

## Laboratorium Virtual dalam Biomekanika: Tinjauan dan Validitas Fisika Simulasi Gerak Manusia

1\* Miftahul Janna, 2 Sitti FatimahAzzahra, 3 Muhammad Fadli

1,2,3 Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia

[miftahul.janna@unm.ac.id](mailto:miftahul.janna@unm.ac.id)<sup>1</sup>

[sitti.fatimah.azzahra@unm.ac.id](mailto:sitti.fatimah.azzahra@unm.ac.id)<sup>2</sup>

[muhammadfadli@unm.ac.id](mailto:muhammadfadli@unm.ac.id)<sup>3</sup>

### Abstract

*Virtual laboratories (VLs) have emerged as central pedagogical components in sports biomechanics education, primarily in response to the accessibility and cost limitations of conventional motion capture (MoCap) systems. This article presents a systematic and analytical review of VL development in biomechanics education (2018–2026), with a primary focus on the physics validity of human motion simulations. Using a library research method with a qualitative-narrative approach, the study identifies four major VL technology categories – markerless video-based pose estimation, inertial measurement units (IMUs), musculoskeletal modeling, and virtual/augmented reality (VR/AR) – and evaluates the consistency of their kinematic and kinetic outputs with Newtonian mechanics principles. Findings indicate that VLs integrating physics-based constraints into data processing pipelines produce outputs more consistent with reference-standard data than unconstrained approaches. IMU-based optimal control frameworks approach the accuracy of optical MoCap systems with significantly lower RMSE values, while sparse sensor configurations combined with sagittal musculoskeletal models can validly reconstruct motion with as few as two to three sensors. Pedagogically, VLs have been shown to enhance conceptual understanding through force-motion causality visualization, enable safe repeated experimentation without injury risk, and support blended learning implementation. Remaining research gaps include longitudinal learning transfer evaluations, cross-platform VL validation protocol standardization, and access equity analyses.*

**Keywords:** *virtual laboratory; biomechanics; physics validity; human motion simulation.*

### Informasi Artikel:

Received 06/03/2026

Revised 15/03/2026

Accepted 22/03/2026

Published 30/03/2026

### Abstrak

Laboratorium virtual (VL) telah berkembang menjadi komponen pedagogis sentral dalam pembelajaran biomekanika olahraga, terutama sebagai respons terhadap keterbatasan aksesibilitas dan biaya sistem penangkapan gerak (MoCap) konvensional. Artikel ini menyajikan tinjauan sistematis dan analitis terhadap perkembangan VL dalam pembelajaran biomekanika (2018–2026), dengan fokus utama pada validitas fisika simulasi gerak manusia. Melalui metode library research dengan pendekatan kualitatif-naratif, studi ini mengidentifikasi empat kategori utama teknologi VL, yaitu estimasi pose berbasis video (markerless), sensor inersia (IMU), pemodelan muskuloskeletal, serta realitas virtual dan tertambah (VR/AR), dan mengevaluasi kesesuaian output kinematika dan kinetiknya dengan prinsip mekanika Newtonian. Temuan menunjukkan bahwa VL yang mengintegrasikan kendala berbasis fisika dalam alur pemrosesan data menghasilkan output yang lebih konsisten dengan data referensi standar dibandingkan pendekatan tanpa kendala fisika. Kerangka kontrol optimal berbasis IMU mampu mendekati akurasi sistem MoCap optik dengan galat RMSE yang signifikan lebih rendah, sementara

konfigurasi sensor jarang yang dikombinasikan dengan model muskuloskeletal sagital dapat merekonstruksi gerak secara valid hanya dengan dua hingga tiga sensor. Secara pedagogis, VL terbukti meningkatkan pemahaman konseptual melalui visualisasi kausalitas gaya-gerak, memfasilitasi pengulangan eksperimen aman tanpa risiko cedera, dan mendukung implementasi blended learning. Kesenjangan penelitian yang tersisa mencakup evaluasi longitudinal transfer pembelajaran, standarisasi protokol validasi VL lintas platform, dan kajian ekuitas akses.

**Kata kunci:** *laboratorium virtual; biomekanika; validitas fisika; simulasi gerak manusia*

\*Corresponding Author: [miftahul.janna@unm.ac.id](mailto:miftahul.janna@unm.ac.id)\*

## Pendahuluan

Pemahaman yang mendalam mengenai prinsip fisika dalam gerak manusia menjadi fondasi penting dalam bidang biomekanika. Konsep kinematika, kinetika, *joint torque*, dan *energy expenditure* tidak hanya bersifat teoritis, tetapi juga memiliki peran praktis dalam analisis gerakan olahraga, pencegahan cedera, serta peningkatan performa atletik. Pengajaran fisika gerak manusia secara tradisional menghadapi berbagai kendala, terutama terkait keterbatasan laboratorium MoCap berbasis penanda optik yang mahal, sulit dipindahkan, dan kurang tersedia dengan sumber daya terbatas (Bagesteiro, 2021; Tiwari et al., 2024). Kondisi ini mendorong pencarian alternatif pembelajaran yang lebih fleksibel dan terjangkau, namun tetap menjaga kualitas konseptual yang diperlukan.

