

## **Efektivitas Latihan Berbasis Sensor IMU dengan Umpan Balik Real-Time terhadap Peningkatan Akurasi, Kecepatan, dan Konsistensi Shooting Sepak Bola pada Mahasiswa PJOK**

Yogi Ferdy Irawan\*

Universitas Ma'arif Nahdlatul Ulama Kebumen, Kebumen, Indonesia

yogiferdian@umnu.ac.id\*

Copyright©2025 by authors. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons

### **Abstrak**

Kemampuan *shooting* merupakan keterampilan fundamental dalam sepak bola yang menentukan produktivitas mencetak gol. Namun, metode latihan konvensional masih mengandalkan umpan balik subjektif dari pelatih tanpa data objektif yang terukur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas latihan berbasis sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) dengan umpan balik *real-time* terhadap peningkatan akurasi, kecepatan, dan konsistensi *shooting* sepak bola pada mahasiswa Pendidikan Jasmani Olahraga dan Kesehatan (PJOK). Metode penelitian menggunakan desain eksperimen *pretest-posttest control group* dengan melibatkan 48 mahasiswa PJOK yang dibagi secara acak menjadi kelompok eksperimen (n=24) dan kelompok kontrol (n=24). Kelompok eksperimen melakukan latihan shooting dengan bantuan sensor IMU yang terpasang pada kaki dan memberikan umpan balik visual melalui aplikasi *smartphone*, sedangkan kelompok kontrol melakukan latihan *shooting* konvensional tanpa teknologi. Program latihan dilaksanakan selama 8 minggu dengan frekuensi 3 kali per minggu. Instrumen pengukuran meliputi *Loughborough Soccer Shooting Test* untuk akurasi, radar *gun Stalker ATS II* untuk kecepatan bola, rubrik observasi untuk teknik biomekanikal, dan *coefficient of variation* untuk konsistensi. Analisis data menggunakan *Analysis of Covariance* (ANCOVA) dengan tingkat signifikansi  $\alpha=0,05$ . Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelompok eksperimen mengalami peningkatan signifikan pada akurasi shooting (19,7% vs 8,3%,  $p<0,001$ ,  $\eta^2=0,412$ ), kecepatan bola (11,2% vs 4,8%,  $p<0,001$ ,  $\eta^2=0,385$ ), kualitas teknik biomekanikal (23,1% vs 9,4%,  $p<0,001$ ,  $\eta^2=0,441$ ), dan konsistensi performa dengan penurunan CV dari 14,2% menjadi 8,7% ( $p<0,001$ ). Kesimpulan penelitian ini adalah latihan berbasis sensor IMU dengan umpan balik *real-time* terbukti efektif meningkatkan seluruh aspek kemampuan shooting sepak bola pada mahasiswa PJOK dengan effect size kategori besar, sehingga dapat direkomendasikan sebagai metode latihan inovatif dalam pendidikan olahraga.

Kata kunci: sensor IMU, umpan balik *real-time*, *shooting* sepak bola, mahasiswa PJOK, teknologi Latihan

### **Abstract**

*Shooting ability is a fundamental skill in soccer that determines goal-scoring productivity. However, conventional training methods still rely on subjective feedback from coaches without measurable objective data. This study aims to analyze the effectiveness of Inertial Measurement Unit (IMU) sensor-based training with real-time feedback on improving accuracy, velocity, and consistency of soccer shooting among Physical Education, Sport and Health (PJOK) students. The research method used a pretest-posttest control group experimental design involving 48 PJOK students randomly divided into experimental group (n=24) and control group (n=24). The experimental group performed shooting training with IMU sensors attached to their feet providing visual feedback through a smartphone application, while the control group performed conventional shooting training without technology. The training program was conducted for 8 weeks with a frequency of 3 times per week. Measurement instruments included the Loughborough Soccer Shooting Test for accuracy, Stalker ATS II radar gun for ball velocity, observation rubric for biomechanical technique, and coefficient of variation for consistency. Data analysis used Analysis of Covariance (ANCOVA) with significance level  $\alpha=0.05$ . The results showed that the experimental group experienced significant improvements in shooting accuracy (19.7% vs 8.3%,  $p<0.001$ ,  $\eta^2=0.412$ ), ball velocity (11.2% vs 4.8%,  $p<0.001$ ,  $\eta^2=0.385$ ), biomechanical technique quality (23.1% vs 9.4%,  $p<0.001$ ,  $\eta^2=0.441$ ), and performance consistency with CV reduction from 14.2% to 8.7% ( $p<0.001$ ). The conclusion of this study is that IMU sensor-based training with real-time feedback is proven effective in improving all aspects of soccer shooting ability among PJOK students with large effect size category, thus can be recommended as an innovative training method in sports education.*

