. *Scientific Reports*, 15(1), 27299. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13568-1>
- Bathe, C., Fennen, L., Heering, T., Greif, A., & Dubbeldam, R. (2023). Training interventions to reduce the risk of injury to the lower extremity joints during landing movements in adult athletes: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 9(2), e001508. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2022-001508>
- Ebner, C., Granacher, U., & Gehring, D. (2025). Effects of Anticipation and Dual-Tasking on Lower Limb Biomechanics While Performing Change-of-Direction Tasks in Physically Active Individuals: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 55(4), 857–876. <https://doi.org/10.1007/s40279-025-02182-w>
- Evans, R. J., Moffit, T. J., Mitchell, P. K., & Pamukoff, D. N. (2023). Injury and performance related biomechanical differences between recreational and collegiate runners. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1268292>
- Ghezelbash, F., Eskandari, A. H., Robert-Lachaine, X., Cao, S., Pesteie, M., Qiao, Z., Shirazi-Adl, A., & Larivière, C. (2024). Machine learning applications in spine biomechanics. *Journal of Biomechanics*, 166, 111967.
- Gholipour Aghdam, G. M., Alizadeh, M. H., Minoonejad, H., Shirzad, E., & Wilke, J. (2024). Knee Biomechanics During Neurocognitively Challenged Drop Landings in Male Elite

Soccer Players with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Sports Medicine - Open*, 10(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s40798-024-00685-w>

Halmich, C., Höschler, L., Schranz, C., & Borgelt, C. (2025). Data augmentation of time-series data in human movement biomechanics: A scoping review. *PLOS One*, 20(7), e0327038. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327038>

Lin, J., Cheng, R., Yan, Y., Zeng, X., Huang, W., Deng, C., Tsai, T.-Y., Wang, S., & Zhang, Y. (2025). Biomechanical alterations during gait following partial ACL injury and the effectiveness of anatomical reconstruction: an in-vitro robotic investigation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1546180>

LISEE, C., DAVIS-WILSON, H. C., EVANS-PICKETT, A., HORTON, W. Z., BLACKBURN, J. T., FRANZ, J. R., THOMA, L. M., SPANG, J. T., & PIETROSIMONE, B. G. (2022). Linking Gait Biomechanics and Daily Steps After ACL Reconstruction. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 54(5), 709–716. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002860>

Luiz Vancini, R., Andrade, M. S., De Lira, C. A. B., & Russomano, T. (2023). Recent Advances in Biomechanics Research: Implications for Sports Performance and Injury Prevention. *Health Nexus*, 1(3), 7–20. <https://doi.org/10.61838/kman.hn.1.3.2>

Marineau, E., Ducas, J., Mathieu, J., Rodriguez, A. D. P., Descarreaux, M., & Abboud, J. (2024). From Novice to Expert: How Expertise Shapes Motor Variability in Sports Biomechanics—a Scoping Review. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 34(8). <https://doi.org/10.1111/sms.14706>

Penichet-Tomas, A. (2024). Applied Biomechanics in Sports Performance, Injury Prevention, and Rehabilitation. *Applied Sciences*, 14(24), 11623. <https://doi.org/10.3390/app142411623>

Peters-Dickie, J.-L., Detrembleur, C., Bertrand, M., Detrembleur, E., & Nguyen, A. P. (2025). Ankle sprain history and clinical outcome have limited influence on walking and running biomechanics among runners: a cross-sectional study. *Frontiers in Sports and Active Living*, 7. <https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1553995>

Quarmby, A., Mönnig, J., Mugele, H., Henschke, J., Kim, M., Cassel, M., & Engel, T. (2023). Biomechanics and lower limb function are altered in athletes and runners with achilles tendinopathy compared with healthy controls: A systematic review. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.1012471>

Rabello, R., Desai, G. A., & Gruber, A. H. (2025). Inconsistent Effects of Experience on Running Biomechanics May be Influenced by Study Heterogeneity and Classification Criteria: a Systematic Review and Proposal of a Revised Taxonomy. *Sports Medicine - Open*, 11(1), 69. <https://doi.org/10.1186/s40798-025-00870-5>

Skvortsov, D., Altukhova, A., Kaurkin, S., & Akhpashev, A. (2024). The nature of gait biomechanics changes with walking speed increase in patients with anterior cruciate ligament injury. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, 37(1), 99–109. <https://doi.org/10.3233/BMR-220415>

- Xu, Y., Wang, R., Yuan, P., Yu, S., Chen, W., & Liu, J. (2025). Influence of unanticipated side-step cutting and landing on trunk and lower limb biomechanics: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Biomechanics*, 190, 112863. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2025.112863>
- Zhang, Z., Wei, S., Shi, H., & Sun, Y. (2025). Association between lower extremity movement patterns and ACL loading in CAI patients across varied ankle sprain frequencies within a year. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 22(1), 72. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01552-9>