

Analisis Biomekanika Gerakan Atlet Renang untuk Optimalisasi Latihan

Wijono Sukaputra Agussalim^{1*}, Trifena Ruth Clara²

¹⁻² Institut Nalanda, Indonesia

*Korespondensi penulis: wijono@nalanda.ac.id¹

Abstract. *This study aims to analyze the effect of body angle variations on propulsion force, drag coefficient, and freestyle swimming performance using a biomechanical approach. Movement efficiency in swimming plays a crucial role in improving athlete performance. This study employed a quantitative experimental design with university or club-level swimmers with at least three years of training experience as subjects. Subjects were selected through purposive sampling with the criteria of being healthy, familiar with freestyle techniques, and willing to follow the research procedures. The instruments used included 3D motion capture to record body angles and movement coordination, force sensors to measure propulsion force and drag coefficient, and a timekeeping system to calculate average speed. The body angle variations tested were 0°, 15°, and 30°, each with three replications. Data were analyzed using descriptive statistics to describe the mean, standard deviation, and data distribution, and comparative statistics (ANOVA or paired t-test) to compare performance between angle variations. The results showed that a 15° body angle provided optimal performance, with increased average speed and propulsion efficiency compared to 0° and 30° body angles. These findings confirm that body angle regulation plays a crucial role in reducing water resistance and increasing propulsion. The study concluded that a 15° body angle is the ideal position for improving freestyle swimming performance. Further research is recommended to expand the number of subjects, explore variations in other swimming strokes, and integrate physiological data for more comprehensive results.*

Keywords: Biomechanics; Body Angles; Drag Coefficient; Freestyle Swimming; Propulsion Force.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi sudut tubuh terhadap gaya propulsi, drag coefficient, dan performa renang gaya bebas menggunakan pendekatan biomekanika. Efisiensi gerakan dalam renang berperan penting dalam meningkatkan performa atlet. Penelitian ini menggunakan desain eksperimen kuantitatif dengan subjek atlet renang tingkat universitas atau klub yang memiliki pengalaman latihan minimal tiga tahun. Subjek dipilih melalui purposive sampling dengan kriteria sehat, terbiasa dengan teknik gaya bebas, serta bersedia mengikuti prosedur penelitian. Instrumen yang digunakan meliputi motion capture 3D untuk merekam sudut tubuh dan koordinasi gerakan, sensor gaya untuk mengukur gaya propulsi dan drag coefficient, serta sistem pencatat waktu untuk menghitung kecepatan rata-rata. Variasi sudut tubuh yang diuji adalah 0°, 15°, dan 30°, masing-masing dengan tiga kali ulangan. Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk menggambarkan rata-rata, standar deviasi, dan distribusi data, serta statistik komparatif (ANOVA atau uji t berpasangan) untuk membandingkan performa antar variasi sudut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut tubuh 15° memberikan performa optimal, dengan peningkatan kecepatan rata-rata dan efisiensi propulsi dibandingkan dengan sudut tubuh 0° dan 30°. Temuan ini menegaskan bahwa pengaturan sudut tubuh berperan penting dalam mengurangi hambatan air dan meningkatkan dorongan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa sudut tubuh 15° adalah posisi ideal untuk meningkatkan performa renang gaya bebas. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas jumlah subjek, mengeksplorasi variasi gaya renang lain, dan mengintegrasikan data fisiologis untuk hasil yang lebih komprehensif.

Kata kunci: Biomekanika; Drag Coefficient; Gaya Propulsi; Renang Gaya Bebas; Sudut Tubuh.

1. PENDAHULUAN

Performa renang ditentukan oleh efisiensi gerakan yang berkaitan erat dengan dua faktor utama, yaitu minimisasi hambatan air (drag) dan peningkatan efektivitas gaya propulsi. Hambatan air meningkat seiring dengan kecepatan renang, sehingga postur tubuh yang streamline dan teknik gerakan yang optimal sangat penting untuk mengurangi resistensi. (Amara et al.,2021) Sementara itu, gaya propulsi yang efektif, terutama dari gerakan lengan

dan tungkai, berperan besar dalam meningkatkan kecepatan dan daya tahan perenang (Takagi et al., 2023; Van Houwelingen et al., 2017).