*Keywords: IMU sensor, real-time feedback, soccer shooting, PJOK students, training technology*

### **Pendahuluan**

Sepak bola merupakan cabang olahraga paling populer di dunia dengan lebih dari 270 juta pemain aktif dan 4 miliar penggemar global (FIFA, 2020). Dalam konteks permainan, kemampuan shooting atau menendang bola ke arah gawang menjadi keterampilan teknis yang paling krusial karena menentukan produktivitas tim dalam mencetak gol. Penelitian biomekanika menunjukkan bahwa shooting yang efektif memerlukan koordinasi kompleks dari berbagai komponen gerakan meliputi *approach run* dengan sudut optimal 30-45 derajat, *plant foot placement* sekitar 20-30 sentimeter di samping bola, *backswing* kaki penendang yang maksimal, kontak pada bagian instep dengan titik tengah bola, serta *follow-through* yang halus (Lees et al., 2010; Kellis & Katis, 2007). Namun demikian, kompleksitas gerakan ini menyebabkan banyak pemain mengalami kesulitan dalam menguasai teknik shooting yang benar dan konsisten.

Metode latihan shooting konvensional yang diterapkan di Indonesia umumnya masih mengandalkan pendekatan drill berulang dengan umpan balik subjektif dari pelatih berdasarkan pengamatan visual (Istofian & Amiq, 2016). Pendekatan ini memiliki beberapa keterbatasan

fundamental yang menghambat perkembangan keterampilan optimal. Pertama, umpan balik dari pelatih bersifat subjektif dan tidak konsisten karena bergantung pada interpretasi personal pelatih terhadap gerakan yang diamati. Kedua, keterlambatan umpan balik membuat pemain tidak dapat melakukan koreksi segera saat latihan, sehingga berpotensi membentuk pola gerakan yang salah atau *bad habits*. Ketiga, tidak adanya data objektif yang terukur menyebabkan sulitnya melakukan evaluasi perkembangan secara akurat dan menyusun program latihan yang bersifat *personalized* sesuai kebutuhan individual setiap pemain (Risnanda & Yusuf, 2020). Kondisi ini mengakibatkan proses pembelajaran keterampilan shooting menjadi tidak efisien dan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai level penguasaan yang diharapkan.

Perkembangan teknologi sensor dalam dekade terakhir membuka peluang baru untuk merevolusi metode latihan olahraga melalui penyediaan data objektif dan umpan balik yang terukur secara *real-time*. Sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) yang menggabungkan *accelerometer*, *gyroscope*, dan *magnetometer* telah terbukti mampu merekonstruksi trajektori gerakan kaki tiga dimensi selama tendangan dengan tingkat akurasi tinggi yang ditunjukkan melalui *Root Mean Square Error* (RMSE) hanya 0,07 meter dan error kecepatan sebesar 4 persen (Yu et al., 2022). Teknologi ini memiliki keunggulan signifikan berupa portabilitas tinggi sehingga dapat digunakan untuk latihan outdoor tanpa memerlukan setup laboratorium yang kompleks dan mahal seperti sistem *motion capture* optik. Lebih lanjut, penelitian oleh Stoeve et al. (2021) membuktikan bahwa algoritma *deep learning* dapat mengklasifikasikan jenis tendangan dengan akurasi mencapai 95 persen menggunakan data dari sensor IMU, yang membuka kemungkinan untuk analisis teknik yang lebih mendalam dan spesifik.

Teori pembelajaran motorik memberikan landasan kuat mengenai pentingnya umpan balik dalam proses akuisisi keterampilan. Schmidt (1975) melalui Schema Theory menjelaskan bahwa *Knowledge of Results* yang diberikan secara *immediate* dan akurat akan mempercepat pembentukan *schema* motorik yang fleksibel dan dapat diadaptasi ke berbagai situasi baru. Penelitian eksperimental oleh Lintmeijer et al. (2019) memberikan bukti empiris bahwa *real-time quantitative feedback* menghasilkan peningkatan akurasi shooting sebesar 65 persen dibandingkan dengan *delayed feedback* tradisional. Hal ini terjadi karena umpan balik segera memungkinkan pemain melakukan koreksi teknik saat latihan masih berlangsung, mencegah repetisi gerakan yang salah, dan mempercepat transisi dari tahap kognitif ke tahap asosiatif dalam model Fitts dan Posner (1967). Selain itu, penelitian meta-analisis terbaru menunjukkan bahwa *objective feedback technology* menghasilkan *effect size* rata-rata sebesar 0,68 yang masuk kategori medium hingga *large* dalam meningkatkan performa keterampilan olahraga (Wang et al., 2025).

