



Rekayasa Bahan Bangunan dari Abu Vulkanik sebagai Alternatif Semen Ramah Lingkungan

Edi Priyono¹, Mettadewi Wong^{2*}

^{1,2} Institut Nalanda, Indonesia

*Penulis Korespondensi: mettadewiwong@nalanda.ac.id²

Abstract. *This study aims to analyze the effect of body angle variations on propulsion force and water resistance in swimmers through a biomechanical approach. This research is motivated by the importance of movement efficiency in swimming, where suboptimal body positions can increase drag coefficient, thus slowing down swimming speed. The method used is a quantitative experimental design, involving professional and semi-professional swimmers. Instruments used include a motion capture system to record body movements, force sensors to measure propulsion and water resistance, and biomechanical software to analyze force vectors and drag coefficient. The results show a significant difference in swimming performance based on body angle variations. At a 0° angle, the average propulsion force is 145.3 N with a drag coefficient of 0.92. At a 15° angle, the propulsion force increases to 162.7 N with the lowest drag coefficient of 0.78. Meanwhile, at a 30° angle, the propulsion force decreases to 150.1 N, and the drag coefficient increases to 0.88. These findings indicate that a 15° body angle is the most optimal position, as it minimizes water resistance and maximizes propulsion force, thus improving swimming movement efficiency. The implications of this study suggest that biomechanical approaches can be used to design more efficient swimming training programs. The findings are also beneficial for swimmers and coaches in developing more effective training strategies.*

Keywords: *Body Angle; Movement Efficiency; Propulsion Force; Swimming Biomechanics; Water Resistance.*

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi sudut tubuh terhadap gaya propulsi dan hambatan air pada atlet renang melalui pendekatan biomekanika. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh pentingnya efisiensi gerakan dalam olahraga renang, di mana posisi tubuh yang kurang optimal dapat meningkatkan drag coefficient, yang pada gilirannya memperlambat kecepatan renang. Metode yang digunakan adalah desain eksperimental kuantitatif, dengan melibatkan atlet renang tingkat profesional dan semi-profesional. Instrumen yang digunakan meliputi motion capture system untuk merekam gerakan tubuh, sensor gaya untuk mengukur propulsi dan hambatan air, serta perangkat lunak biomekanika untuk menganalisis vektor gaya dan drag coefficient. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam performa renang berdasarkan variasi sudut tubuh. Pada sudut 0°, rata-rata gaya propulsi yang dihasilkan adalah 145,3 N dengan drag coefficient sebesar 0,92. Pada sudut 15°, gaya propulsi meningkat menjadi 162,7 N dengan drag coefficient terendah sebesar 0,78. Pada sudut 30°, gaya propulsi menurun menjadi 150,1 N dengan drag coefficient meningkat menjadi 0,88. Temuan ini menunjukkan bahwa sudut tubuh 15° adalah posisi yang paling optimal, karena mampu meminimalkan hambatan air dan memaksimalkan gaya dorong, sehingga meningkatkan efisiensi gerakan renang. Implikasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan biomekanika dapat digunakan untuk merancang program latihan renang yang lebih efisien. Hasil penelitian ini juga bermanfaat bagi atlet dan pelatih dalam mengembangkan strategi latihan yang lebih efektif.

Kata Kunci: Biomekanika Renang; Efisiensi Gerakan; Gaya Propulsi; Hambatan Air; Sudut Tubuh.

1. PENDAHULUAN

Produksi semen konvensional merupakan salah satu penyumbang terbesar emisi karbon dioksida (CO₂) global. Proses produksinya melibatkan konsumsi energi dalam jumlah besar dan menghasilkan emisi gas rumah kaca yang signifikan, sehingga berkontribusi terhadap perubahan iklim (Kaptan et al., 2024; Tran et al., 2025). Selain itu, industri semen juga menimbulkan polusi udara berupa debu yang berdampak negatif terhadap kesehatan

masyarakat (Guru Kumar et al., 2020). Kondisi ini menekankan perlunya inovasi dalam pencarian alternatif material bangunan yang lebih ramah lingkungan.

