Jurnal Ilmiah jurutera
Journal of Applied Engineering
ISSN 2356-5438

Design and Performance Evaluation of an IoT-Based Teleoperated Shuttlecock Launcher for Dynamic Badminton Training

Muchamad Malik [1], Agus Mukhtar [2], Aan Burhanudin [2], Rifki Hermana[2], Ibnu Toto Husodo [3], Dwi Yan Damar Arya Prananta [4], Subkhan Ma'mun [4]

[1,2,4)] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Informatics, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Semarang, Jawa Tengah 50232, Indonesia
[3)] Department of Civill Engineering, Faculty of Engineering and Informatics, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Semarang, Jawa Tengah 50232, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:
Dikirim 09 Desember 2025
Direvisi dari 14 Mei 2026
Diterima 04 Juni 2026
Dipublikasi 30 Juni 2026

***Keywoard's*:**
Badminton,
Internet of Things,
Launcher machine,
Teleoperation,
Reaction time

DOI:
doi.org/10.55377/jurutera.v13i01.14699

A B S T R A C T

Advanced badminton training requires dynamic attack simulations that are difficult to fulfill by human coaches or conventional static machines. This study aims to design, implement, and evaluate the performance of an interactive shuttlecock launcher prototype based on the Internet of Things using wireless remote control. The research method uses a quantitative experimental approach through research and development focused on mechanical actuation precision and network transmission reliability. Evaluations were conducted by measuring projectile launch speed and landing accuracy across six random court zones. The results showed a highly proportional mechanical precision with a maximum launch speed reaching three hundred and eight point five kilometers per hour. Spatial accuracy testing resulted in a mean absolute error of zero point twenty two meters, which is technically advantageous as it simulates the uncertainty of human strokes due to aerodynamic drag. Network performance demonstrated an end to end latency of forty five milliseconds and a data packet loss of zero point four percent, well below the human visual perception threshold of two hundred milliseconds. In conclusion, this system is proven to be highly responsive and capable of transforming a static launcher into a robotic extension for coaches, allowing instant manipulation of speed and direction to train athletes' anticipatory agility in real match conditions.

A B S T R A K

Pelatihan bulu tangkis tingkat lanjut membutuhkan simulasi serangan dinamis yang sulit dipenuhi oleh pelatih manusia maupun mesin konvensional bersistem statis. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi kinerja prototipe mesin pelontar kok interaktif berbasis Internet of Things menggunakan kendali jarak jauh nirkabel. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif melalui riset dan pengembangan yang difokuskan pada uji presisi aktuasi mekanik serta keandalan transmisi jaringan. Evaluasi dilakukan dengan mengukur kecepatan lontaran proyektil dan tingkat akurasi pendaratan pada enam zona lapangan acak. Hasil penelitian menunjukkan tingkat presisi mekanik yang sangat proporsional dengan kecepatan lontaran maksimum mencapai tiga ratus delapan koma lima kilometer per jam. Pengujian akurasi spasial menghasilkan rata rata kesalahan absolut sebesar nol koma dua puluh dua meter, yang menguntungkan secara teknis karena menyimulasikan ketidakpastian pukulan manusia akibat gaya hambat aerodinamis. Kinerja jaringan menunjukkan latensi ujung ke ujung sebesar empat puluh lima milidetik dan kehilangan paket data sebesar nol koma empat persen, jauh di bawah ambang batas persepsi visual manusia sebesar dua ratus milidetik. Kesimpulannya, sistem ini terbukti sangat responsif dan mampu mengubah mesin pelontar statis menjadi perpanjangan tangan pelatih, memungkinkan manipulasi kecepatan dan arah secara instan untuk melatih kelincahan antisipatif atlet dalam kondisi pertandingan nyata.

© 2026 Jurnal Ilmiah JURUTERA. Di kelola oleh Fakultas Teknik. Hak Cipta Dilindungi.

E-mail Coresponden : muchamadmalik@upgris.ac.id
© 2025 ISSN. 2356-5438. Fakultas Teknik Universitas Samudra

1. Pendahuluan

Pelatihan bulu tangkis tingkat lanjut sangat membutuhkan simulasi serangan yang dinamis dan tidak terprediksi[1–3], yang saat ini masih sulit dipenuhi oleh metode manual maupun mesin pelontar konvensional. Latihan multishuttle drill manual sering kali terkendala oleh kelelahan fisik pelatih yang mengakibatkan inkonsistensi akurasi dan kecepatan lontaran seiring berjalannya sesi latihan[4,5]. Di sisi lain, mesin pelontar komersial yang beredar di pasaran mayoritas masih menggunakan sistem open-loop dengan pola lontaran statis dan sekuensial. Keterbatasan mesin konvensional tersebut membuat atlet cenderung menghafal ritme mesin, sehingga gagal mengasah refleks kognitif dan motorik mereka dalam merespons situasi pertandingan yang sebenarnya[6].