Sejak 2018 hingga 2026, terjadi perubahan signifikan dalam pendidikan biomekanika dengan munculnya laboratorium virtual (*virtual labs*, VL) sebagai sarana pembelajaran utama. VL merupakan lingkungan berbasis perangkat lunak atau simulasi yang memungkinkan mahasiswa melakukan eksplorasi empiris terhadap fenomena gerak manusia tanpa sepenuhnya bergantung pada laboratorium fisik (Escobar, 2026; Farooq et al., 2024). Analisis bibliometrik dan ulasan sistematis menunjukkan adopsi VL yang meningkat di berbagai konteks pendidikan, didorong oleh kebutuhan akan pengalaman belajar yang dapat diulang, mudah diakses, dan kaya data (Zhong, 2025; Farooq et al., 2024). Hal ini menandai pergeseran paradigma dari pengajaran berbasis peralatan fisik ke pendekatan berbasis simulasi dan analisis data.

Meski demikian, penerapan VL dalam biomekanika masih menghadapi sejumlah tantangan. Pertanyaan utama yang muncul adalah sejauh mana simulasi gerak manusia dalam VL dapat secara valid merepresentasikan fenomena fisika, sehingga dapat menjadi basis pembelajaran yang andal. Validitas fisika simulasi yakni kesesuaian antara output kinematika dan kinetika yang dihasilkan VL dengan data referensi standar emas – menjadi faktor kunci dalam menentukan kualitas instruksional. Simulasi yang tidak akurat dapat menimbulkan pemahaman yang keliru terhadap prinsip mekanika gerak (Dorschky et al., 2025; McConnochie et al., 2025). Oleh karena itu, tinjauan kritis terhadap validitas fisika simulasi dalam VL sangat penting secara ilmiah.

Beberapa solusi telah dikembangkan melalui integrasi berbagai teknologi dalam kerangka VL. Sistem estimasi pose berbasis video tanpa penanda (*markerless*) seperti OpenPose, MediaPipe, dan DensePose menawarkan alternatif yang lebih hemat biaya dan skalabel dibandingkan sistem MoCap konvensional (Jing et al., 2023; Edriss, 2025). Selain itu, penggunaan sensor inersia (IMU) yang dikombinasikan dengan model muskuloskeletal dan kerangka kontrol optimal memungkinkan rekonstruksi kinematika yang akurat meski di luar laboratorium terkontrol (McConnochie et al., 2025; Dorschky et al., 2025). Pendekatan ini membentuk arsitektur teknologi VL yang memadai secara fisika untuk keperluan pedagogis.

Pada tingkat yang lebih spesifik, penelitian terbaru menunjukkan bahwa simulasi berbasis kontrol optimal yang memanfaatkan sinyal IMU mampu menghasilkan kinematika sendi dengan galat (RMSE) lebih rendah dibandingkan kinematika inversi IMU konvensional, sehingga mendekati akurasi sistem MoCap optik (McConnochie et al., 2025). Konfigurasi sensor yang jarang (*sparse*) yang dipadukan dengan model muskuloskeletal juga dapat merekonstruksi gerakan pada bidang sagital secara akurat hanya dengan dua hingga tiga sensor, membuka peluang implementasi VL hemat sumber daya tetapi tetap valid secara fisika (Dorschky et al., 2025).

Dari sisi pedagogis, VL yang menyediakan umpan balik kinematika dan kinetika secara *real-time* terbukti meningkatkan akurasi gerakan dan keterlibatan mahasiswa (Tong, 2025). Integrasi realitas virtual (VR) dan realitas tertambah (AR) memungkinkan pembelajaran fisika gerak secara *embodied*, mahasiswa tidak hanya mengamati data, tetapi juga aktif berinteraksi dengan simulasi yang meniru prinsip torsi, kecepatan sudut, dan daya sendi (Tong, 2025; Farooq et al., 2024). Simulasi berbasis GPU-terakselerasi juga mulai digunakan untuk menampilkan dinamika gait dan biaya energi secara luas, mendukung skenario pembelajaran berbasis data di lingkungan VL (Mittal, 2025).

Meski literatur telah menjelaskan beragam teknologi VL dan potensinya secara pedagogis, terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan. Studi yang ada banyak menekankan validasi teknis sistem secara terisolasi, misalnya akurasi IMU atau sistem pose tertentu, tanpa menghubungkannya dengan evaluasi VL sebagai instrumen pembelajaran. Sebaliknya, penelitian yang berfokus pada aspek pedagogis jarang membahas validitas fisika simulasi secara mendalam. Oleh karena itu, tinjauan yang menggabungkan perkembangan VL, validitas fisika simulasi, dan relevansinya bagi pembelajaran biomekanika masih terbatas (Zhong, 2025; Escobar, 2026). Kesenjangan ini menjadi justifikasi utama penelitian ini.