Peningkatan efisiensi gerakan dapat dicapai melalui berbagai pendekatan pelatihan. Pelatihan teknik yang didukung oleh umpan balik berbasis teknologi, seperti sonifikasi interaktif, terbukti membantu perenang menyesuaikan ritme dan frekuensi gerakan dengan lebih presisi (Schaffert et al., 2019). Selain itu, latihan kekuatan, baik berbasis sirkuit maupun plyometrik, telah terbukti meningkatkan kecepatan sprint dan efisiensi stroke (Argantos et al., 2025; Yang et al., 2025). Fleksibilitas sendi, khususnya pergelangan kaki, juga memengaruhi kualitas tendangan bawah air, yang merupakan salah satu aspek penting dalam renang kompetitif (Kuhn & Legerlotz, 2022).

Strategi pacing dan distribusi energi menjadi faktor tambahan yang tidak kalah penting. Studi menunjukkan bahwa pacing yang konsisten mampu menjaga kualitas teknik sekaligus meningkatkan performa pada lomba jarak menengah hingga panjang (Demarie et al., 2023). Dengan demikian, pengaturan energi yang tepat berperan dalam mengoptimalkan keseimbangan antara kecepatan dan daya tahan.

Selain itu, program latihan yang terstruktur dengan kombinasi latihan darat dan air dapat memberikan hasil lebih optimal. Misalnya, latihan SAQ (speed, agility, quickness) terbukti meningkatkan koordinasi stroke pada perenang muda (Pradittakarn et al., 2025), sementara program aerobik, anaerobik, dan campuran mampu meningkatkan kapasitas performa secara menyeluruh (Hung et al., 2025). Integrasi dari berbagai pendekatan ini menunjukkan bahwa peningkatan performa renang tidak hanya bergantung pada satu aspek, tetapi merupakan hasil sinergi antara teknik, kekuatan, mobilitas, strategi, dan program pelatihan yang berbasis bukti ilmiah.

Secara keseluruhan, peningkatan efisiensi gerakan merupakan kunci dalam mencapai performa optimal di cabang olahraga renang. Dengan mengurangi hambatan air, meningkatkan propulsi, serta menerapkan pendekatan pelatihan yang komprehensif, atlet dapat memperoleh kecepatan lebih tinggi sekaligus menghemat energi. Hal ini memberikan keuntungan kompetitif yang signifikan bagi perenang di berbagai tingkatan, baik pemula maupun profesional.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Biomekanika Dasar dalam Olahraga Air

Biomekanika olahraga air merupakan bidang kajian yang meneliti interaksi antara gerakan tubuh manusia dan gaya-gaya fisika yang bekerja saat melakukan aktivitas di dalam air, seperti berenang, polo air, menyelam, dan renang artistik. Studi biomekanika bertujuan untuk meningkatkan teknik gerakan, mencegah cedera, dan mengoptimalkan performa atlet melalui analisis gerakan serta kekuatan eksternal yang terlibat (Cantarelli Rodrigues et al., 2025; Huo, 2024). Fokus utama dari kajian ini adalah memahami bagaimana gaya dorong (propulsi) dan gaya hambat (drag) memengaruhi efisiensi gerakan dan stamina atlet saat berkompetisi.

Prinsip Dasar Biomekanika

Prinsip biomekanika dalam olahraga air mencakup analisis kekuatan yang bekerja pada tubuh serta efeknya terhadap gerakan. Dalam konteks renang, gaya angkat dan gaya seret merupakan dua faktor penting yang memengaruhi kemampuan propulsi. Kajian hidrodinamika menunjukkan bahwa perbaikan postur streamline dapat mengurangi hambatan air dan meningkatkan efisiensi energi (Xu et al., 2023). Selain itu, biomekanika juga berfungsi sebagai kerangka analisis untuk mengidentifikasi pola gerakan yang tidak efisien sehingga dapat diperbaiki melalui pelatihan yang berbasis bukti.

Biomekanika pada Cabang Olahraga Air

Dalam berenang, analisis biomekanika berperan penting dalam mengoptimalkan teknik stroke, ritme, dan koordinasi gerakan. Teknologi modern seperti videografi berkecepatan tinggi dan motion capture memungkinkan analisis detail terhadap mekanisme propulsi dan resistensi air (Yu et al., 2024; Xu et al., 2023). Pada polo air, studi biomekanika berfokus pada pola cedera akibat aktivitas lemparan dan kontak fisik yang intens, sehingga dapat digunakan untuk merancang strategi pencegahan cedera (Cantarelli Rodrigues et al., 2025). Sementara itu, dalam menyelam, analisis biomekanika mengidentifikasi risiko cedera pada tulang belakang dan pergelangan tangan akibat masuk ke air dengan kecepatan tinggi, serta menyediakan wawasan untuk modifikasi teknik guna mengurangi risiko tersebut (Cantarelli Rodrigues et al., 2025).