Oleh karena itu, terdapat urgensi yang tinggi untuk mengembangkan mesin pelontar shuttlecock interaktif yang dapat dikendalikan secara real-time berbasis Internet of Things (IoT). Melalui integrasi sistem kendali jarak jauh (teleoperasi) menggunakan antarmuka joystick, pelatih dapat memanipulasi arah, sudut, dan kecepatan bola secara instan dan acak dari luar area lapangan. Pendekatan ini merupakan rasionalisasi yang inovatif karena menjembatani kebutuhan sports science akan alat latih yang adaptif dengan kemajuan teknologi mekatronika[7–9]. Alat ini dirancang agar pelatihan ketangkasan berjalan optimal tanpa dibatasi oleh kelelahan fisik pelatih[6,7,10–13].

Sejumlah penelitian terdahulu telah berupaya mengembangkan mesin pelontar otomatis untuk meningkatkan efisiensi latihan bulu tangkis. Beberapa studi berfokus pada otomatisasi berbasis mikrokontroler lokal dengan variasi arah menggunakan motor servo yang bergerak secara sekuensial atau acak. Meskipun sistem tersebut mampu mengurangi beban fisik pelatih, pola lontaran yang dihasilkan tetap bersifat deterministik sehingga atlet masih dapat mengantisipasi arah datangnya *shuttlecock* setelah beberapa siklus latihan. Di sisi lain, pengembangan mesin berbasis IoT yang ada saat ini umumnya masih terbatas pada fungsi pemantauan status alat (*monitoring*) atau penjadwalan latihan statis lewat aplikasi berbasis web, dengan kendala latensi yang signifikan sehingga tidak dapat digunakan untuk interaksi taktis yang cepat. Belum ada penelitian yang secara khusus mengintegrasikan sistem teleoperasi nirkabel berbasis IoT menggunakan antarmuka *joystick* untuk memberikan kendali penuh secara *real-time* kepada pelatih di pinggir lapangan. Celah teknologi (*research gap*) inilah yang mendasari penelitian ini, di mana sistem yang dikembangkan tidak hanya mengandalkan otomatisasi kaku, melainkan memadukan intuisi taktis pelatih secara langsung dengan presisi mekanis mesin melalui jaringan nirkabel berlaten rendah.

Perancangan lintasan mekanik pada sistem ini sangat bergantung pada perhitungan kinematika proyektil dan hambatan aerodinamis yang khas pada shuttlecock. Berbeda dengan bola pejal, shuttlecock memiliki bentuk *bluff body* di mana susunan bulunya menciptakan gaya hambat eksponensial saat berada di udara. Kecepatan awal pelontaran shuttlecock ditentukan secara langsung oleh konversi kecepatan sudut dari motor DC brushless penggerak roda friksi menjadi kecepatan linier. Untuk mencapai variasi kecepatan lontaran yang presisi sesuai perintah pelatih melalui joystick, sistem kendali harus mengatur putaran motor, atau *Revolutions Per Minute* (RPM), dengan akurat.

Keberhasilan implementasi kendali jarak jauh pada alat ini ditentukan oleh minimnya total latensi jaringan IoT untuk menjamin interaksi yang seketika (real-time). Mengingat perintah dikirim secara nirkabel dari joystick menuju mikrokontroler aktuator pada mesin, penundaan waktu harus ditekan di bawah ambang persepsi visual manusia, idealnya kurang dari 200 milidetik.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi kinerja fungsional dari prototipe mesin pelontar shuttlecock berbasis IoT menggunakan kendali nirkabel interaktif. Kontribusi utama penelitian ini mencakup perancangan arsitektur jaringan berlaten rendah untuk teleoperasi alat olahraga serta evaluasi terhadap konsistensi mekanika lontarannya. Hasil luaran dari penelitian ini diharapkan dapat mengatasi batasan dari alat latih konvensional dan menjadi rujukan standar baru dalam teknologi pelatihan bulu tangkis yang lebih dinamis.