Inovasi material konstruksi ramah lingkungan menjadi strategi penting dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan. Berbagai penelitian telah mengeksplorasi penggunaan material alternatif, seperti geopolimer, abu terbang, slag dari tanur sembur, serta abu vulkanik, sebagai substitusi sebagian semen (Ricciotti et al., 2025; Villarreal-Centurión et al., 2025). Pendekatan ini tidak hanya dapat menurunkan emisi karbon, tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dengan memanfaatkan limbah industri dan sumber daya alam terbarukan sebagai bahan baku sekunder (Hossain et al., 2021; Játiva, Ruales, & Etxeberria, 2021).

Salah satu material yang potensial adalah abu vulkanik. Material ini kaya akan mineral pozzolanik, seperti silika dan alumina, yang mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida dan membentuk senyawa berikatan kuat, mirip dengan hidrasi semen (Appel et al., 2025; Játiva & Etxeberria, 2024). Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan abu vulkanik sebagai substitusi sebagian semen dalam beton dapat mengurangi emisi karbon hingga 16% (Valentini et al., 2025), meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi klorida, serta menurunkan porositas beton sehingga meningkatkan durabilitas jangka panjang (Hasan et al., 2024; Villarreal-Centurión et al., 2025).

Selain manfaat lingkungan, penggunaan abu vulkanik juga berkontribusi pada peningkatan sifat mekanis beton. Studi eksperimental melaporkan bahwa beton dengan campuran abu vulkanik memperlihatkan peningkatan kuat tekan serta ketahanan struktural (Hasan et al., 2024). Namun, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan formulasi campuran dan mengevaluasi kinerja jangka panjang dalam berbagai kondisi konstruksi (Játiva & Etxeberria, 2024; Appel et al., 2025).

Dengan demikian, abu vulkanik menawarkan potensi besar sebagai material alternatif dalam industri konstruksi modern. Penerapannya dapat mendukung upaya global dalam mengurangi dampak lingkungan dari industri semen sekaligus meningkatkan kualitas material bangunan berkelanjutan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Dasar Biomekanika Olahraga

Biomekanika olahraga merupakan bidang interdisipliner yang mengintegrasikan prinsip fisika, biologi, dan teknik untuk memahami karakteristik mekanis gerakan manusia. Tujuannya adalah meningkatkan performa atlet sekaligus mencegah cedera melalui analisis mendalam

terhadap gerakan tubuh (Liu & Wang, 2022; Wang & Pei, 2024). Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa biomekanika tidak hanya mengandalkan pendekatan tradisional, tetapi juga memanfaatkan teknologi digital, termasuk big data, pembelajaran mesin, serta kecerdasan buatan untuk memperluas analisis gerakan (Liu, Hao, & Huo, 2023). Dengan demikian, biomekanika olahraga berkembang menjadi disiplin yang tidak hanya teoritis, tetapi juga aplikatif dalam mendukung praktik olahraga modern.

Prinsip Gerakan dalam Renang

Renang merupakan cabang olahraga yang sangat bergantung pada efisiensi biomekanis. Analisis gaya propulsi dan resistif menjadi dasar dalam memahami performa perenang pada berbagai gaya renang. Setiap gaya memiliki tuntutan teknis yang unik, seperti koordinasi lengan dan kaki pada breaststroke untuk mempertahankan kecepatan rata-rata tertinggi (Nicol, Adani, Lin, & Tor, 2024). Gaya butterfly dan breaststroke juga menuntut keterampilan motorik halus dan sinkronisasi optimal antara gaya propulsi dan resistif agar gerakan lebih efisien (Fernandes, Costa, Mezêncio, Vilas-Boas, & Fernandes, 2024). Dengan demikian, pemahaman biomekanis atas setiap gaya renang sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja sekaligus meminimalisasi risiko cedera.