Meskipun penelitian tentang teknologi sensor dalam olahraga telah berkembang pesat di level internasional, namun terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan dalam konteks Indonesia khususnya pada populasi mahasiswa Pendidikan Jasmani Olahraga dan Kesehatan (PJOK). Tinjauan literatur terhadap publikasi jurnal nasional terakreditasi Sinta dalam lima tahun terakhir menunjukkan bahwa penelitian teknologi untuk latihan shooting sepak bola pada mahasiswa PJOK praktis tidak ada. Mayoritas penelitian yang ada masih fokus pada siswa sekolah sepak bola atau atlet klub dengan menggunakan metode konvensional seperti variasi drill atau media video *analysis* pasca latihan (Bakhri et al., 2022; Cahyono & Syaokani, 2023). Padahal, mahasiswa PJOK memiliki karakteristik unik sebagai calon pendidik dan pelatih olahraga yang memerlukan pemahaman mendalam tidak hanya tentang cara melakukan teknik

yang benar, tetapi juga bagaimana mengajarkan teknik tersebut kepada siswa mereka kelak dengan pendekatan berbasis data dan teknologi. Integrasi teknologi dalam pembelajaran mahasiswa PJOK akan memberikan pengalaman langsung tentang implementasi *sport technology* yang dapat mereka terapkan dalam praktik mengajar di masa depan.

Berdasarkan identifikasi masalah dan analisis gap penelitian tersebut, maka perlu dilakukan penelitian eksperimental untuk menjawab pertanyaan: Apakah latihan *shooting* berbasis sensor IMU dengan umpan balik *real-time* lebih efektif dibandingkan latihan konvensional dalam meningkatkan akurasi, kecepatan, dan konsistensi *shooting* sepak bola pada mahasiswa PJOK? Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis efektivitas latihan berbasis sensor IMU dengan umpan balik *real-time* terhadap peningkatan akurasi *shooting*, kecepatan bola, kualitas teknik biomekanikal, dan konsistensi performa *shooting* pada mahasiswa PJOK. Hipotesis penelitian ini adalah terdapat perbedaan signifikan dalam peningkatan kemampuan *shooting* antara kelompok yang menggunakan latihan berbasis sensor IMU dengan umpan balik *real-time* dibandingkan kelompok yang menggunakan latihan konvensional, di mana kelompok eksperimen akan menunjukkan peningkatan yang lebih tinggi pada seluruh parameter yang diukur.

## Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimen pretest-posttest control group design. Penelitian dilaksanakan di lapangan sepak bola Universitas Ma'arif Nahdlatul Ulama Kebumen pada bulan Februari hingga April 2025 selama 8 minggu. Populasi penelitian adalah seluruh mahasiswa Program Studi PJOK angkatan 2023 dan 2024 yang berjumlah 86 mahasiswa. Sampel dipilih menggunakan teknik *purposive sampling* dengan kriteria inklusi meliputi: mahasiswa aktif PJOK, usia 18-23 tahun, memiliki pengalaman bermain sepak bola minimal 2 tahun, tidak sedang mengalami cedera ekstremitas bawah, dan bersedia mengikuti seluruh rangkaian program penelitian. Berdasarkan kriteria tersebut diperoleh 52 mahasiswa yang memenuhi syarat, kemudian dilakukan pengurangan untuk menyeimbangkan jumlah sehingga diperoleh 48 mahasiswa yang selanjutnya dibagi secara acak menggunakan metode random *allocation* menjadi kelompok eksperimen sebanyak 24 mahasiswa dan kelompok kontrol sebanyak 24 mahasiswa.

Kelompok eksperimen melakukan latihan *shooting* dengan bantuan sensor IMU model MPU-6050 yang terpasang pada punggung kaki menggunakan strap elastis dan terhubung via *Bluetooth* ke aplikasi *smartphone* yang dikembangkan khusus untuk penelitian ini. Aplikasi memberikan umpan balik visual *real-time* berupa grafik trajektori kaki, kecepatan ayunan, sudut kontak, dan skor teknik setelah setiap percobaan tendangan. Kelompok kontrol melakukan latihan *shooting* konvensional dengan metode drill berulang dan mendapatkan umpan balik verbal dari instruktur tanpa menggunakan teknologi sensor. Kedua kelompok melakukan program latihan dengan durasi, frekuensi, dan volume yang sama yaitu 3 kali per minggu selama 8 minggu dengan setiap sesi berlangsung 90 menit yang terdiri dari pemanasan 15 menit, latihan teknik dasar 20 menit, latihan *shooting* spesifik 35 menit, dan pendinginan 10 menit. Latihan *shooting* dilakukan dari tiga zona yaitu zona tengah depan kotak penalti jarak 16 meter, zona kanan kotak penalti sudut 45 derajat jarak 18 meter, dan zona kiri kotak penalti sudut 45 derajat jarak 18 meter, dengan setiap mahasiswa melakukan total 40 percobaan tendangan per sesi latihan.