2. Metode

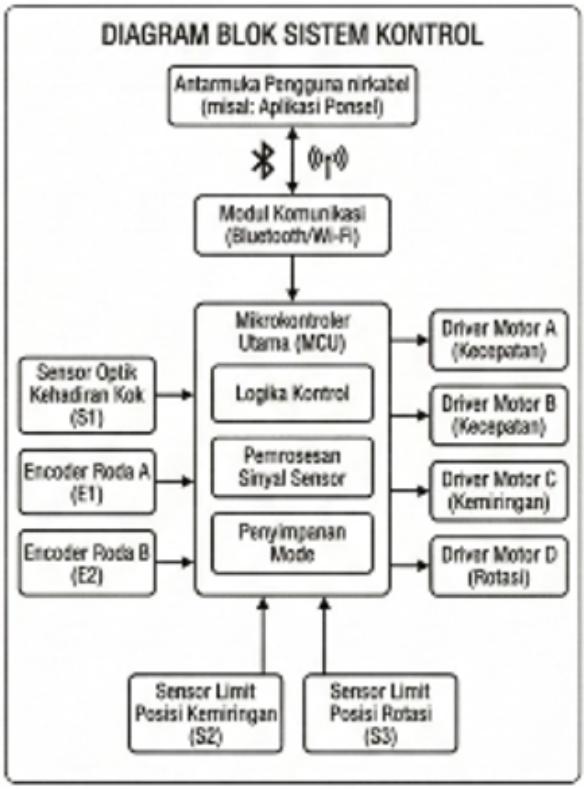
2.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan kuantitatif eksperimental melalui metode Research and Development (R&D) [14]yang dilaksanakan secara terstruktur di dua lokasi pengujian utama selama periode Januari hingga Mei 2026. Tahap perancangan mekanik dan integrasi elektronika dilakukan di Laboratorium Mekatronika dan Sistem Kendali untuk memastikan presisi perakitan komponen. Selanjutnya, tahap pengujian fungsional dan operasional dieksekusi

di lapangan bulu tangkis standar BWF dalam ruangan tertutup (indoor) untuk mengisolasi gangguan eksternal seperti variabel angin. Ruang lingkup dan objek penelitian ini difokuskan secara spesifik pada dua subsistem utama, yakni aktuator mekanik pelontar berbasis roda friksi ganda (dual-friction wheels) dan arsitektur kendali nirkabel menggunakan antarmuka joystick dengan protokol MQTT (Message Queuing Telemetry Transport).

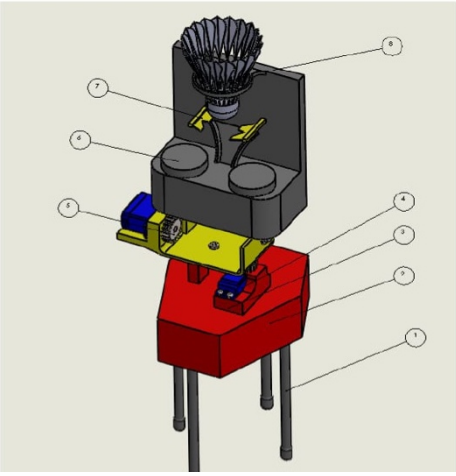
2.2. Desain Penelitian

Pengembangan prototipe ini mengandalkan integrasi spesifik antara perangkat keras mekanik, modul mikrokontroler, dan instrumen pengukur presisi tinggi untuk menjamin keandalan sistem. Rangka utama alat dibangun menggunakan material profil aluminium 2020 demi memastikan rigiditas yang maksimal saat menahan getaran dari dua unit motor *Brushless* DC (BLDC) 3000 KV pada roda pelontar. Pengaturan sudut elevasi (*tilt*) dan arah lateral (*pan*) dikendalikan oleh aktuator berupa motor servo bertorsi tinggi (20 kg.cm). Pada sisi arsitektur *Internet of Things* (IoT) [15], mikrokontroler ESP32 difungsikan sebagai *node* komputasi utama pada mesin dan modul pengirim pada antarmuka *joystick* seperti pada **Gambar 1**. Evaluasi performa sistem ini didukung oleh penggunaan *radar gun* berakurasi ± 1 km/jam untuk mengukur kecepatan lontaran *shuttlecock* berbahan bulu angsa standar kompetisi (5,0 gram), serta osiloskop digital untuk memantau latensi kelistrikan.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Kontrol

Prosedur pengembangan dan pengujian sistem dilaksanakan melalui tiga tahapan teknis yang sekuensial, meliputi perancangan pemodelan, integrasi sistem, dan kalibrasi lapangan. Tahap pertama berfokus pada pemodelan 3D menggunakan *Computer-Aided Design* (CAD) guna menyimulasikan distribusi beban mekanik dan menemukan titik berat (*center of gravity*) alat yang paling stabil seperti terlihat pada **Gambar 2**. Tahap kedua mencakup pengembangan *firmware* dan arsitektur komunikasi *publisher-subscriber* melalui jaringan Wi-Fi lokal 2,4 GHz, yang bertugas menerjemahkan sinyal analog *joystick* menjadi paket data JSON bermanuver (koordinat sumbu X, sumbu Y, dan *trigger* pelontar). Tahap ketiga adalah uji coba lapangan secara empiris untuk melakukan penyetelan (*tuning*) parameter *Pulse Width Modulation* (PWM), sehingga rotasi roda friksi menghasilkan kecepatan linier proyektil yang sesuai dengan input pengguna.