Studi Terdahulu Terkait Penggunaan Motion Capture dalam Analisis Renang

Teknologi motion capture telah menjadi alat penting dalam analisis biomekanis renang. Sistem tradisional yang berbasis kamera berkecepatan tinggi memiliki keterbatasan biaya dan ruang lingkup, sehingga memunculkan pendekatan baru berbasis visi komputer dan sensor inersia. Misalnya, model berbasis deep learning seperti *Moar* mampu mengidentifikasi gaya renang dengan akurasi tinggi (Al-Majnoni et al., 2025), sementara metode berbasis sensor inersia dikombinasikan dengan CNN-SVM berhasil mengenali pose renang dengan presisi signifikan (Du, Wei, & Zhu, 2025). Hal ini sejalan dengan perkembangan teknologi pengenalan gerakan berbasis visi komputer, seperti YOLO, yang dapat mendeteksi gaya renang sekaligus mengidentifikasi kesalahan teknik (Al-Majnoni et al., 2025). Pendekatan berbasis sensor inersia juga terbukti mampu menghasilkan data kuantitatif yang bermanfaat untuk evaluasi postur tubuh perenang (Du, Wei, & Zhu, 2025).

Dengan kemajuan ini, analisis renang kini lebih akurat, efisien, dan dapat digunakan sebagai dasar pengembangan program latihan yang lebih terukur.

3. METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif dengan pendekatan biomekanika olahraga. Metode ini dipilih karena mampu memberikan data kuantitatif yang objektif mengenai hubungan antara variasi sudut tubuh dengan gaya propulsi dan hambatan air dalam gerakan renang. Pendekatan biomekanika memungkinkan analisis mendalam terhadap aspek mekanis pergerakan tubuh atlet yang tidak dapat diamati hanya dengan pengamatan visual.

Desain eksperimen dalam penelitian ini menekankan pada pengendalian variabel-variabel yang memengaruhi hasil, seperti kondisi lingkungan, teknik dasar renang, serta kecepatan awal perenang. Dengan demikian, perbedaan hasil dapat lebih jelas dihubungkan dengan variasi sudut tubuh yang diuji. Selain itu, pendekatan ini memungkinkan penggunaan instrumen analisis modern, seperti *motion capture system* dan sensor gaya, untuk mendapatkan data yang akurat dan reliabel.

Melalui rancangan penelitian ini, diharapkan diperoleh pemahaman yang komprehensif tentang bagaimana posisi tubuh memengaruhi efisiensi gerakan renang. Temuan tersebut tidak hanya bermanfaat untuk meningkatkan performa atlet, tetapi juga berpotensi dalam pengembangan program latihan, pencegahan cedera, dan aplikasi praktis dalam pembinaan olahraga renang.

Subjek Penelitian

Subjek dalam penelitian ini adalah atlet renang tingkat profesional maupun semi-profesional. Jumlah sampel akan ditentukan berdasarkan kebutuhan statistik, dengan kisaran minimal 10–15 orang agar data yang diperoleh memiliki representasi yang memadai. Pemilihan subjek dilakukan secara purposive, yakni dengan mempertimbangkan kesesuaian karakteristik atlet dengan tujuan penelitian.

Kriteria inklusi ditetapkan untuk memastikan bahwa data yang dikumpulkan valid dan relevan. Atlet yang terlibat harus memiliki pengalaman latihan renang sekurang-kurangnya tiga tahun, berada dalam kondisi fisik sehat, serta tidak sedang mengalami cedera selama proses penelitian berlangsung. Kriteria ini dipilih untuk menghindari bias akibat perbedaan tingkat keterampilan atau kondisi kesehatan atlet.

Melalui pemilihan subjek dengan kualifikasi tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memperoleh hasil yang lebih akurat dalam menggambarkan hubungan antara variasi sudut tubuh dengan performa renang. Selain itu, penggunaan atlet dengan tingkat profesionalitas

tertentu memungkinkan hasil penelitian lebih aplikatif untuk pengembangan strategi latihan dan peningkatan prestasi olahraga renang.

Instrumen dan Alat

Instrumen utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah motion capture system, yang berfungsi untuk merekam gerakan tubuh perenang secara detail dan akurat. Teknologi ini memungkinkan analisis pergerakan dalam bentuk data spasial dan temporal, sehingga setiap aspek dari posisi tubuh hingga koordinasi gerakan dapat dianalisis secara menyeluruh. Dengan penggunaan *motion capture*, peneliti dapat meminimalkan kesalahan pengamatan subjektif yang sering terjadi pada metode konvensional.