Artikel ini bertujuan menyajikan tinjauan sistematis dan analitis mengenai perkembangan laboratorium virtual dalam pembelajaran biomekanika, dengan fokus pada validitas fisika simulasi gerak manusia. Secara khusus, studi ini mengidentifikasi trajektori teknologi VL yang relevan, mengevaluasi bukti empiris validitas kinematika dan kinetika dibandingkan metode referensi standar, dan membahas implikasi pedagogis temuan tersebut. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi perspektif fisika dan pedagogis dalam satu kerangka analisis yang kohesif, suatu pendekatan yang masih jarang dilakukan. Kajian dibatasi pada literatur dan studi empiris antara 2018–2026, dengan penekanan pada aplikasi dalam pengajaran biomekanika.

## Metode

Penelitian ini menggunakan metode *library research* dengan pendekatan kualitatif, yaitu suatu strategi sistematis untuk mengumpulkan, menganalisis, dan mensintesis sumber-sumber ilmiah yang relevan guna menjawab pertanyaan penelitian (Sari & Asmendri, 2020). Pendekatan ini dipilih karena sesuai dengan karakter kajian yang berfokus pada pemetaan konsep, analisis kritis literatur, dan identifikasi tren penelitian, tanpa melakukan pengumpulan data primer di lapangan.

Proses pencarian literatur dilakukan secara sistematis melalui basis data ilmiah terkemuka, termasuk Scopus, Web of Science, PubMed, dan IEEE Xplore. Kata kunci yang digunakan mencakup istilah utama seperti *virtual lab*, *biomechanics education*, *physics simulation*, *markerless motion capture*, *musculoskeletal modeling*, dan *kinematics*. Rentang publikasi dibatasi pada tahun 2018 hingga 2026 untuk memastikan relevansi serta kemutakhiran temuan.

Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel jurnal bereputasi dan prosiding ilmiah terindeks; (2) membahas penggunaan laboratorium virtual, simulasi gerak manusia, atau teknologi estimasi pose dalam konteks biomekanika olahraga; (3) menyajikan data empiris validitas kinematika atau kinetika; dan (4) ditulis dalam bahasa Indonesia atau Inggris. Kriteria eksklusi mencakup: (1) studi yang tidak

memiliki komponen validasi fisika atau pedagogis; (2) makalah opini tanpa data empiris; dan (3) artikel yang melampaui rentang topik biomekanika olahraga dan pendidikan fisika gerak manusia.

Dalam ekstraksi data, fokus diarahkan pada karakteristik teknologi VL, bukti validitas fisika simulasi, strategi pedagogis yang diterapkan, serta konteks implementasinya di lingkungan formal maupun non-formal (Sellberg et al., 2024; Farooq et al., 2024). Sintesis temuan dilakukan melalui pendekatan naratif-tematik untuk mengintegrasikan hasil lintas studi yang heterogen serta mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang relevan (Dove et al., 2023; Gramigna et al., 2025).

## Hasil Penelitian dan Pembahasan

### Hasil Penelitian

#### 1. Studi Kasus Penggunaan Laboratorium Virtual dalam Olahraga

Implementasi laboratorium virtual (VL) dalam biomekanika olahraga telah berkembang dengan beragam bentuk, menyesuaikan kebutuhan pedagogis dan ketersediaan sumber daya institusi. Salah satu bentuk yang paling umum adalah laboratorium berbasis estimasi pose tanpa penanda (*markerless pose estimation*), yang memanfaatkan rekaman video standar untuk mengekstraksi parameter kinematika seperti sudut sendi, panjang langkah, dan kadens, tanpa memerlukan sistem MoCap konvensional. Pendekatan ini banyak diterapkan dalam perkuliahan biomekanika tingkat sarjana; mahasiswa menganalisis gait menggunakan dataset publik maupun rekaman kelas, kemudian membandingkan hasilnya dengan prediksi teoretis (Zhong, 2025; Edriss, 2025; Jing et al., 2023).

Selain itu, VL berbasis sensor inersia (IMU) juga telah diterapkan secara luas dalam konteks olahraga. Modul-modul ini memungkinkan mahasiswa mengumpulkan data gait atau gerakan atletik melalui sensor yang dapat dikenakan, dan menganalisis kinematika serta kinetika menggunakan lingkungan simulasi. Studi komparatif menunjukkan bahwa pendekatan pelacakan kontrol optimal berbasis IMU mampu menghasilkan rekonstruksi gerak yang mendekati akurasi sistem MoCap optik, sehingga menjadi alternatif yang layak untuk pembelajaran di luar laboratorium terkontrol (McConnochie et al., 2025; Dorschky et al., 2025). Dalam konteks klub olahraga dan program sains olahraga, modul berbasis wearable ini digunakan untuk penilaian lompat dan analisis lari, sekaligus mengenalkan mahasiswa pada konsep energy expenditure dan dinamika sendi.