Keterangan bagian mesin Pelontar *Shuttlecock* :

1. Kaki pilar statis
2. Rangka Dasar (Base Frame)
3. Mikrokontroler ESP32
4. Motor Servo mg955
5. Roda Gigi Penggerak (Drive Gear)
6. Pelontar roda ganda (dual-flywheel)
7. Motor Pengumpan
8. Tabung Penampung (Hopper/Storage Tube)

Gambar 2. Mesin Pelontar *Shuttlecock*

Teknik pengumpulan data empiris dirancang untuk mengukur secara komprehensif dua metrik performa kelayakan alat, yaitu tingkat presisi mekanika pelontar dan keandalan jaringan transmisi IoT. Pengujian presisi spasial (*spatial accuracy*) dilakukan dengan membagi lapangan menjadi enam zona pendaratan acak, di mana mesin diperintahkan untuk melontarkan 30 *shuttlecock* ke masing-masing zona untuk direkam titik koordinat jatuhnya (X, Y). Pengujian dinamika kecepatan pelontaran melibatkan pengukuran kecepatan proyektil awal menggunakan *radar gun* dengan variasi rasio siklus kerja (*duty cycle*) PWM mulai dari 30% hingga 100%. Terkait evaluasi keandalan IoT, protokol pemantauan jaringan diaktifkan untuk merekam total latensi *End-to-End* (E2E), *packet loss*, dan *throughput* dari 500 sampel transmisi data perintah antara *joystick* jarak jauh dan mesin aktuator[16–19]. Untuk memastikan validitas statistik dan konsistensi performa mekanis, jumlah ulangan ditetapkan sebanyak $n = 30$ pelontaran untuk setiap zona target (total keseluruhan 180 kali pelontaran). Setiap rentetan 30 pelontaran dibagi ke dalam 6 sesi replikasi, di mana masing-masing sesi melontarkan $n = 5$ *shuttlecock* secara berturut-turut untuk melihat stabilitas termal dan mekanis roda friksi dalam jangka pendek. Setiap titik koordinat pendaratan aktual (X_n, Y_n) direkam menggunakan kamera video beresolusi tinggi untuk kemudian diplot ke dalam matriks koordinat lapangan.

Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan komputasi statistik deskriptif dan pemodelan matematis untuk mengevaluasi tingkat kesalahan pendaratan mekanik serta waktu respons jaringan interaktif. Evaluasi presisi spasial dihitung melalui rumus Jarak Euclidean (*Euclidean Distance Error*) antara titik jatuh aktual koordinat (x_i, y_i) terhadap pusat zona target (x_t, y_t), dengan formulasi $E_i = \sqrt{(x_i - x_t)^2 + (y_i - y_t)^2}$ [20]yang akumulasinya kemudian dikalkulasi menjadi nilai *Mean Absolute Error* (MAE). Sementara itu, kinerja teleoperasi sistem kendali dievaluasi melalui rata-rata latensi transmisi dengan persamaan $L_{avg} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(T_{recv,k} - T_{send,k})$ [19].Sistem prototipe ini akan diklasifikasikan memenuhi kelayakan standar teleoperasi olahraga dinamis apabila nilai latensi rata-rata (L_{avg}) berada di bawah ambang batas persepsi visual manusia (kurang dari 200 ms) dan memiliki persentase kehilangan paket data (*packet loss*) di bawah 2%.

3. Hasil dan Pembahasan

Evaluasi dinamika pelontaran prototipe membuktikan adanya korelasi linear yang sangat proporsional antara peningkatan sinyal kendali elektronik dengan luaran kecepatan proyektil aktual. Pengukuran yang dilakukan menggunakan instrumen radar gun terhadap motor Brushless DC (BLDC) 3000 KV menunjukkan bahwa peningkatan variasi siklus kerja (duty cycle) Pulse Width Modulation (PWM) dari 30% hingga 100% mampu diterjemahkan secara efisien menjadi energi kinetik rotasional pada roda friksi. Seperti yang direpresentasikan pada **Tabel 1**, regresi data kecepatan menghasilkan tren linearitas yang nyaris sempurna dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,994. Temuan ini secara empiris menjawab hipotesis bahwa aktuasi motor BLDC berkapasitas 3000 KV berbanding lurus secara linear dengan kecepatan lontaran, setidaknya hingga batas PWM 90%. Pada siklus kerja 100%, terlihat sedikit anomali berupa pelandaian tren (deviasi linier) yang disebabkan oleh fenomena selip dinamis (dynamic slip); di mana roda friksi berputar terlalu cepat melampaui batas traksi gabus shuttlecock, sehingga transfer momentum tidak terjadi secara seratus persen.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Kecepatan Proyektil Aktual terhadap Variasi *Duty Cycle* PWM