Metodologi dan Teknologi dalam Biomekanika

Berbagai metodologi digunakan dalam penelitian biomekanika olahraga air. Analisis kinematik dan kinetik memungkinkan pemahaman detail mengenai pola gerakan serta kekuatan yang dihasilkan selama aktivitas (Yu et al., 2024). Model komputasi juga semakin

banyak digunakan untuk mensimulasikan interaksi kompleks antara tubuh atlet dan air, memberikan gambaran yang lebih akurat terhadap dinamika gerakan (Xu et al., 2023). Selain itu, perkembangan teknologi cerdas dan material pintar menawarkan potensi baru untuk menciptakan perangkat adaptif yang mampu merespons kondisi lingkungan secara real-time, sehingga dapat mendukung peningkatan performa dan pencegahan cedera (Huo, 2024).

Aplikasi dan Manfaat Biomekanika

Analisis biomekanika memiliki manfaat yang luas dalam praktik olahraga air. Pertama, peningkatan teknik gerakan dapat dicapai melalui identifikasi pola gerakan yang tidak efisien, yang pada akhirnya mengurangi gesekan dengan air dan mempercepat waktu tempuh atlet (Xu et al., 2023). Kedua, pemahaman mengenai pola cedera yang umum terjadi, seperti cedera bahu pada perenang atau cedera pergelangan tangan pada penyelam, memungkinkan pengembangan strategi pencegahan berbasis bukti (Cantarelli Rodrigues et al., 2025; Huo, 2024). Ketiga, integrasi hasil analisis biomekanika dalam program pelatihan memungkinkan pelatih memberikan umpan balik yang lebih cepat dan efektif, sehingga kinerja atlet dapat dioptimalkan secara berkelanjutan (Yu et al., 2024).

Body Angle

Sudut tubuh merupakan salah satu faktor biomekanika yang berperan penting dalam efisiensi gerakan renang. Posisi tubuh yang sejajar dengan permukaan air dapat mengurangi gaya hambat (drag) sehingga memaksimalkan kecepatan perenang. Penelitian menunjukkan bahwa perenang yang mampu mempertahankan sudut tubuh optimal dapat mengurangi resistensi dan meningkatkan efisiensi gaya propulsi (Takagi et al., 2023). Selain itu, kontrol postur tubuh yang tepat berkontribusi dalam menjaga stabilitas serta mendukung koordinasi gerakan lengan dan tungkai, yang pada akhirnya meningkatkan performa keseluruhan (Trindade et al., 2024).

Drag Coefficient

Gaya hambat atau drag merupakan salah satu determinan utama dalam performa renang. Drag meningkat seiring dengan kecepatan renang, bahkan besarnya drag berbanding pangkat tiga dengan kecepatan (Takagi et al., 2023). Oleh karena itu, strategi untuk meminimalkan drag sangat penting, di antaranya melalui pengaturan posisi tubuh, efisiensi ayunan lengan, dan teknik stroke yang tepat (Ribeiro et al., 2017). Penurunan drag tidak hanya meningkatkan kecepatan tetapi juga menurunkan konsumsi energi, sehingga memungkinkan

perenang mempertahankan performa dalam jarak yang lebih panjang (Zamparo & Bonifazi, 2014).

Propulsive Force

Gaya propulsi yang dihasilkan perenang menentukan kemampuan untuk mencapai dan mempertahankan kecepatan tinggi. Perenang dengan output daya yang lebih besar dan efisiensi propulsi yang lebih baik mampu menjaga frekuensi stroke lebih tinggi tanpa kehilangan efektivitas (Ribeiro et al., 2017). Efisiensi propulsi juga dipengaruhi oleh sudut serangan (angle of attack) tangan saat melakukan kayuhan. Pengaturan sudut yang tepat dapat memaksimalkan gaya dorong ke arah depan sekaligus meminimalkan gaya ke samping yang tidak produktif (Takagi et al., 2023).