Penggunaan pemodelan muskuloskeletal, misalnya melalui platform OpenSim yang merupakan bentuk VL yang paling kaya secara fisika. Modul ini memungkinkan mahasiswa memodifikasi parameter model, menguji hipotesis terkait strategi gerak, dan mengamati bagaimana gaya serta torsi membentuk pola gerak selama berjalan atau berlari (McConnochie et al., 2025; Dorschky et al., 2025). Proyek *capstone* yang melibatkan simulasi pola gait dan perbandingan *metabolic cost* dari berbagai strategi gerak digunakan untuk memperdalam pemahaman mahasiswa mengenai hubungan antara prinsip fisika dan biomekanika. Di luar universitas, platform berbasis web dan laboratorium jarak jauh (*remote labs*) memungkinkan akses analisis gait dan simulasi kinematika bagi peserta pendidikan jarak jauh maupun pelatih olahraga, tanpa membutuhkan infrastruktur fisik di kampus (Escobar, 2026; Farooq et al., 2024).

Integrasi realitas virtual (VR) dalam modul VL memberikan pengalaman embodied, mahasiswa menerima umpan balik waktu nyata mengenai joint torque dan kualitas gerakan dalam konteks olahraga maupun rehabilitasi (Tong, 2025). Berbagai bentuk VL ini tersaji secara ringkas pada Tabel 1 yang merangkum karakteristik, validitas fisika, keunggulan, dan keterbatasan masing-masing teknologi.

Tabel 1. Perbandingan Teknologi Laboratorium Virtual dalam Pembelajaran Biomekanika Olahraga

Teknologi VL	Metode Utama	Validitas Fisika	Keunggulan	Keterbatasan
--------------	--------------	------------------	------------	--------------

Estimasi Pose Berbasis Video (Markerless)	OpenPose, MediaPipe, DensePose	Kinematika 2D memadai; akurasi menurun pada gerakan out-of-plane	Hemat biaya, skalabel, berbasis rekaman video standar	Kurang akurat pada gerakan 3D & kecepatan tinggi
Sensor Inersia (IMU)	Akselerometer, giroskop, kontrol optimal	RMSE mendekati MoCap optik dengan kerangka kontrol optimal (McConnochie et al., 2025)	Portabel, dapat dikenakan, cocok di luar laboratorium	Drift akumulasi; sensitif terhadap kalibrasi
Pemodelan Muskuloskeletal (OpenSim)	Simulasi gaya otot, torsi, energi	Fidelitas tinggi: fisika, kinematika, kinetika, energetika (Harris et al., 2020)	Visualisasi kausalitas gaya-ggerak; modifikasi parameter bebas	Kompleks, butuh komputasi tinggi; kurva belajar curam
Realitas Virtual (VR) & Tertambah (AR)	Umpan balik real-time, embodied interaction	Bergantung pada akurasi engine fisika yang diintegrasikan	Meningkatkan keterlibatan dan akurasi gerak mahasiswa (Tong, 2025)	Biaya perangkat keras tinggi; keterbatasan konten biomekanika
Platform Berbasis Web & Remote Labs	Dataset terbuka, browser-based simulation	Tergantung kualitas dataset dan model yang digunakan	Aksesibel, tanpa infrastruktur fisik, mendukung pembelajaran jarak jauh	Ketergantungan bandwidth; interaktivitas terbatas

### 3.2 Validitas Fisika Simulasi: Konsistensi Model dengan Hukum Gerak dan Pengukuran Biomekanik

Validitas fisika simulasi dalam laboratorium virtual (VL) merupakan aspek krusial yang menentukan sejauh mana output kinematika dan kinetika sesuai dengan prinsip mekanika Newtonian serta pengukuran referensi standar. Bukti empiris menunjukkan bahwa fidelitas simulasi bersifat multidimensional, meliputi fidelitas fisika (gaya, sifat jaringan, interaksi kontak), fidelitas kinematika (sudut dan lintasan sendi), fidelitas kinetika (momen sendi, gaya reaksi tanah), dan fidelitas energetika (*metabolic cost* serta daya sendi) (Harris et al., 2020). Penting dicatat bahwa tingkat realisme visual yang tinggi tidak secara otomatis menjamin fidelitas fungsional yang memadai; konsistensi antara output simulasi dan hukum dinamika yang mendasarinya lebih esensial untuk mendukung pemahaman konseptual mahasiswa.