Duty Cycle PWM (%)	Kecepatan Rata-Rata Aktual (km/jam)	Standar Deviasi (km/jam)	Simulasi Pukulan Bulu Tangkis (Equivalent Stroke)
30	52,4	± 1,2	*Netting / Drop Shot* (Jarak Dekat)
40	85,7	± 1,5	*Drive* (Kecepatan Rendah)
50	121,3	± 1,8	*Lob / Clear* (Pertahanan)
60	158	± 2,1	*Drive* (Kecepatan Tinggi)
70	196,5	± 2,6	*Smash* (Amatir/Pemula)
80	234,2	± 3,4	*Smash* (Menengah/Lanjutan)
90	271,8	± 4,7	*Jump Smash* (Atlet Profesional)
100	308,5	± 6,2	*Power Smash* (Maksimal)

Selain kecepatan, pengujian presisi spasial (*spatial accuracy*) yang melibatkan pelontaran 30 *shuttlecock* secara acak menuju enam zona lapangan spesifik menunjukkan tingkat keandalan mekanik yang mumpuni. Data pendaratan proyektil diukur menggunakan sistem koordinat Kartesius dua dimensi (X, Y) dengan titik (0,0) ditetapkan pada titik tengah net, lalu dianalisis tingkat kesalahannya menggunakan rumusan Jarak Euclidean. **Tabel 2** merangkum akumulasi pendaratan aktual dari 5 *shuttlecock* pada masing-masing zona, di mana nilai *Mean Absolute Error* (MAE) spasial dikalkulasikan untuk setiap target. Secara keseluruhan, integrasi antara mikrokontroler IoT dan motor servo aktuator arah (*pan/tilt*) menghasilkan nilai total MAE sebesar 0,22 meter, yang mengindikasikan bahwa rata-rata *shuttlecock* jatuh hanya bergeser sekitar 22 sentimeter dari titik presisi absolut yang ditargetkan pelatih melalui *joystick*.

Tabel 2. Hasil Pendaratan 30 *Shuttlecock* pada 6 Target Zona dan Kalkulasi *Mean Absolute Error* (MAE)

Zona Pendaratan (n = 5 per zona)	Target Koordinat (X, Y) dalam meter	Rata-rata Aktual (X, Y) dalam meter	Deviasi Jarak Euclidean (MAE) per Zona
Zona 1 (Kiri Depan / *Netting*)	(-2.00, 1.50)	(-2.10, 1.41)	0,13 meter
Zona 2 (Kanan Depan / Netting)	(2.00, 1.50)	(2.05, 1.58)	0,09 meter
Zona 3 (Kiri Tengah / *Drive*)	(-2.00, 3.50)	(-2.15, 3.65)	0,21 meter
Zona 4 (Kanan Tengah / *Drive*)	(2.00, 3.50)	(2.12, 3.40)	0,15 meter
Zona 5 (Kiri Belakang / *Lob*)	(-2.00, 5.50)	(-2.26, 5.72)	0,34 meter
Zona 6 (Kanan Belakang / *Lob*)	(2.00, 5.50)	(2.30, 5.75)	0,39 meter
Total Rata-rata Kesalahan (Total MAE Sistem)			**0,22 meter**

Variasi deviasi spasial yang terekam pada uji pendaratan, terutama pembesaran nilai MAE pada zona belakang (Zona 5 dan 6), secara fundamental dikendalikan oleh fenomena aerodinamika proyektil, bukan murni dari kelemahan mekanika alat. Sebagaimana dijelaskan pada landasan teoretis, *shuttlecock* memiliki struktur *bluff body* di mana rangkaian bulu alaminya bertindak sebagai parasut yang menciptakan gaya hambat (gaya *drag*) eksponensial saat bergerak melawan udara. Ketika mesin pelontar beroperasi pada PWM tinggi untuk menjangkau Zona 5 dan 6, roda friksi memberikan tekanan mekanik (*compression force*) yang ekstrem pada gabus. Hal ini memicu mikrodeformasi sesaat pada sudut bulu *shuttlecock* sesaat setelah dilontarkan. Deformasi asimetris sekecil apa pun pada susunan bulu ini akan mengubah profil aerodinamis dan membelokkan lintasan secara tak terprediksi (*drift*) selama fase deselerasi di udara, yang termanifestasi sebagai pembesaran *error* pendaratan hingga 0,39 meter pada jarak jauh.