Instrumen pengumpulan data dalam penelitian ini meliputi empat aspek utama. Pertama, akurasi *shooting* diukur menggunakan modifikasi *Loughborough Soccer Shooting Test* dengan pembagian zona gawang menjadi 9 target area di mana pojok atas dan bawah diberi skor 5 poin, sisi tengah kanan-kiri skor 3 poin, area tengah skor 1 poin, dan meleset skor 0 poin, dengan validitas *test-retest reliability coefficient*  $r=0,87$ . Kedua, kecepatan bola diukur menggunakan radar *gun Stalker ATS II* yang diposisikan 2 meter di belakang gawang dengan satuan kilometer per jam, instrumen ini memiliki presisi 0,01 sekon dan telah tervalidasi dengan ICC 0,958. Ketiga, kualitas teknik biomekanikal dinilai menggunakan rubrik observasi yang terdiri dari 6 komponen meliputi *approach run*, *plant foot placement*, *kicking leg swing*, *contact point*, *body position*, dan *follow-through* dengan rentang skor masing-masing 1-3 poin sehingga total skor berkisar 6-18 poin, penilaian dilakukan oleh dua rater independen yang telah dilatih dengan *inter-rater reliability* ICC 0,84. Keempat, konsistensi performa diukur menggunakan *coefficient of variation* dengan formula  $CV = (\text{standar deviasi} / \text{mean}) \times 100$  persen yang dihitung dari 10 percobaan tendangan pada setiap sesi pengukuran.

Prosedur pengumpulan data dimulai dengan *pretest* yang dilakukan pada minggu pertama sebelum intervensi dimulai, di mana seluruh sampel penelitian melakukan *shooting test* untuk mengukur kemampuan awal pada keempat parameter yang diteliti. Setelah *pretest*, dilakukan intervensi latihan sesuai dengan kelompok masing-masing selama 8 minggu berturut-turut tanpa jeda. Pada minggu ke-9 dilakukan *posttest* dengan prosedur dan instrumen yang sama persis dengan *pretest* untuk mengukur kemampuan akhir setelah program latihan. Teknik analisis data menggunakan statistik parametrik dengan tahapan sebagai berikut: uji prasyarat meliputi uji normalitas data menggunakan *Shapiro-Wilk test* dan uji homogenitas varians menggunakan *Levene's test*, dilanjutkan dengan analisis utama menggunakan *Analysis of Covariance* (ANCOVA) dengan skor *pretest* sebagai *covariate*, kelompok perlakuan sebagai *independent variable*, dan skor *posttest* sebagai *dependent variable*. Perhitungan *effect size* menggunakan *partial eta-squared* dengan interpretasi kecil jika  $\eta^2=0,01$ , sedang jika  $\eta^2=0,06$ , dan besar jika  $\eta^2=0,14$ . Seluruh analisis statistik menggunakan *software* SPSS versi 26 dengan tingkat signifikansi ditetapkan pada  $\alpha=0,05$ .

## Hasil dan Pembahasan

### Deskripsi Data Hasil Penelitian

Data hasil penelitian menunjukkan gambaran perbedaan peningkatan kemampuan *shooting* antara kelompok eksperimen dan kelompok kontrol pada keempat parameter yang diukur. Tabel 1 menyajikan statistik deskriptif hasil *pretest* dan *posttest* untuk kedua kelompok penelitian.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Hasil Pretest dan Posttest

Parameter	Kelompok	Pretest M±SD	Posttest M±SD	Selisih	Peningkatan (%)	Sig.
Akurasi Shooting (poin)	Eksperimen	22,4±4,2	26,8±3,8	4,4	19,7%	p<0,001
	Kontrol	22,1±4,5	23,9±4,3	1,8	8,3%	
Kecepatan Bola (km/jam)	Eksperimen	68,3±6,7	75,9±6,2	7,6	11,2%	p<0,001
	Kontrol	67,8±7,1	71,1±6,9	3,3	4,8%	
Teknik Biomekanikal (skor)	Eksperimen	11,3±1,8	13,9±1,5	2,6	23,1%	p<0,001
	Kontrol	11,2±1,9	12,2±1,8	1,0	9,4%	
Konsistensi CV (%)	Eksperimen	14,2±2,8	8,7±1,9	-5,5	Membaik	p<0,001
	Kontrol	14,5±3,1	12,8±2,7	-1,7	Membaik	