Studi komparatif menunjukkan bahwa penggunaan kerangka kontrol optimal pada sinyal IMU dapat menghasilkan kinematika sendi dengan root mean square error (RMSE) lebih rendah dibandingkan kinematika inversi IMU konvensional, mendekati akurasi sistem MoCap optik pada tugas lari di treadmill (McConnochie et al., 2025). Hal ini menegaskan bahwa integrasi model fisika berbasis optimasi ke dalam pemrosesan data IMU meningkatkan kesesuaian output dengan hukum dinamika gerak. Selain itu, konfigurasi sensor yang jarang (*sparse sensor configurations*) yang digabungkan dengan model muskuloskeletal bidang sagital mampu menghasilkan estimasi kinematika yang dapat diterima hanya dengan dua hingga tiga sensor, meskipun penghilangan sensor pelvis dapat menurunkan akurasi output dinamika lutut dan panggul (Dorschky et al., 2025).

Dalam konteks pemodelan muskuloskeletal, penelitian menunjukkan bahwa pilihan model memiliki pengaruh signifikan terhadap prediksi kinematika dan kinetika. Jing et al., (2023) melaporkan adanya variabilitas yang besar dalam prediksi kinematika dan kinetika sendi pada analisis gait anak *cerebral palsy*, tergantung pada model muskuloskeletal yang digunakan, menekankan pentingnya pemilihan dan parameterisasi model yang cermat untuk menjaga fidelitas pendidikan.

Sistem estimasi pose berbasis video tanpa penanda menunjukkan kemampuan yang baik untuk kinematika 2D yang mudah diakses, namun akurasi menurun pada gerakan di luar bidang (*out-of-plane*) dan tugas berkecepatan tinggi. Validasi terhadap data MoCap standar menunjukkan bahwa dengan kalibrasi tepat dan penerapan batasan berbasis fisika, metode ini dapat menghasilkan trajektori sudut sendi yang bermanfaat untuk tujuan pedagogis (Edriss, 2025) (Jing et al., 2023). Ringkasan bukti validitas fisika dari berbagai dimensi disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Ringkasan Bukti Validitas Fisika Simulasi dalam Laboratorium Virtual Biomekanika

Dimensi Validitas	Studi Kunci	Metode Pengukuran	Hasil/Temuan Utama	Implikasi Pedagogis
Fidelitas Kinematika	McConnochie et al. (2025); Dorschky et al. (2025)	RMSE sudut sendi vs. MoCap optik	Kontrol optimal pada IMU menghasilkan RMSE lebih rendah dari inversi IMU konvensional	IMU berbasis kontrol optimal layak sebagai pengganti MoCap untuk pembelajaran
Fidelitas Kinetika	Jing et al. (2023); Dorschky et al. (2025)	Variabilitas momen sendi & GRF antar model	Pilihan model muskuloskeletal memengaruhi prediksi kinetika secara signifikan	Transparansi asumsi model penting untuk literasi fisika mahasiswa
Fidelitas Energetika	McConnochie et al. (2025); Mittal (2025)	Metabolic cost & joint power	Simulasi GPU-terakselerasi mampu merepresentasikan dinamika gait dan biaya energi secara real-time	Mendukung pembelajaran konsep work-energy theorem dalam konteks atletik
Fidelitas Fisika (Constraints)	Harris et al. (2020); Edriss et al. (2025)	Konsistensi dengan hukum Newton, batasan fisika	VL dengan kendala berbasis fisika menghasilkan output lebih konsisten dengan mekanika Newtonian daripada tanpa kendala	Fidelitas visual ≠ fidelitas fungsional; kendala fisika wajib diintegrasikan dalam desain VL
Validasi via Markerless Pose	Edriss et al. (2025); Jing et al. (2023)	Perbandingan trajektori sudut sendi vs. MoCap	Akurasi memadai untuk kinematika 2D; menurun pada gerakan <i>out-of-plane</i>	Efektif untuk analisis gait sagital di kelas tanpa peralatan MoCap

### 3.3 Keunggulan Pedagogis: Visualisasi Konsep, Pengulangan Aman, dan Blended Learning

Laboratorium virtual (VL) menawarkan berbagai keunggulan pedagogis yang sulit dicapai melalui laboratorium fisik konvensional. Dari perspektif visualisasi konsep, VL memungkinkan mahasiswa untuk secara langsung memahami hubungan antara gaya, momen, dan gerak dalam konteks atletik yang autentik. Simulasi berbasis OpenSim memvisualisasikan bagaimana gaya otot menghasilkan momen sendi dan energy expenditure, sehingga memfasilitasi keterhubungan konseptual antara kinematika yang diamati dan kinetika yang mendasarinya – suatu rantai kausalitas yang sulit ditangkap hanya melalui observasi gerak langsung (McConnochie et al., 2025; Dorschky et al., 2025). VL berbasis estimasi pose video juga menyediakan representasi sudut sendi dan lintasan gerak yang dapat diakses, memungkinkan mahasiswa melakukan penyelidikan berbasis inkuiri tentang kecepatan, percepatan, dan gerak angular tanpa memerlukan peralatan MoCap yang mahal (Zhong, 2025; Edriss, 2025).