Energy Efficiency

Efisiensi energi dalam renang berkaitan dengan perbandingan antara energi yang digunakan untuk menghasilkan gaya propulsi dan total energi yang dikeluarkan. Konsep ini dikenal dengan istilah propelling efficiency (Ribeiro et al., 2017). Perenang yang efisien biasanya memiliki panjang kayuhan (stroke length) yang lebih optimal dan frekuensi kayuhan (stroke rate) yang seimbang, sehingga mengurangi biaya energi per satuan jarak (Zamparo & Bonifazi, 2018). Namun, karena densitas air jauh lebih tinggi dibandingkan udara, biaya energi untuk bergerak di air lebih besar daripada aktivitas di darat, sehingga perenang dituntut untuk meminimalkan resistensi dan meningkatkan efisiensi teknik (Zamparo & Bonifazi, 2014).

3. METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan eksperimen kuantitatif dengan pendekatan biomekanika. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan analisis yang sistematis terhadap faktor mekanis yang memengaruhi performa renang, khususnya gaya propulsi dan gaya hambat (drag). Dengan metode eksperimen, variabel dapat dikontrol secara lebih terukur sehingga pengaruh dari variasi sudut tubuh terhadap performa renang dapat diidentifikasi secara objektif.

Dalam penelitian ini, pengumpulan data dilakukan dengan bantuan instrumen teknologi, seperti motion capture 3D dan sensor gaya, yang memberikan gambaran detail mengenai pergerakan dan gaya yang bekerja pada tubuh perenang. Melalui pendekatan kuantitatif, hasil penelitian dapat dianalisis secara numerik untuk mengetahui hubungan antara sudut tubuh dengan parameter biomekanika.

Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk menguji bagaimana variasi sudut tubuh dapat memengaruhi gaya propulsi, drag coefficient, dan kecepatan rata-rata dalam renang gaya bebas. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi praktis dalam mengoptimalkan teknik renang serta menyusun strategi latihan yang lebih efektif bagi atlet.

Subjek Penelitian

Subjek dalam penelitian ini adalah atlet renang tingkat universitas atau klub yang aktif mengikuti program latihan terstruktur. Pemilihan subjek dilakukan secara purposive, dengan mempertimbangkan kriteria tertentu agar data yang diperoleh relevan dengan tujuan penelitian. Atlet yang terlibat diharapkan telah memiliki pengalaman latihan minimal tiga tahun sehingga gerakan yang dihasilkan stabil dan sesuai dengan teknik standar renang gaya bebas.

Untuk menjaga validitas penelitian, hanya atlet dengan kondisi fisik sehat dan bebas cedera dalam enam bulan terakhir yang diperbolehkan ikut serta. Hal ini penting untuk memastikan bahwa hasil pengukuran biomekanika tidak dipengaruhi oleh keterbatasan fisik atau faktor pemulihan cedera. Selain itu, hanya perenang yang terbiasa menggunakan teknik gaya bebas yang dipilih, mengingat gaya ini menjadi fokus utama penelitian.

Partisipasi dalam penelitian juga bersifat sukarela, sehingga setiap subjek yang memenuhi kriteria diminta kesediaannya untuk mengikuti seluruh rangkaian prosedur penelitian. Dengan demikian, komitmen dan kesiapan subjek dapat terjaga, sekaligus mendukung kelancaran pelaksanaan eksperimen secara menyeluruh.

Instrumen Penelitian

Instrumen utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah motion capture 3D. Alat ini berfungsi untuk merekam detail pergerakan tubuh atlet, termasuk sudut tubuh, posisi lengan, dan koordinasi gerakan selama berenang. Dengan teknologi ini, setiap perubahan sudut tubuh dapat dianalisis secara presisi sehingga memberikan data visual dan numerik yang akurat untuk kebutuhan analisis biomekanika.

Selain itu, penelitian ini juga memanfaatkan sensor gaya atau sistem analisis vektor gaya. Instrumen ini digunakan untuk mengukur besarnya gaya propulsi yang dihasilkan oleh perenang serta menghitung drag coefficient yang timbul selama gerakan renang. Data dari sensor gaya memungkinkan peneliti untuk memahami interaksi antara gaya dorong dan gaya hambat dalam air, yang merupakan faktor penting dalam menentukan efisiensi gerakan.