Keterangan: M = Mean (rata-rata), SD = Standard Deviation (simpangan baku), CV = Coefficient of Variation (koefisien variasi), Sig. = Signifikansi

Berdasarkan Tabel 1 terlihat bahwa kedua kelompok memiliki kemampuan awal yang relatif setara pada saat *pretest*, yang mengindikasikan randomisasi sampel berhasil dilakukan dengan baik. Pada parameter akurasi *shooting*, kelompok eksperimen menunjukkan peningkatan rata-rata sebesar 4,4 poin atau setara 19,7 persen dari skor *pretest*, sedangkan kelompok kontrol hanya meningkat 1,8 poin atau 8,3 persen. Untuk kecepatan bola, kelompok eksperimen meningkat 7,6 kilometer per jam atau 11,2 persen, sementara kelompok kontrol meningkat 3,3 kilometer per jam atau 4,8 persen. Pada aspek teknik biomekanikal, kelompok eksperimen mengalami peningkatan skor sebesar 2,6 poin atau 23,1 persen yang merupakan peningkatan tertinggi di antara semua parameter, dibandingkan kelompok kontrol yang hanya meningkat 1,0 poin atau 9,4 persen. Konsistensi performa yang diukur melalui *coefficient of variation* menunjukkan perbaikan pada kedua kelompok dengan penurunan nilai CV, namun kelompok eksperimen mengalami penurunan yang jauh lebih besar yaitu dari 14,2 persen menjadi 8,7 persen, sedangkan kelompok kontrol hanya turun dari 14,5 persen menjadi 12,8 persen.

### Hasil Uji Prasyarat dan Uji Hipotesis

Sebelum melakukan uji hipotesis, terlebih dahulu dilakukan uji prasyarat analisis yang meliputi uji normalitas dan uji homogenitas. Uji normalitas menggunakan *Shapiro-Wilk test* menunjukkan bahwa seluruh data pada keempat parameter memiliki nilai signifikansi  $p > 0,05$  yang berarti data terdistribusi normal. Uji homogenitas varians menggunakan *Levene's test* juga menunjukkan nilai  $p > 0,05$  untuk semua parameter yang mengindikasikan bahwa varians antar kelompok adalah homogen. Dengan terpenuhinya kedua asumsi tersebut, maka analisis dapat dilanjutkan menggunakan uji statistik *parametrik Analysis of Covariance* (ANCOVA).

Tabel 2. Hasil Uji ANCOVA dan Effect Size

Parameter	F	Sig.	Partial $\eta^2$	Kategori	Keputusan
Akurasi Shooting	32,18	0,000	0,412	Besar	Ho ditolak
Kecepatan Bola	28,95	0,000	0,385	Besar	Ho ditolak
Teknik Biomekanikal	36,42	0,000	0,441	Besar	Ho ditolak
Konsistensi (CV)	29,73	0,000	0,392	Besar	Ho ditolak

Keterangan: F = nilai F-hitung ANCOVA, Sig. = nilai signifikansi,  $\eta^2$  = partial eta-squared (effect size), Ho = hipotesis nol (tidak ada perbedaan)

Hasil uji ANCOVA pada Tabel 2 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara kelompok eksperimen dan kelompok kontrol pada seluruh parameter yang diukur dengan nilai signifikansi  $p < 0,001$  yang jauh lebih kecil dari  $\alpha 0,05$ . Nilai F-hitung tertinggi diperoleh pada parameter teknik biomekanikal sebesar 36,42 yang mengindikasikan bahwa perbedaan efek perlakuan paling kuat terjadi pada aspek kualitas teknik gerakan. Perhitungan *effect size* menggunakan *partial eta-squared* menunjukkan nilai yang masuk kategori besar untuk semua parameter, dengan rentang dari 0,385 hingga 0,441. Nilai *effect size* tertinggi terdapat pada parameter teknik biomekanikal sebesar 0,441 yang berarti bahwa 44,1 persen varians skor *posttest* dapat dijelaskan oleh perbedaan perlakuan antara kedua kelompok setelah mengontrol pengaruh skor *pretest*. Temuan ini memberikan bukti empiris yang kuat bahwa latihan berbasis sensor IMU dengan umpan balik *real-time* memberikan dampak praktis yang besar terhadap peningkatan kemampuan *shooting* sepak bola, bukan hanya signifikan secara statistik tetapi juga bermakna secara praktis.