Keunggulan pengulangan yang aman menjadi aspek pedagogis yang sangat relevan, terutama dalam pendidikan olahraga. VL memungkinkan mahasiswa melakukan eksperimen berulang dengan kondisi terkontrol tanpa risiko cedera, tanpa batasan waktu laboratorium, dan tanpa konsumsi sumber daya fisik. Kemampuan untuk memodifikasi parameter model – misalnya massa tubuh, kecepatan gerak, atau panjang langkah, dan mengamati efeknya terhadap momen sendi dan biaya energi membantu membangun intuisi fisika yang mendalam terkait gerak manusia (McConnochie et al., 2025; Dorschky et al., 2025). Integrasi lingkungan VR lebih lanjut memperkuat keunggulan ini dengan memberikan umpan balik korektif waktu nyata terkait kualitas gerak, yang terbukti meningkatkan akurasi gerak dan motivasi belajar mahasiswa (Tong, 2025).

Dalam konteks blended learning, VL berperan sebagai alat yang efektif untuk memperluas jangkauan pembelajaran di luar ruang laboratorium fisik. Ulasan bibliometrik menunjukkan peningkatan adopsi VL dalam format pembelajaran jarak jauh, hibrida, dan mandiri, memungkinkan mahasiswa mengakses eksperimen fisika gerak kapan saja dan di mana saja (Zhong, 2025; Escobar, 2026; Farooq et al., 2024). Platform berbasis web dan dataset terbuka memungkinkan integrasi VL ke dalam pendidikan non-formal, seperti workshop komunitas atau kursus daring terbuka, sehingga literasi biomekanika dapat diakses oleh populasi yang sebelumnya terbatas (Farooq et al., 2024; Wang et al., 2023). Keterlibatan mahasiswa dengan aliran data multimodal dalam VL juga terbukti meningkatkan kompetensi literasi data dan kemampuan berpikir komputasional yang dapat diterapkan dalam olahraga, terapi fisik, dan pelatihan atletik profesional (Zhong, 2025; Escobar, 2026).

## Pembahasan

Hasil tinjauan ini menunjukkan bahwa laboratorium virtual (VL) telah bertransformasi dari sekadar pelengkap instruksional menjadi komponen pedagogis utama dalam biomekanika olahraga. Sejalan dengan Zhong (2025) Escobar (2026), pergeseran dari laboratorium berbasis peralatan fisik ke lingkungan berbasis simulasi dan data merupakan respons terstruktur terhadap keterbatasan pendidikan biomekanika tradisional. Kemampuan VL untuk memvisualisasikan rantai kausalitas antara gaya otot, momen sendi, dan energy expenditure dalam gerak atletik autentik memberikan scaffolding konseptual yang sulit dicapai melalui pengajaran teks atau demonstrasi pasif (McConnochie et al., 2025; Dorschky et al., 2025).

Namun, peningkatan pemahaman konseptual fisika melalui VL tidak otomatis tercapai. Tiwari et al. (2024) dan Bagesteiro (2021) menekankan bahwa tanpa penyelarasan eksplisit antara aktivitas VL dan tujuan pembelajaran fisika, VL berpotensi menjadi latihan pengumpulan data tanpa kedalaman konseptual. Modul VL yang efektif seharusnya mendorong mahasiswa mengartikulasikan prinsip

Newton, hubungan kerja-energi, dan relasi torsi-daya yang mendasari gerak yang dianalisis (Harris et al., 2020).

Kajian ini juga menyoroti pentingnya validitas fisika simulasi. Fidelitas simulasi bersifat multidimensional—mencakup akurasi fisika, kinematika, kinetika, dan energetika, yang tidak dapat diwakili hanya melalui realisme visual. Harris et al. (2020) menegaskan bahwa fidelitas visual tinggi tidak menjamin transfer pembelajaran yang efektif. Bukti empiris dari McConnochie et al. (2025) dan Dorschky et al. (2025) konsisten menunjukkan bahwa integrasi kendala berbasis fisika ke dalam alur pemrosesan data meningkatkan kesesuaian output kinematika dengan data MoCap optik. Variabilitas prediksi kinematika dan kinetika akibat perbedaan model muskuloskeletal menekankan pentingnya transparansi asumsi model agar mahasiswa memahami ketidakpastian pengukuran, sekaligus meningkatkan literasi fisika dan kemampuan berpikir kritis ilmiah (Jing et al., 2023; Dorschky et al., 2025; Edriss, 2025).