Interpretasi terhadap nilai total MAE sebesar 0,22 meter secara definitif menyimpulkan bahwa tingkat presisi prototipe ini sangat layak dan sepenuhnya berada di dalam batas toleransi untuk memfasilitasi pelatihan bulu tangkis berkinerja tinggi. Dalam konteks ilmu keolahragaan (*sports science*), panjang kepala raket bulu tangkis standar adalah sekitar 25 hingga 28 sentimeter. Oleh karena itu, deviasi rata-rata sebesar 22 sentimeter membuktikan bahwa *shuttlecock* akan selalu jatuh tepat berada di dalam area jangkauan jepretan raket atau radius pergerakan langkah minor (*split step*) atlet. Alih-alih dipandang sebagai kecacatan sistem, deviasi mikroskopis yang diakibatkan oleh turbulensi aerodinamis ini justru menguntungkan; ia secara alami menyimulasikan ketidakpastian (*chaos*) dari pukulan manusia yang sesungguhnya. Hal ini selaras dengan tujuan utama pengembangan sistem IoT dinamis, yakni mencegah atlet menghafal ritme mesin dan memaksa mereka terus mengasah waktu reaksi visual serta kelincahan antisipatif di lapangan.

3.2. Evaluasi Latensi Jaringan dan Keandalan Teleoperasi IoT

Keandalan arsitektur *Internet of Things* (IoT) yang diterapkan pada sistem kendali jarak jauh terbukti memfasilitasi lingkungan teleoperasi yang sangat responsif, memenuhi kriteria krusial untuk simulasi olahraga waktu nyata (*real-time*). Berdasarkan perekaman data secara empiris terhadap 500 sampel transmisi perintah dari antarmuka *joystick* menuju mikrokontroler aktuator, performa jaringan secara konsisten berada jauh melampaui batas ambang minimal yang disyaratkan. Ringkasan statistik kinerja jaringan yang diuraikan pada **Tabel 3** memperlihatkan bahwa rata-rata latensi *End-to-End* (L_{avg}) sistem hanya berada di angka 45 milidetik dengan throughput stabil pada 12,5 kbps. Nilai L_{avg} aktual ini secara signifikan berada di bawah ambang batas target maksimal yaitu 200 milidetik. Dalam kajian ergonomi kognitif dan interaksi manusia-komputer (HCI), penundaan sistem di bawah 200 milidetik diklasifikasikan sebagai ambang persepsi visual tidak kasat mata (*imperceptible delay*), yang berarti pelatih akan merasakan bahwa mesin melontarkan bola secara instan tepat pada saat tuas *joystick* digerakkan tanpa adanya jeda sensorik.

Tabel 3. Ringkasan Statistik Kinerja Jaringan IoT Berdasarkan 500 Sampel Transmisi

Parameter Kinerja Jaringan	Nilai Aktual Terukur	Target / Ambang Batas Ideal	Status Kelayakan
Rata-rata Latensi *End-to-End* (L_{avg})	45 ms	< 200 ms	Sangat Baik
Packet Loss	0,4 %	< 2,0 %	Sangat Baik
Throughput Transmisi Data	12,5 kbps	> 5,0 kbps	Baik
Jitter (Variasi Latensi)	8 ms	< 20 ms	Baik

Tingkat keandalan transmisi protokol MQTT pada sistem ini memperlihatkan integritas data yang luar biasa, dibuktikan dengan rasio *packet loss* yang hampir dapat diabaikan. Seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 3**, persentase kehilangan paket data selama 500 kali uji transmisi kontinu hanya tercatat sebesar 0,4%, jauh di bawah batas toleransi operasional teleoperasi kritis yang umumnya dipatok pada angka maksimal 2%. Temuan *packet loss* yang sangat minimal ini mengonfirmasi bahwa sistem terhindar dari anomali *dropped command* (perintah yang gagal dieksekusi). Secara praktis di lapangan, hal ini menjamin bahwa setiap kali pelatih menekan tombol *trigger* pada *joystick* atau mengubah parameter kecepatan secara mendadak, mesin akan merespons dengan eksekusi mekanik yang presisi.

Ketiadaan *delay* mekanik atau perintah yang terputus ini sangat fundamental; cacat jaringan sekecil apa pun dapat merusak ritme pemusatan perhatian atlet dan mereduksi validitas sesi latihan itu sendiri.