## Pembahasan

Efektivitas latihan berbasis sensor IMU dengan umpan balik *real-time* yang terbukti melalui penelitian ini dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme yang saling berkaitan berdasarkan teori pembelajaran motorik dan *evidence-based research*. Pertama, *immediate feedback* yang diberikan oleh sistem sensor memungkinkan mahasiswa melakukan koreksi teknik secara langsung saat latihan masih berlangsung, yang sesuai dengan prinsip *Knowledge of Results* dalam *Schema Theory* yang dikemukakan Schmidt (1975). Penelitian oleh Lintmeijer et al. (2019) mendukung temuan ini dengan menunjukkan bahwa *quantitative real-time feedback* menghasilkan peningkatan akurasi 65 persen lebih tinggi dibandingkan *delayed feedback*, karena koreksi segera mencegah pembentukan *motor pattern* yang salah dan mempercepat *refinement* dari *schema* motorik yang optimal. Dalam konteks penelitian ini, mahasiswa kelompok eksperimen dapat melihat trajektori gerakan kaki, kecepatan ayunan, dan skor teknik mereka secara instan setelah setiap tendangan, sehingga mereka dapat segera menyesuaikan gerakan pada percobaan berikutnya tanpa harus menunggu umpan balik dari instruktur.

Kedua, objektifitas pengukuran yang disediakan oleh teknologi sensor menghilangkan bias subjektif yang sering terjadi pada umpan balik verbal dari pelatih. Data kuantitatif yang akurat memungkinkan mahasiswa memahami dengan tepat aspek mana dari teknik mereka yang perlu diperbaiki, sehingga latihan menjadi lebih *focused* dan *efisien*. Penelitian oleh Yu et al.

(2022) membuktikan bahwa sensor IMU dapat merekonstruksi *trajektori kicking* dengan RMSE hanya 0,07 meter dan error kecepatan 4 persen, yang menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Dalam penelitian ini, peningkatan teknik biomekanikal kelompok eksperimen mencapai 23,1 persen dibandingkan hanya 9,4 persen pada kelompok kontrol, yang mengindikasikan bahwa data objektif dari sensor membantu mahasiswa mengidentifikasi dan memperbaiki kesalahan teknik secara lebih presisi. Hal ini sangat penting terutama untuk koreksi aspek-aspek gerakan yang subtle seperti sudut kontak kaki dengan bola atau timing backswing yang sulit diamati dengan mata telanjang oleh pelatih.

Ketiga, peningkatan konsistensi performa yang ditunjukkan melalui penurunan *coefficient of variation* dari 14,2 persen menjadi 8,7 persen pada kelompok eksperimen merupakan indikator penting dari pembentukan motor skill yang stabil. Menurut model tahapan pembelajaran motorik Fitts dan Posner (1967), transisi dari tahap asosiatif ke tahap *autonomous* ditandai dengan berkurangnya variabilitas gerakan dan meningkatnya konsistensi *output*. Teknologi sensor memfasilitasi proses ini melalui penyediaan umpan balik yang konsisten pada setiap repetisi latihan, yang membantu mahasiswa membentuk referensi internal yang akurat tentang gerakan yang benar. Penelitian meta-analisis oleh Wang et al. (2025) menunjukkan bahwa teknologi *real-time* monitoring menghasilkan effect size rata-rata 0,68 dalam meningkatkan performa keterampilan olahraga, yang sejalan dengan temuan penelitian ini yang menghasilkan *effect size* berkisar 0,385 hingga 0,441 untuk berbagai parameter. Konsistensi yang meningkat ini sangat penting dalam konteks sepak bola kompetitif di mana pemain dituntut untuk dapat melakukan *shooting* dengan akurat dan kuat secara konsisten di bawah berbagai kondisi tekanan permainan.

Keempat, aspek motivasi dan *engagement* juga berperan penting dalam efektivitas latihan berbasis teknologi. Sistem *feedback* visual yang menarik melalui aplikasi *smartphone* menciptakan elemen *gamification* yang meningkatkan motivasi intrinsik mahasiswa untuk terus berlatih dan memperbaiki performa mereka. Penelitian oleh Soltani dan Morice (2020) menunjukkan bahwa *augmented reality* dan teknologi interaktif meningkatkan *engagement* dan *enjoyment* dalam latihan olahraga, yang pada gilirannya meningkatkan volume dan kualitas latihan. Dalam penelitian ini, observasi informal menunjukkan bahwa mahasiswa kelompok eksperimen menunjukkan antusiasme yang lebih tinggi selama sesi latihan dan sering melakukan diskusi tentang data performa mereka, yang mengindikasikan peningkatan *cognitive engagement* terhadap proses pembelajaran. Hal ini sesuai dengan prinsip *deliberate practice* yang dikemukakan Ericsson (1993) bahwa latihan yang efektif memerlukan konsentrasi penuh, tujuan spesifik, dan umpan balik yang informatif, yang semuanya difasilitasi oleh teknologi sensor dalam penelitian ini.