Dari perspektif desain kurikulum, sintesis temuan mendukung pendekatan progresif: dimulai dari analisis kinematika berbasis estimasi pose, dilanjutkan dengan analisis kinetika berbasis IMU, dan akhirnya pemodelan energetika muskuloskeletal. Urutan ini mengelola beban kognitif sambil mempertahankan kedalaman konseptual (Tiwari et al., 2024; Bagesteiro, 2021). Penggunaan data multimodal, yang menggabungkan estimasi pose video, sensor IMU, dan output pemodelan muskuloskeletal, memperkuat koherensi konseptual dengan memungkinkan mahasiswa membandingkan aliran data, mendiskusikan sumber kesalahan, dan merekonsiliasi perbedaan melalui penalaran fisika (McConnochie et al., 2025; Wang et al., 2023).

Integrasi lingkungan VR yang menyediakan umpan balik real-time terkait joint torque dan kualitas gerak terbukti meningkatkan keterlibatan dan akurasi gerak mahasiswa, memperkuat argumen untuk mengadopsi embodied learning dalam desain kurikulum berbasis VL (Tong, 2025). Penerapan orientasi transfer, mahasiswa menerapkan wawasan fisika VL ke permasalahan performa atletik nyata dan memvalidasi prediksi dengan data simulasi—menjadi strategi penting untuk mengatasi keterbatasan transfer pembelajaran yang sering dilaporkan (Zhong, 2025; Jing et al., 2023; Harris et al., 2020).

Aspek keterbatasan VL perlu diperhatikan sebagai refleksi penting dalam implementasi dan desain kurikulum. Keterbatasan meliputi ketersediaan perangkat keras, bandwidth jaringan, kapasitas komputasi, dan kesiapan pendidik, yang berpotensi memengaruhi kualitas pembelajaran dan pemerataan akses antar institusi. Solusi yang menjanjikan termasuk pengembangan VL berbasis web dengan dataset terbuka, konfigurasi sensor hemat biaya, dan program pengembangan profesional berkelanjutan untuk pendidik (Tiwari et al., 2024; Bagesteiro, 2021; Zhong, 2025; Escobar, 2026; Farooq et al., 2024). Kesenjangan penelitian yang tersisa mencakup studi longitudinal mengenai transfer pembelajaran, standarisasi protokol validasi VL, dan evaluasi dampak VL terhadap ekuitas hasil belajar, yang penting untuk mendukung klaim efektivitas VL dalam biomekanika olahraga.

## Kesimpulan

Tinjauan sistematis ini menegaskan bahwa laboratorium virtual (VL) telah menjadi instrumen pedagogis yang sah dan efektif dalam pembelajaran biomekanika olahraga. Empat kategori teknologi VL yang diidentifikasi—estimasi pose markerless, sensor IMU, pemodelan muskuloskeletal, dan VR/AR, masing-masing menawarkan kekuatan dan keterbatasan unik dalam merepresentasikan fisika gerak manusia.

Temuan utama penelitian ini dapat dirangkum dalam tiga simpulan pokok. Pertama, validitas fisika simulasi merupakan syarat mendasar, bukan pilihan. VL yang mengintegrasikan kendala

berbasis fisika dalam pipeline pemrosesan data terbukti menghasilkan output kinematika dan kinetika yang lebih konsisten dengan standar MoCap optik dibandingkan pendekatan tanpa kendala. Kerangka kontrol optimal berbasis IMU mampu mendekati akurasi gold standard dengan RMSE yang signifikan lebih rendah, sementara konfigurasi sensor jarang yang dikombinasikan dengan pemodelan muskuloskeletal sagital memungkinkan rekonstruksi gerak valid dengan sumber daya minimal.

Kedua, keunggulan pedagogis VL bersifat multidimensional dan saling melengkapi. Visualisasi kausalitas gaya-gerak, kemampuan pengulangan eksperimen aman tanpa batasan waktu dan risiko cedera, serta fleksibilitas blended learning yang melampaui batas geografis institusi merupakan kontribusi nyata VL terhadap kualitas pendidikan biomekanika. Ketiga dimensi ini secara bersama mendukung pengembangan kompetensi fisika, literasi data, dan berpikir komputasional.

Ketiga, desain kurikulum berbasis VL memerlukan pendekatan progresif dan berorientasi transfer. Urutan dari analisis kinematika, analisis kinetika, hingga pemodelan energetika – dengan integrasi data multimodal dan orientasi penerapan nyata – terbukti efektif mengelola beban kognitif sambil membangun kedalaman konseptual yang autentik. Transparansi asumsi model dan keterlibatan mahasiswa dalam diskusi ketidakpastian pengukuran menjadi elemen kritis yang membedakan VL berkualitas dari sekadar simulasi visual.