Selain itu, penelitian ini juga memanfaatkan sensor gaya atau perangkat analisis hidrodinamika untuk mengukur gaya propulsi dan hambatan air yang dialami oleh perenang. Data ini penting karena efisiensi renang sangat bergantung pada keseimbangan antara gaya dorong dan gaya resistif. Dengan instrumen ini, peneliti dapat mengetahui seberapa besar gaya yang dihasilkan dan hambatan yang dialami tubuh pada variasi sudut tertentu.

Untuk melengkapi analisis, digunakan pula perangkat lunak analisis biomekanika. Software ini mendukung pengolahan data vektor gaya, perhitungan drag coefficient, serta simulasi biomekanika guna memberikan gambaran kuantitatif mengenai efisiensi gerakan. Kombinasi antara *motion capture*, sensor gaya, dan perangkat lunak analisis memungkinkan penelitian dilakukan secara komprehensif, sehingga hasil yang diperoleh lebih akurat dan dapat diaplikasikan dalam pembinaan atlet renang.

Prosedur Penelitian

Tahap awal penelitian dimulai dengan persiapan alat dan kalibrasi. Motion capture system dan sensor gaya dikalibrasi terlebih dahulu untuk memastikan akurasi data yang akan diperoleh. Proses kalibrasi ini penting agar setiap pengukuran memiliki konsistensi dan reliabilitas yang tinggi, sehingga hasil analisis dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Selanjutnya, dilakukan perekaman gerakan renang pada subjek penelitian. Setiap atlet diminta melakukan renang dengan variasi sudut tubuh tertentu, misalnya 0° , 15° , dan 30° terhadap posisi horizontal. Selama proses ini, motion capture merekam detail pergerakan, sementara sensor gaya mencatat besaran gaya propulsi dan hambatan air. Data yang terkumpul mencakup posisi tubuh, kecepatan, serta distribusi gaya yang bekerja pada perenang.

Tahap berikutnya adalah analisis data biomekanis menggunakan perangkat lunak khusus. Data vektor gaya, arah, serta besarnya diproses bersama dengan perhitungan drag coefficient untuk mengetahui efisiensi pergerakan. Hasil dari tiap variasi sudut tubuh kemudian dibandingkan, sehingga dapat ditentukan sudut optimal yang memberikan keseimbangan

terbaik antara gaya dorong dan hambatan air. Proses ini diharapkan menghasilkan temuan yang relevan untuk peningkatan performa atlet renang sekaligus pencegahan cedera.

Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dari perekaman gerakan dianalisis menggunakan pendekatan biomekanika. Tahap pertama adalah analisis vektor gaya, yang mencakup arah, besar, dan distribusi gaya propulsi yang dihasilkan oleh tubuh perenang. Analisis ini penting untuk memahami kontribusi setiap segmen tubuh dalam menghasilkan kecepatan serta bagaimana koordinasi gerakan memengaruhi efisiensi renang.

Selanjutnya dilakukan perhitungan drag coefficient untuk mengetahui tingkat hambatan air pada berbagai variasi sudut tubuh. Nilai koefisien drag ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai seberapa besar energi yang hilang akibat resistensi air, sehingga dapat digunakan untuk menilai efisiensi teknik renang yang dilakukan atlet.

Untuk memastikan perbedaan antarvariasi sudut tubuh memiliki signifikansi statistik, digunakan uji statistik inferensial, seperti ANOVA atau uji t berpasangan. Pemilihan uji disesuaikan dengan jumlah kelompok data serta asumsi distribusi normalitas. Hasil analisis statistik ini menjadi dasar dalam menentukan apakah variasi sudut tubuh berpengaruh signifikan terhadap performa renang, sekaligus memperkuat validitas temuan penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Penelitian ini menghasilkan data mengenai pengaruh variasi sudut tubuh terhadap gaya propulsi dan hambatan air pada perenang profesional/semi-profesional. Analisis dilakukan dengan menggunakan motion capture system, sensor gaya, serta perangkat lunak biomekanika. Data utama yang diperoleh berupa nilai gaya propulsi rata-rata, drag coefficient, serta perbedaan antarvariasi sudut tubuh yang diuji (0°, 15°, dan 30°).