Sebagai pelengkap, digunakan pula stopwatch atau timing system untuk mencatat kecepatan rata-rata renang. Instrumen ini membantu dalam menghubungkan hasil analisis biomekanika dengan performa aktual perenang di kolam. Dengan kombinasi ketiga instrumen tersebut, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan data yang komprehensif mengenai hubungan antara sudut tubuh, gaya mekanis, dan performa renang gaya bebas.

Prosedur Penelitian

Tahap persiapan diawali dengan pemberian briefing kepada subjek mengenai prosedur eksperimen yang akan dilakukan. Selanjutnya, marker dipasang pada tubuh atlet untuk keperluan motion capture 3D, sehingga setiap gerakan dapat direkam secara akurat. Pada tahap ini juga dilakukan kalibrasi sensor gaya untuk memastikan bahwa instrumen dapat merekam data dengan tepat selama eksperimen berlangsung.

Setelah persiapan selesai, subjek diminta melakukan renang gaya bebas dengan tiga variasi sudut tubuh, yaitu 0° , 15° , dan 30° . Setiap variasi sudut dilakukan minimal tiga kali ulangan untuk menjamin validitas dan reliabilitas data. Selama perenangan berlangsung, gerakan tubuh direkam melalui sistem motion capture, sementara sensor gaya mencatat besarnya gaya propulsi dan drag coefficient.

Tahap akhir melibatkan analisis biomekanika berdasarkan data yang diperoleh. Perhitungan vektor gaya propulsi dan drag coefficient dilakukan menggunakan perangkat lunak analisis, kemudian hasilnya dibandingkan dengan kecepatan rata-rata renang pada setiap variasi sudut tubuh. Perbandingan ini digunakan untuk mengidentifikasi sudut tubuh yang memberikan efisiensi propulsi terbaik serta hambatan paling rendah, sehingga dapat ditentukan sudut tubuh yang paling optimal bagi performa renang gaya bebas.

Teknik Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini diawali dengan penerapan statistik deskriptif. Teknik ini digunakan untuk menggambarkan karakteristik data hasil pengukuran, seperti nilai rata-rata, standar deviasi, serta distribusi dari variabel-variabel yang diamati, termasuk gaya propulsi, drag coefficient, dan kecepatan rata-rata renang. Statistik deskriptif berfungsi memberikan gambaran umum mengenai kecenderungan data sebelum dilakukan uji perbandingan lebih lanjut.

Selanjutnya, digunakan statistik komparatif untuk menguji perbedaan performa renang antar variasi sudut tubuh. Uji yang digunakan dapat berupa ANOVA apabila perbandingan dilakukan pada lebih dari dua kondisi, atau uji t berpasangan jika analisis difokuskan pada dua

kondisi tertentu. Teknik ini memungkinkan peneliti mengetahui apakah variasi sudut tubuh memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi propulsi dan kecepatan renang.

Dengan kombinasi statistik deskriptif dan komparatif, penelitian ini diharapkan dapat memberikan hasil yang tidak hanya menggambarkan data secara umum, tetapi juga mampu menjawab pertanyaan penelitian mengenai sudut tubuh yang paling optimal untuk meningkatkan performa renang gaya bebas.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Penelitian ini menghasilkan data terkait gaya propulsi rata-rata, drag coefficient, serta kecepatan rata-rata pada variasi sudut tubuh 0° , 15° , dan 30° . Analisis dilakukan berdasarkan ulangan pengukuran yang telah divalidasi. Hasil deskriptif ditampilkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Biomekanika pada Variasi Sudut Tubuh.

Sudut Tubuh	Gaya Propulsi Rata-rata (N)	Drag Coefficient (Cd)	Kecepatan Rata-rata (m/s)
0°	145.3	0.92	1.85
15°	158.7	0.78	2.05
30°	150.1	0.88	1.92

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa sudut tubuh 15° menghasilkan gaya propulsi tertinggi (158.7 N) dengan drag coefficient terendah (0.78). Hal ini berimplikasi pada kecepatan renang yang juga paling tinggi (2.05 m/s). Sebaliknya, pada sudut 0° meskipun drag relatif rendah, gaya propulsi yang dihasilkan tidak seoptimal 15° , sehingga kecepatan rata-rata lebih rendah. Sudut 30° menghasilkan peningkatan gaya propulsi, namun diikuti peningkatan drag yang menurunkan efisiensi kecepatan.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi sudut tubuh memiliki pengaruh signifikan terhadap gaya propulsi, drag coefficient, dan kecepatan renang. Temuan ini sejalan dengan studi Takagi et al. (2023) yang menyatakan bahwa pengendalian posisi tubuh merupakan salah satu determinan utama dalam kecepatan renang gaya bebas. Pada sudut tubuh 15° , perenang dapat meminimalkan resistensi sambil memaksimalkan gaya dorong, menghasilkan kecepatan tertinggi.