Implikasi praktis penelitian ini langsung relevan bagi pengembang kurikulum, dosen biomekanika, dan pengambil kebijakan pendidikan olahraga di Indonesia, sekaligus memberikan implikasi strategis bagi inovasi pendidikan dan pembelajaran sains secara luas. Integrasi laboratorium virtual memberikan **model yang sangat menjanjikan bagi pembelajaran fisika dan biologi terapan, di mana konsep-konsep sains yang kompleks dapat divisualisasikan dan dieksplorasi secara mendalam oleh peserta didik. Adopsi VL tidak hanya mengatasi keterbatasan infrastruktur MoCap konvensional dan fasilitas praktikum sains konvensional lainnya, tetapi juga membuka akses yang lebih merata terhadap pengalaman belajar sains berbasis data yang selama ini terbatas pada institusi berkapasitas tinggi. Penelitian lanjutan diperlukan untuk** mengisi kesenjangan yang tersisa, khususnya mengenai dampak longitudinal transfer pembelajaran, standardisasi protokol validasi VL lintas platform, dan evaluasi ekuitas akses VL di berbagai konteks pendidikan Indonesia.

## Referensi

- Bagesteiro, L. B. (2021). Practical Experiential Learning: A Methodology Approach for Teaching Undergraduate Biomechanics. *Journal of Kinesiology & Wellness*, 9, 58–68.  
<https://doi.org/10.56980/jkw.v9i.80>
- Dorschky, E., Nitschke, M., Mayer, M., Weygers, I., Gaßner, H., Seel, T., Eskofier, B. M., & Koelewijn, A. D. (2025). Comparing Sparse Inertial Sensor Setups for Sagittal-Plane Walking and Running Reconstructions. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13.  
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1507162>
- Dove, E., Hennessy, K., Kirou-Mauro, A., Aitkens, L., Duncan, A., Agur, A., & Ho, E. S. (2023). Gross and Applied Anatomy Pedagogical Approaches in Occupational Therapy Education: A Scoping Review. *Canadian Journal of Occupational Therapy*, 91(2), 136–148.  
<https://doi.org/10.1177/00084174231197614>
- Edriss, S. (2025). Commercial Vision Sensors and AI-based Pose Estimation Frameworks for Markerless Motion Analysis in Sports and Exercises: A Mini Review. *Frontiers in Physiology*, 16.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1649330>
- Escobar, D. L. T. (2026). Trends in Virtual and Remote Laboratories for Physics Education: A Bibliometric Analysis (2014–2024). *European Journal of Physics*, 47(2), 23001.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6404/ae3f65>
- Farooq, E., Zaidi, E., & Shah, M. M. A. (2024). The Future Classroom: Analyzing the Integration and Impact of Digital Technologies in Science Education. *Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Ilmu*

- Pendidikan E-Saintika*, 8(2), 280–318. <https://doi.org/10.36312/esaintika.v8i2.1957>
- Gramigna, V., Palumbo, A., & Perri, G. D. (2025). Advancing Gait Analysis: Integrating Multimodal Neuroimaging and Extended Reality Technologies. *Bioengineering*, 12(3), 313. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12030313>
- Harris, D., Bird, J. M., Smart, P., Wilson, M., & Vine, S. J. (2020). A Framework for the Testing and Validation of Simulated Environments in Experimentation and Training. *Frontiers in Psychology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00605>
- Jing, Z., Han, J., & Zhang, J. (2023). Comparison of Biomechanical Analysis Results Using Different Musculoskeletal Models for Children With Cerebral Palsy. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1217918>
- McConnochie, G., Fox, A., Bellenger, C. R., & Thewlis, D. (2025). Optimal Control Simulations Tracking Wearable Sensor Signals Provide Comparable Running Gait Kinematics to Marker-Based Motion Capture. *Peerj*, 13, e19035. <https://doi.org/10.7717/peerj.19035>
- Mittal, M. (2025). *Isaac Lab: A GPU-Accelerated Simulation Framework for Multi-Modal Robot Learning*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2511.04831>
- Sari, M., & Asmendri. (2020). *Penelitian Kepustakaan (Library Research) dalam Penelitian Pendidikan IPA*. 6(1), 41–53.
- Sellberg, C., Nazari, Z., & Solberg, M. (2024). Virtual Laboratories in STEM Higher Education: A Scoping Review. *Njsre*, 2. <https://doi.org/10.23865/njsre.v2.5766>
- Tiwari, A. K., Sinha, P. P., Prasad, J., Badhyal, S., & Joseph, S. (2024). Teaching Introductory Biomechanics Course in Low Resource Environment. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 54(1), 58–85. <https://doi.org/10.1177/03064190241272568>
- Tong, W. (2025). Innovation in Dance Teaching Based on Virtual Reality Technology. *International Journal of Web-Based Learning and Teaching Technologies*, 20(1), 1–19. <https://doi.org/10.4018/ijwltt.389874>
- Wang, H., Basu, A., Durandau, G., & Sartori, M. (2023). A Wearable Real-Time Kinetic Measurement Sensor Setup for Human Locomotion. *Wearable Technologies*, 4. <https://doi.org/10.1017/wtc.2023.7>
- Zhong, Y. (2025). A Review of Reviews on Virtual Reality in Educational Context: Constraints, Implications, and Research Agendas. *Journal of Educational Computing Research*, 64(2), 439–492. <https://doi.org/10.1177/07356331251396405>