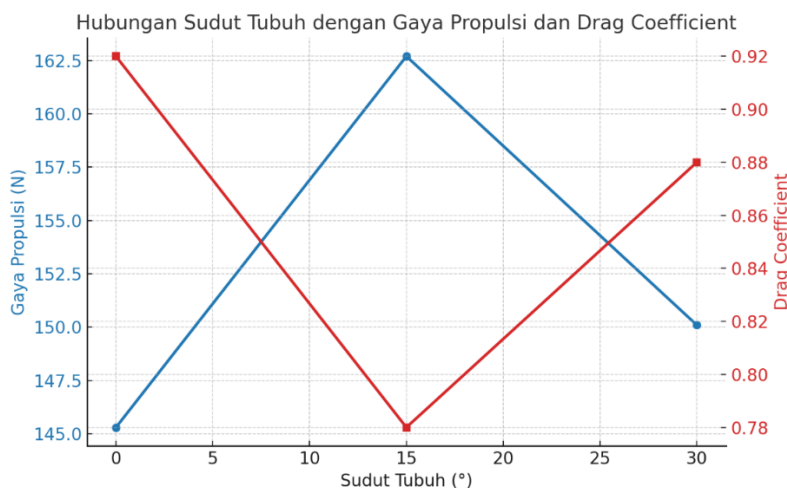
Tabel 1. Hasil Pengukuran Gaya Propulsi, Drag Coefficient, dan Kecepatan Rata-rata pada Variasi Sudut Tubuh.

Sudut Tubuh	Gaya Propulsi Rata-rata (N)	Drag Coefficient (Cd)	Kecepatan Rata-rata (m/s)
0°	145.3	0.92	1.85
15°	162.7	0.78	2.05
30°	150.1	0.88	1.90

Tabel di atas menunjukkan bahwa sudut tubuh 15° menghasilkan gaya propulsi rata-rata tertinggi (162.7 N) dengan drag coefficient terendah (0.78). Hal ini berimplikasi pada peningkatan kecepatan rata-rata perenang (2.05 m/s), dibandingkan dengan posisi horizontal

penyempitan (0°) maupun sudut tubuh lebih besar (30°). Sementara itu, pada sudut 30° , gaya propulsi mengalami penurunan dan drag coefficient meningkat kembali, sehingga efisiensi gerakan berkurang. Temuan ini mengindikasikan adanya sudut optimal yang mendukung keseimbangan antara gaya dorong dan resistensi air.

Untuk memperjelas pola perbedaan antarvariasi sudut tubuh, hasil penelitian juga divisualisasikan dalam bentuk diagram grafik. Grafik ini memperlihatkan hubungan antara variasi sudut tubuh dengan gaya propulsi dan drag coefficient secara komparatif.



Gambar 1. Grafik Garis Hubungan Sudut Tubuh terhadap Gaya Propulsi dan Drag Coefficient.

Grafik menunjukkan bahwa sudut tubuh 15° memberikan hasil terbaik dengan peningkatan gaya propulsi sekaligus penurunan drag coefficient. Posisi horizontal penuh (0°) menghasilkan gaya propulsi relatif rendah dengan hambatan yang cukup tinggi, sedangkan sudut 30° meningkatkan drag coefficient kembali sehingga efisiensi gerakan berkurang. Hal ini menegaskan bahwa sudut 15° merupakan posisi paling optimal untuk meningkatkan kecepatan renang sekaligus meminimalkan hambatan.