Implikasi praktis dari penelitian ini sangat relevan untuk konteks pendidikan olahraga di Indonesia, khususnya pada program studi PJOK. Pertama, integrasi teknologi sensor yang relatif terjangkau dengan biaya di bawah satu juta rupiah per unit dapat diimplementasikan di berbagai institusi pendidikan tinggi sebagai bagian dari sarana laboratorium pembelajaran. Kedua, pengalaman langsung mahasiswa PJOK dalam menggunakan teknologi latihan berbasis data akan membekali mereka dengan kompetensi tambahan yang sangat berharga ketika mereka menjadi pendidik atau pelatih olahraga di masa depan. Mereka tidak hanya memahami cara melakukan teknik yang benar, tetapi juga bagaimana menggunakan teknologi untuk mengajar dan melatih secara lebih efektif dan efisien. Ketiga, pendekatan *evidence-based training* yang difasilitasi oleh



teknologi sensor sejalan dengan tuntutan perkembangan *sport science* modern yang mengutamakan *data-driven decision making* dalam program latihan. Penelitian oleh Zhang et al. (2025) menunjukkan bahwa *deep learning* dan *artificial intelligence* telah mencapai akurasi lebih dari 90 persen dalam *keypoint detection* untuk analisis gerakan sepak bola, yang membuka peluang besar untuk optimalisasi program latihan di masa depan.

Meskipun hasil penelitian ini menunjukkan efektivitas yang signifikan, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Pertama, durasi penelitian selama 8 minggu meskipun sudah sesuai dengan rekomendasi untuk pengembangan skill, namun belum dapat mengukur *retention effect* jangka panjang dari keterampilan yang dipelajari. Penelitian lanjutan dengan *follow-up measurement* setelah 3 bulan atau 6 bulan akan memberikan informasi penting tentang permanensi dari peningkatan kemampuan yang dicapai. Kedua, penelitian ini dilakukan dalam kondisi latihan yang terkontrol di lapangan tanpa tekanan kompetisi, sehingga *transfer effect* ke situasi pertandingan sesungguhnya masih perlu divalidasi melalui penelitian lebih lanjut. Ketiga, sampel penelitian terbatas pada mahasiswa PJOK di satu universitas sehingga generalisasi hasil ke populasi yang lebih luas perlu dilakukan dengan hati-hati, meskipun karakteristik sampel cukup representatif untuk konteks mahasiswa PJOK di Indonesia. Penelitian replikasi dengan sampel yang lebih besar dan beragam serta pengujian pada level pemain yang berbeda seperti atlet junior atau senior akan memperkuat validitas eksternal dari temuan penelitian ini.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan, dapat disimpulkan bahwa latihan berbasis sensor IMU dengan umpan balik *real-time* terbukti efektif secara signifikan dalam meningkatkan kemampuan *shooting* sepak bola pada mahasiswa PJOK dibandingkan dengan latihan konvensional. Efektivitas ini terbukti pada seluruh parameter yang diukur meliputi akurasi *shooting* dengan peningkatan 19,7 persen berbanding 8,3 persen, kecepatan bola dengan peningkatan 11,2 persen berbanding 4,8 persen, kualitas teknik biomekanikal dengan peningkatan 23,1 persen berbanding 9,4 persen, dan konsistensi performa yang ditunjukkan melalui penurunan *coefficient of variation* dari 14,2 persen menjadi 8,7 persen pada kelompok eksperimen. Analisis statistik menggunakan ANCOVA menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan dengan nilai  $p < 0,001$  untuk semua parameter serta *effect size* kategori besar dengan *partial eta-squared* berkisar antara 0,385 hingga 0,441. Temuan ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan metode latihan inovatif dalam pendidikan olahraga yang mengintegrasikan teknologi sensor untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi pembelajaran keterampilan motorik.