Secara komprehensif, pencapaian latensi yang sangat rendah dan stabilitas koneksi nirkabel ini secara langsung merealisasikan tujuan utama dari penelitian, yakni memecahkan kebuntuan metodologis pada penggunaan mesin pelontar konvensional. Mesin komersial generasi sebelumnya, yang bergantung pada siklus *open-loop* statis, membatasi kemampuan pelatih untuk mengintervensi ritme mesin, sehingga atlet hanya dilatih untuk menghafal pola. Melalui pemangkasan L_{avg} hingga menyentuh 45 milidetik, prototipe mesin pelontar berbasis IoT ini bertransformasi menjadi ekstensi tangan pelatih (*robotic extension*). Pelatih kini memiliki otoritas penuh untuk memanipulasi arah (*pan/tilt*) dan kecepatan lontaran secara acak, instan, dan adaptif merespons posisi atlet di lapangan. Kinerja jaringan yang *seamless* ini meletakkan fondasi yang solid bagi penerapan teknologi mekatronika dalam pelatihan bulu tangkis dinamis, memungkinkan penciptaan situasi *chaos* buatan yang esensial untuk melatih waktu reaksi (RT), kelincahan antisipatif, dan kecerdasan taktis atlet saat menghadapi dinamika pertandingan yang sesungguhnya.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi prototipe mesin pelontar shuttlecock interaktif berbasis Internet of Things (IoT) dengan kendali joystick nirkabel. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki performa mekanik dan komunikasi yang sangat baik, ditunjukkan oleh hubungan linear yang kuat antara sinyal PWM dan kecepatan lontaran ($R^2 = 0{,}994$), kecepatan maksimum mencapai 308,5 km/jam, serta nilai Mean Absolute Error (MAE) sebesar 0,22 m yang masih berada dalam batas toleransi latihan atlet. Selain itu, arsitektur IoT yang diterapkan menghasilkan rata-rata latensi end-to-end sebesar 45 ms dan packet loss sebesar 0,4%, sehingga mampu mendukung operasi telekontrol secara real-time. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya berfungsi sebagai mesin pelontar shuttlecock otomatis, tetapi juga mampu menjadi media latihan interaktif yang memberikan fleksibilitas bagi pelatih dalam mengatur variasi kecepatan, arah, dan pola serangan secara dinamis. Dengan demikian, alat ini berpotensi meningkatkan kualitas latihan atlet, khususnya dalam pengembangan kemampuan reaksi, antisipasi, dan adaptasi terhadap situasi pertandingan yang tidak terduga. Untuk penelitian selanjutnya, pengembangan dapat difokuskan pada peningkatan tingkat otonomi sistem melalui integrasi teknologi computer vision dan kecerdasan buatan. Pendekatan ini diharapkan memungkinkan mesin melakukan pelacakan posisi atlet secara real-time serta menghasilkan strategi penargetan shuttlecock yang adaptif dan otomatis, sehingga efektivitas latihan dapat ditingkatkan tanpa ketergantungan penuh pada operator manusia.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Burhan Z, Herlina H, Ripai ASM. Program Coaching Clinic dalam Meningkatkan Kualitas Pemain Muda Bulu Tangkis di Desa Aik Mual. Devote : Jurnal Pengabdian Masyarakat Global 2024;3:228–35. https://doi.org/10.55681/devote.v3i4.3530.

[2] Kusuma LSW, Nurdin, Sobri. Latihan Perseptual dalam Meningkatkan Taktik dan Strategi Bermain Bulutangkis Berbasis PBA pada Atlet PELATDA LOTIM. Journal Sport, Science, Health and Tourism of Mandalika (Jontak) 2024;5:24–3.

[3] Sya'bani MS, Hermawan I, Arifin. Pengaruh Latihan Langkah Bayangan Terhadap Keterampilan Bulu Tangkis untuk Anak Usia 7-12 Tahun di Desa Pasanggrahan. Jumper: Jurnal Mahasiswa Pendidikan Olahraga 2024;4:844–56.

[4] Yolanda A, Chaeroni A, Hb B, Haris F, Padang N, Kesehatan D, et al. The Effect of Multi Shuttle Smash Drill and Smash Block Lift Training Methods on Badminton Smash Ability The Effect Of Multi Shuttle Smash Drill And Smash Block Lift Training Methods On Ability Badminton Smash. Jurnal Ilmu Keolahragaan 2020;2025:273–80. https://doi.org/10.21831/jk.vXiY.00001.

[5] Kusuma L, Jamaludin. Efektivitas Latihan Drill Lob dan Multishuttle terhadap Ketepatan Pukulan Lob Atlet Bulutangkis PB. Sahabat. Journal Sport Science, Health and Tourism of Mandalika (Jontak) e-ISSN 2722-3116 2025:245–55. https://doi.org/10.36312/jontak.vi.5337.