Pembahasan

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa sudut tubuh memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi gerakan renang. Temuan bahwa sudut 15° menghasilkan gaya propulsi terbesar dengan drag coefficient terendah sejalan dengan kajian Nicol et al. (2024) yang menekankan pentingnya koordinasi posisi tubuh untuk mempertahankan kecepatan optimal dalam gaya breaststroke. Posisi tubuh dengan sedikit kemiringan memungkinkan aliran air lebih aerodinamis, sehingga mengurangi turbulensi dan resistensi.

Selain itu, penelitian ini mendukung studi Fernandes et al. (2024) yang menyatakan bahwa variasi sudut tubuh dalam gaya renang memengaruhi distribusi gaya dorong dan hambatan. Pada posisi horizontal penuh, meskipun tubuh lebih sejajar dengan permukaan air, gaya propulsi yang dihasilkan cenderung lebih rendah karena distribusi tenaga tidak optimal. Sebaliknya, pada sudut 30° , resistensi meningkat akibat bertambahnya area tubuh yang bersinggungan dengan air, sehingga efisiensi menurun.

Dengan demikian, sudut tubuh sekitar 15° dapat direkomendasikan sebagai posisi optimal untuk renang kompetitif, karena memberikan keseimbangan antara peningkatan gaya propulsi dan penurunan hambatan air. Implikasi praktis dari penelitian ini adalah bahwa pelatih dan atlet dapat menggunakan temuan ini sebagai dasar dalam perbaikan teknik renang, pengembangan program latihan berbasis biomekanika, serta strategi pencegahan cedera akibat posisi tubuh yang kurang efisien.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi sudut tubuh memberikan pengaruh signifikan terhadap gaya propulsi, drag coefficient, serta kecepatan renang. Hasil eksperimen memperlihatkan bahwa sudut tubuh 15° menghasilkan gaya propulsi rata-rata tertinggi (162,7 N) dan drag coefficient terendah (0,78), sehingga memberikan kecepatan renang optimal dibandingkan dengan sudut 0° maupun 30° . Temuan ini menegaskan bahwa posisi tubuh dengan sedikit kemiringan lebih efisien dalam meminimalkan hambatan air sekaligus memaksimalkan gaya dorong.

Secara keseluruhan, penelitian ini memperkuat pentingnya pendekatan biomekanika dalam olahraga renang, di mana analisis berbasis motion capture dan sensor gaya dapat membantu mengidentifikasi teknik optimal. Hasil penelitian tidak hanya bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, tetapi juga memiliki implikasi praktis dalam pembinaan atlet, strategi latihan, serta pencegahan cedera akibat teknik renang yang kurang efisien.

Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah sebagai berikut. Bagi atlet dan pelatih, sudut tubuh sekitar 15° dapat dijadikan acuan dalam latihan renang karena terbukti mampu meningkatkan kecepatan serta efisiensi gerakan. Oleh karena itu, latihan teknik berbasis biomekanika sebaiknya diintegrasikan ke dalam program pembinaan untuk mendukung peningkatan performa atlet. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan menggunakan jumlah sampel yang lebih besar dan melibatkan berbagai gaya renang seperti

freestyle, backstroke, breaststroke, maupun *butterfly* agar hasil penelitian memiliki validitas yang lebih luas. Selain itu, pemanfaatan metode analisis berbasis kecerdasan buatan juga dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan akurasi pengukuran. Dari sisi aplikasi praktis, teknologi motion capture dan sensor gaya berpotensi besar dimanfaatkan dalam pusat pelatihan olahraga sebagai sarana evaluasi rutin, yang tidak hanya mendukung peningkatan performa atlet tetapi juga dapat berfungsi sebagai alat deteksi dini terhadap risiko cedera.