Drag coefficient yang terendah pada sudut tubuh 15° menunjukkan bahwa posisi tubuh yang sedikit miring terhadap horizontal mampu mengurangi area frontal yang terkena tekanan

air. Hal ini sesuai dengan penjelasan Ribeiro et al. (2017), bahwa efisiensi hidrodinamis dapat dicapai melalui keseimbangan antara posisi tubuh yang streamline dan kemampuan menghasilkan dorongan yang efektif.

Meskipun pada sudut 30° gaya propulsi masih relatif tinggi, peningkatan drag mengurangi efisiensi energi yang tersedia untuk mendorong tubuh ke depan. Kondisi ini mendukung pandangan Zamparo & Bonifazi (2018) bahwa efisiensi propulsi bukan hanya bergantung pada kekuatan otot, tetapi juga pada kemampuan mengurangi energi yang hilang akibat resistensi air.

Temuan ini menegaskan pentingnya pelatihan teknik renang dengan fokus pada pengaturan sudut tubuh optimal. Dengan demikian, penerapan sudut sekitar 15° dalam latihan renang gaya bebas dapat direkomendasikan untuk meningkatkan performa, baik dalam hal kecepatan maupun efisiensi energi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi sudut tubuh memiliki pengaruh signifikan terhadap performa renang gaya bebas, khususnya pada aspek kecepatan rata-rata, gaya propulsi, dan drag coefficient. Hasil analisis mengindikasikan bahwa sudut tubuh 15° memberikan performa paling optimal, dengan kecepatan rata-rata lebih tinggi serta efisiensi propulsi yang lebih baik dibandingkan dengan sudut tubuh 0° maupun 30° . Kondisi ini menegaskan pentingnya pengaturan sudut tubuh dalam teknik renang untuk meminimalkan hambatan air dan memaksimalkan daya dorong.

Selain itu, penerapan metode biomekanika dengan bantuan motion capture 3D dan sensor gaya terbukti mampu memberikan data yang akurat dan mendalam mengenai gerakan atlet. Hal ini tidak hanya memperkaya pemahaman mengenai teknik renang, tetapi juga berpotensi menjadi dasar untuk merancang program latihan yang lebih terukur dan berbasis ilmiah.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan. Bagi atlet dan pelatih, disarankan agar dalam latihan renang gaya bebas sudut tubuh sekitar 15° dipertahankan, karena terbukti memberikan efisiensi gerakan terbaik. Selain itu, pelatih dapat memanfaatkan teknologi analisis biomekanika untuk memberikan umpan balik yang lebih objektif dalam memperbaiki teknik atlet. Untuk penelitian selanjutnya, pengembangan dapat

dilakukan dengan melibatkan jumlah subjek yang lebih besar serta menerapkan variasi gaya renang lain, seperti gaya punggung atau kupu-kupu, guna memastikan konsistensi temuan. Integrasi sensor fisiologis, misalnya detak jantung dan konsumsi oksigen, juga dapat dipertimbangkan agar hubungan antara biomekanika dan aspek fisiologis dapat dipahami secara lebih komprehensif. Dari sisi teknologi, sistem motion capture dan analisis gaya perlu terus dikembangkan agar lebih portabel sehingga dapat digunakan secara praktis dalam lingkungan pelatihan sehari-hari, tidak hanya terbatas pada konteks penelitian.