[6] Reis F, Alaiti R, Vallio C, Hespanhol L. Artificial intelligence and Machine Learning approaches in sports: Concepts, applications, challenges, and future perspectives. Braz J Phys Ther 2024;28:101083. https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2024.101083.
[7] Ardiansyah F, Haryanto L, Salahuddin M. Pengembangan Model Pembelajaran Jasmani Adaptif untuk Siswa Berkebutuhan Khusus Berbasis Pendekatan Multisensori. Jurnal Pendidikan Olahraga 2025;15:257–63.
[8] Sahabuddin. Periode Pelatihan Fisik untuk Atlet Elit: Konsep Saat Ini dan Arah Masa Depan. Mutiara Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia 2025;3. https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00363/full.
[9] Matondang AF, Simarmata K, Sinambela AA, Sihotang K, Siregar YI, Syabaruddin A. Pendekatan Kepelatihan Adaptif Untuk Tuna Grahita: Strategi Dan Implementasi Dalam Meningkatkan Kinerja Atlet. JURNAL DUNIA PENDIDIKAN 2026;6.
[10] Yuliawan E, Sukendro S, Khairunnisa F, Yusradinafi Y, Munar H, Aslina CV. Revitalisasi Kompetensi Pelatih Olahraga Melalui Pelatihan Dasar Berbasis Kompetensi di Muaro Jambi. Jurnal Pengembangan Dan Pengabdian Masyarakat 2026;5:1–12. https://doi.org/10.22437/bangdimas.v5i1.50482.
[11] Rohendi A, Rustiawan H. Kebutuhan Sport Science pada Bidang Olahraga Prestasi. JOURNAL RESPECS 2020;2:32. https://doi.org/10.31949/jr.v2i1.2013.
[12] Manalu N, Luthfi Avicenna Nst I, Pratama Putra R, Manja Perdana Saragih S, Aisyah Lubis S, William Iskandar Ps J V, et al. Pendekatan Inovatif dalam Pengembangan Kompetensi Kepelatihan di Era Digital. Jurnal Ilmu Pendidikan Dan Ekonomi 2024;9.
[13] Rohendi A, Rustiawan DH. Kebutuhan Sport Science pada Bidang Olahraga Prestasi. Research Physical Education and Sports 2020;2:32–43.
[14] Sihotang H, Pd M, Penerbitan P, Buku P, Tinggi P. METODE PENELITIAN KUANTITATIF. 2023.
[15] Ma'mun H, Mukhtar A, Burhanudin A, Hermana R. REVOLUSI IoT: MENGOPTIMALKAN TEKNOLOGI UNTUK MASA DEPAN CERDAS. 1st ed. Bandung: Penerbit Widina Media Utama; 2023.
[16] Nursakinah B, Syafitri K, Wijaya MA, Fahlapi F. ANALISIS PENGARUH JARAK DAN HALANGAN PADA TRANSMISII DATA JARINGAN NIRKABEL DENGAN MENGGUNAKAN METODE SIGNAL-TO-NOISE RATIO (SNR). Journal Education and Technology 2025;6:183–98.
[17] Joko Ristono, Luki Ardiantoro. Implementasi Internet of Things (IoT) untuk Optimalisasi Manajemen Aset Peralatan Praktikum Menggunakan RFID dan NodeMCU. Jurnal Publikasi Sistem Informasi Dan Manajemen Bisnis 2025;5:79–88. https://doi.org/10.55606/jupsim.v5i1.5935.
[18] Liu X, Chang Y, Yao H, Su B. Secure Transmission Method of Power Quality Data in Power Internet of Things Based on the Encryption Algorithm. International Journal of Data Warehousing and Mining 2023;19. https://doi.org/https://doi.org/10.4018/IJDWM.330014.
[19] Hafizh Ridwan M, Solehudin A, Rozikin Informatika C, Singaperbangsa Karawang Jl Ronggo Waluyo UH, Timur T, Barat J. ANALISIS QUALITY OF SERVICE (QOS) JARINGAN WIRELESS DENGAN PENERAPAN PCQ (STUDI KASUS: KANTOR KECAMATAN KEMANG). vol. 8. 2024.
[20] Miftahuddin Y, Umaroh S, Karim FR. PERBANDINGAN METODE PERHITUNGAN JARAK EUCLIDEAN, HAVERSINE, DAN MANHATTAN DALAM PENENTUAN POSISI KARYAWAN. Jurnal Tekno Insentif 2020;14:69–77. https://doi.org/10.36787/jti.v14i2.270.