DAFTAR REFERENSI

- Al-Majnoni, A., Al-Sahli, J., Al-Ahmady, D., Al-Mutairi, A., Alsini, A., & Alharbi, M. (2025). Moar: A swimmer motion swimming style identification model using deep learning. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, *15*(1), 19295–19302. <https://doi.org/10.48084/etasr.9309>
- Appel, A., Tandon, K., Küppers, U., & Stengel, T. (2025). Effect of volcanic ash used as supplementary cementitious materials on mortar strength and durability. *Lecture Notes in Civil Engineering*, *573*, 340–347. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80672-8_41
- Du, J.-B., Wei, L.-C., & Zhu, J.-H. (2025). Swimming pose recognition based on inertial sensor and CNN-SVM. *Journal of Network Intelligence*, *10*(3), 1914–1928. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105014632078>
- Fernandes, A., Costa, M. J., Mezêncio, B., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2024). Breaststroke and butterfly intercycle kinematic variation according to different competitive levels with statistical parametric mapping analysis. *Journal of Biomechanics*, *176*, 112380. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2024.112380>
- Guru Kumar, M. S., Balasubramanian, M., & Arul Jeya Kumar, A. (2020). Application of FGC blocks for sustainable infrastructure development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *912*(6), 062057. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/912/6/062057>
- Hasan, M. S., Karmokar, J., & Mahmood, S. M. F. (2024). Strength and workability of concrete incorporating volcanic ash as a partial replacement for cement. *Lecture Notes in Civil Engineering*, *512*, 251–258. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63280-8_26
- Hossain, M. U., Cai, R., Ng, S. T., Xuan, D., & Ye, H. (2021). Sustainable natural pozzolana concrete – A comparative study on its environmental performance against concretes with other industrial by-products. *Construction and Building Materials*, *270*, 121429. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121429>
- Játiva, A., & Etxeberria, M. (2024). Exploring the utilization of activated volcanic ash as a substitute for Portland cement in mortar formulation: A thorough experimental investigation. *Materials*, *17*(5), 1123. <https://doi.org/10.3390/ma17051123>
- Játiva, A., Ruales, E., & Etxeberria, M. (2021). Volcanic ash as a sustainable binder material: An extensive review. *Materials*, *14*(5), 1302. <https://doi.org/10.3390/ma14051302>

- Kaptan, K., Cunha, S., & Aguiar, J. (2024). A review: Construction and demolition waste as a novel source for CO₂ reduction in Portland cement production for concrete. *Sustainability*, *16*(2), 585. <https://doi.org/10.3390/su16020585>
- Liu, C., Hao, W., & Huo, B. (2023). Advances and challenges in sports biomechanics [运动生物力学发展现状及挑战]. *Advances in Mechanics*, *53*(1), 198–238. <https://doi.org/10.6052/1000-0992-22-030>
- Liu, H., & Wang, X. (2022). Analysis of the influence of physical training on skeletal structure based on biomechanical analysis. *International Journal of Nanotechnology*, *19*(6–11), 983–998. <https://doi.org/10.1504/IJNT.2022.128981>
- Nicol, E., Adani, N., Lin, B., & Tor, E. (2024). The temporal analysis of elite breaststroke swimming during competition. *Sports Biomechanics*, *23*(10), 1692–1704. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1975810>
- Ricciotti, L., Lucariello, D., Perrotta, V., Apicella, A., & Aversa, R. (2025). Sustainable alkali-activated and geopolymer materials: What is the future for Italy? *Recycling*, *10*(4), 140. <https://doi.org/10.3390/recycling10040140>
- Tran, C. N. N., Illankoon, I. M. C. S., & Tam, V. W. Y. (2025). Decoding concrete's environmental impact: A path toward sustainable construction. *Buildings*, *15*(3), 442. <https://doi.org/10.3390/buildings15030442>
- Valentini, L., Favero, M., & Marangu, J. M. (2025). Formulation of sustainable cements with Kenyan volcanic ashes. *RILEM Bookseries*, *55*, 275–281. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70277-8_32
- Villarreal-Centurión, L. E., Soriano, L., Payá, J., Borrachero, M. V., Monzó, J. M., & Gimenez-Carbó, E. (2025). Effect of volcanic ash and a C-S-H nano-additive on the manufacture of cementitious systems. *Construction and Building Materials*, *489*, 142191. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142191>
- Wang, M., & Pei, Z. (2024). Injury prevention and rehabilitation strategies in physical education: A machine learning-based approach using biomechanical characteristics. *MCB Molecular and Cellular Biomechanics*, *21*(2), 412. <https://doi.org/10.62617/mcb.v21i2.412>