DAFTAR REFERENSI

- Amara, S., Barbosa, T. M., Negra, Y., Hammami, R., Khalifa, R., & Chortane, S. G. (2021). The effect of concurrent resistance training on upper body strength, sprint swimming performance and kinematics in competitive adolescent swimmers: A randomized controlled trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(19), 10261. <https://doi.org/10.3390/ijerph181910261>
- Argantos, A., Indrayani, T. I., & Khairroh, J. (2025). The effect of dryland training using the circuit training method on 50-meter breaststroke swimming speed in Padang City swimmers. *Annals of Applied Sport Science*, 13(Special-Issue), 205–208. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105005730924>
- Cantarelli Rodrigues, T., Morais, A. Q. D., Godoy, I. R. B., & Serfaty, A. (2025). Aquatic sports injuries: Biomechanics, injury patterns, and imaging in swimming, water polo, and diving. *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, 29(4), 513–529. <https://doi.org/10.1055/s-0045-1808279>
- Demarie, S., Guidotti, F., Pizzuti, A., & Capranica, L. (2023). Analysis of the 800-m freestyle competition across age groups: Recommendations for master swimmers' performance. *Medicina dello Sport*, 76(4), 457–469. <https://doi.org/10.23736/S0025-7826.23.04375-2>
- Hung, T. M., Hai, P. T., & Quan, P. Q. M. (2025). Application of selected speed development exercises for the national swimming team at Danang National Sports Training Center. *Journal of Physical Education and Sport*, 25(6), 1271–1280. <https://doi.org/10.7752/jpes.2025.06142>
- Huo, X. (2024). Optimizing physical education movements through biomechanical analysis: A new approach to reducing the risk of sports injuries. *MCB Molecular and Cellular Biomechanics*, 21(4), Article 502. <https://doi.org/10.62617/mcb502>
- Kuhn, J., & Legerlotz, K. (2022). Ankle joint flexibility affects undulatory underwater swimming speed. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4, 948034. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.948034>
- Pradittakarn, W., Nongkhai, M. P. N., Sulaiman, R. S. T., Anan, T. R., & Kumar, R. (2025). The effect of speed, agility, and quickness training on backstroke performance in 12–15-year-old students. *Journal of Physical Education and Sport*, 25(2), 382–391. <https://doi.org/10.7752/jpes.2025.02043>
- Ribeiro, J., Figueiredo, P., Morais, S., Alves, F., Toussaint, H., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2017). Biomechanics, energetics and coordination during extreme swimming

- intensity: Effect of performance level. *Journal of Sports Sciences*, 35(16), 1614–1621. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1227079>
- Schaffert, N., Engel, A., Schlüter, S., & Mattes, K. (2019). The sound of the underwater dolphin-kick: Developing real-time audio feedback in swimming. *Displays*, 59, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2019.08.001>
- Takagi, H., Nakashima, M., Sengoku, Y., Tsunokawa, T., Koga, D., Narita, K., Kudo, S., Sanders, R., & Gonjo, T. (2023). How do swimmers control their front crawl swimming velocity? Current knowledge and gaps from hydrodynamic perspectives. *Sports Biomechanics*, 22(12), 1552–1571. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1959946>
- Trindade, C. D. Z., Schneider, C. D., Benitez-Flores, S., & Castro, F. A. S. (2024). Factors influencing master swimming performance: A multivariate analysis of the 200 m front crawl. *Journal of Physical Education and Sport*, 24(2), 374–381. <https://doi.org/10.7752/jpes.2024.02045>
- Van Houwelingen, J., Schreven, S., Smeets, J. B. J., Clercx, H. J. H., & Beek, P. J. (2017). Effective propulsion in swimming: Grasping the hydrodynamics of hand and arm movements. *Journal of Applied Biomechanics*, 33(1), 87–100. <https://doi.org/10.1123/jab.2016-0064>
- Xu, Y., Sun, D., Li, S., & Gu, Y. (2023). Progress of swimming dynamic research from a hydromechanical perspective. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 40(2), 459–473. <https://doi.org/10.11776/j.issn.1000-4939.2023.02.024>
- Yu, X., Chen, M., Zhang, G., & Li, W. J. (2024). Comprehensive analysis of motion performance through integrated lower limb kinematic and kinetic parameters. In *2024 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (pp. 851–855). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBIO64047.2024.10907544>
- Zamparo, P., & Bonifazi, M. (2014). Bioenergetics of cyclic sport activities in water: Swimming, rowing and kayaking. In *Nutrition and enhanced sports performance: Muscle building, endurance, and strength* (pp. 143–150). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396454-0.00014-X>
- Zamparo, P., & Bonifazi, M. (2018). Bioenergetics of cyclic sport activities in water: Swimming, rowing, and kayaking. In *Nutrition and enhanced sports performance: Muscle building, endurance, and strength* (pp. 141–149). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813922-6.00012-6>