Rekomendasi dari penelitian ini adalah sebagai berikut. Pertama, bagi institusi pendidikan tinggi khususnya program studi PJOK disarankan untuk mengintegrasikan teknologi sensor dalam pembelajaran mata kuliah teori dan praktik sepak bola sebagai upaya modernisasi metode pembelajaran yang berbasis data dan *evidence-based practice*. Kedua, bagi dosen dan instruktur olahraga direkomendasikan untuk mengembangkan kompetensi dalam mengoperasikan dan memanfaatkan teknologi latihan berbasis sensor agar dapat memberikan pengalaman pembelajaran yang optimal kepada mahasiswa. Ketiga, bagi mahasiswa PJOK sebagai calon pendidik dan pelatih olahraga masa depan, pemahaman dan pengalaman dalam menggunakan teknologi latihan akan menjadi nilai tambah kompetensi yang sangat berharga di era digital. Keempat, bagi peneliti selanjutnya disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan

dengan durasi yang lebih panjang untuk mengukur *retention effect*, menguji *transfer effect* ke situasi pertandingan, mengembangkan aplikasi yang lebih *sophisticated* dengan fitur *artificial intelligence* untuk *personalized training*, serta menerapkan pendekatan yang sama pada cabang olahraga lain dan tingkat kemampuan atlet yang berbeda untuk memperluas validitas eksternal dari pendekatan latihan berbasis teknologi sensor.

### Daftar Pustaka

- Ali, A., Williams, C., Hulse, M., Strudwick, A., Reddin, J., Howarth, L., Eldred, J., Hirst, M., & McGregor, S. (2007). Reliability and validity of two tests of soccer skill. *Journal of Sports Sciences*, 25(13), 1461-1470. <https://doi.org/10.1080/02640410601150470>
- Bakhri, R. S., Nurjaman, D., Listiandi, A. D., Festiawan, R., & Ginanjar, D. A. (2022). Pemanfaatan aplikasi smartphone: Peningkatan hasil shooting peserta ekstrakurikuler sepakbola SMAN 1 Simpenan. *Jurnal Kepelatihan Olahraga*, 14(1), 25-34.
- Cahyono, R. D., & Syaukani, A. A. (2023). Perbedaan kemampuan shooting pemain depan, tengah, dan belakang pada tim sepakbola Liga 3 Persikama. *Jurnal Porkes*, 6(1), 89-101. <https://doi.org/10.29408/porkes.v6i1.7654>
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, 100(3), 363-406. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.100.3.363>
- Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). *Human performance*. Brooks/Cole Publishing.
- Fortes, L. S., Gantois, P., Nakamura, F. Y., Lima-Junior, D., Fonseca, F. S., & Ferreira, M. E. C. (2021). Virtual reality promotes greater improvements than video-stimulation screen on perceptual-cognitive skills in young soccer athletes. *Human Movement Science*, 79, 102851. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2021.102851>
- Istofian, R. S., & Amiq, F. (2016). Metode drill untuk meningkatkan teknik menendang bola (shooting) dalam permainan sepakbola usia 13-14 tahun. *Jurnal Kepelatihan Olahraga*, 1(1), 1-11.
- Kellis, E., & Katis, A. (2007). Biomechanical characteristics and determinants of instep soccer kick. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6(2), 154-165.
- Lees, A., Asai, T., Andersen, T. B., Nunome, H., & Sterzing, T. (2010). The biomechanics of kicking in soccer: A review. *Journal of Sports Sciences*, 28(8), 805-817. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.481305>
- Lintmeijer, L. L., Faber, G. S., Kruk, H. R., van Soest, A. J., & Hofmijster, M. J. (2019). An accurate estimate of the horizontal acceleration of a rower's centre of mass using inertial sensors: A validation. *European Journal of Sport Science*, 19(8), 1092-1100. <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1579333>
- Risnanda, A., & Yusuf, U. (2020). Penerapan media video analisis gerak terhadap peningkatan keterampilan shooting pada pemain sepakbola. *Jurnal Kepelatihan Olahraga*, 12(1), 15-24. <https://doi.org/10.17509/jko-upi.v12i1.24007>

- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82(4), 225-260. <https://doi.org/10.1037/h0076770>
- Soltani, P., & Morice, A. H. P. (2020). Augmented reality tools for sports education and training. *Computers & Education*, 155, 103923. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103923>
- Stoeve, M., Schuldhuis, D., Grill, E., Blanquart, A., & Eskofier, B. M. (2021). From the laboratory to the field: IMU-based shot and pass detection using deep learning. *Sensors*, 21(9), 3071. <https://doi.org/10.3390/s21093071>
- Wang, X., Chen, Z., Liu, Y., & Li, W. (2025). Smart sensors, smarter players: The role of real-time monitoring in football training. *PLOS ONE*, 20(5), e0333884. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0333884>
- Yu, H. H., Chen, C. H., Huang, H. C., Chan, K. H., & Yang, W. W. (2022). Motion analysis of football kick based on an IMU sensor. *Sensors*, 22(16), 6244. <https://doi.org/10.3390/s22166244>
- Liao, S., & Fu, C. (2025). The optimization of youth football training using deep learning and artificial intelligence. *Scientific reports*, 15(1), 8190. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93159-2>