JURNAL TELISKA **P-ISSN: 2085-0786**
Volume 19 No I Maret 2026 Page 16-26 **E-ISSN: 2654-2765**

PREDIKSI PEMANENAN ENERGI PADA ARRAY PIEZOELEKTRIK KONFIGURASI SERI-PARALEL BERBASIS RANDOM FOREST REGRESSION

Fairuz Athallah[1], Yurni Oktarina[2*], Pola Risma[3], Tresna Dewi[4], Assyifa Mourlina Faraquinnsha[5], Hendra Marta Yudha[6]
Sarjana Terapan Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Sriwijaya[1,3,4]
Teknik Elektronika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Sriwijaya[2]
MAN Insan Cendekia, OKI[5]
Teknik Elektro-Universitas Tridinanti Palembang[6]
yurni_oktarina@polsri.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis karakteristik elektrik dan memprediksi luaran daya sistem piezoelectric smart carpet melalui komparasi konfigurasi rangkaian seri dan paralel menggunakan algoritma Random Forest Regression (RFR). Sistem dirancang menggunakan 16 elemen keramik piezoelektrik per blok yang diintegrasikan ke dalam struktur karpet sepanjang 100 cm. Data eksperimental dikumpulkan dari lima subjek dengan massa tubuh 54–98 kg melalui aktivitas jalan dan lari, menghasilkan 100 sampel observasi. Hasil pengujian menunjukkan konfigurasi seri menghasilkan rata-rata daya 1649.3 mW, melampaui konfigurasi paralel sebesar 104.8% yang hanya menghasilkan 805.1 mW, dengan tegangan puncak mencapai 80 V pada aktivitas lari. Model RFR yang dioptimasi menggunakan GridSearchCV dengan 5-fold crossvalidation mencapai koefisien determinasi (R 2) sebesar 88.25%, Mean Absolute Error (MAE) 145.06 mW, dan Root Mean Squared Error (RMSE) 179.15 mW. Analisis feature importance mengungkapkan bahwa konfigurasi rangkaian (47.59%) dan frekuensi langkah (47.18%) merupakan faktor dominan, sementara massa tubuh hanya berkontribusi 5.22% akibat saturasi mekanik pada struktur karpet. Penelitian ini membuktikan RFR efektif sebagai model prediktif untuk optimasi sistem pemanenan energi biomekanik pada infrastruktur publik.

Kata kunci : *Random Forest Regression*, Pemanenan Energi, Piezoelektrik, Smart Carpet, Konfigurasi Seri-Paralel

ABSTRACT

This study analyzes the electrical characteristics and predicts the power output of a piezoelectric smart carpet system through a comparative analysis of series and parallel circuit configurations using the Random Forest Regression (RFR) algorithm. The system was designed using 16 piezoelectric ceramic elements per block integrated into a 100 cm carpet structure. Experimental data were collected from five subjects with body masses ranging from 54–98 kg through walking and running activities, yielding 100 observational samples. Results show the series configuration produced an average power output of 1649.3 mW, outperforming the parallel configuration by 104.8%, which yielded only 805.1 mW, with peak voltage reaching 80 V during running. The RFR model optimized using GridSearchCV with 5-fold cross-validation achieved a coefficient of determination (R^2) of 88.25%, a Mean Absolute Error (MAE) of 145.06 mW, and a Root Mean Squared Error (RMSE) of 179.15 mW. Feature importance analysis revealed that circuit configuration (47.59%) and step frequency (47.18%) are the dominant predictive factors, while body mass contributed only 5.22% due to mechanical saturation in the carpet structure. This study confirms that RFR is effective as a predictive model for optimizing biomechanical energy harvesting systems in public infrastructure.

Keywords : Random Forest Regression, Energy Harvesting, Piezoelectric, Smart Carpet, Series-Parallel Configuration

DOI : 10.36257/teliska.v19iI.11829

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

1. PENDAHULUAN

Pesatnya perkembangan teknologi di bidang energi terbarukan saat ini mulai berfokus pada pemanenan energi berskala mikro (*micro-energy harvesting*), salah satunya melalui pemanfaatan energi kinetik dari aktivitas manusia[1]. Teknologi piezoelektrik menjadi instrumen utama dalam konversi energi ini karena kemampuannya mengubah tekanan mekanik menjadi listrik secara langsung[2]. Implementasi sensor piezoelektrik dalam bentuk smart carpet di area publik berdensitas tinggi menawarkan potensi sumber energi alternatif yang berkelanjutan [3], [4]. Namun, karakteristik keluaran daya piezoelektrik yang sangat kecil dan fluktuatif menjadi hambatan utama dalam aplikasi praktisnya[5].

Efisiensi konversi energi pada sistem ini sangat bergantung pada konfigurasi rangkaian elektrik yang digunakan, baik secara seri maupun paralel. Rangkaian seri cenderung meningkatkan tegangan keluaran dengan impedansi internal yang tinggi, sedangkan rangkaian paralel lebih efektif dalam meningkatkan arus keluaran[6]. Permasalahannya, performa optimal dari kedua konfigurasi tersebut tidak bersifat statis, melainkan sangat dipengaruhi oleh variabel biomekanik yang dinamis, seperti berat badan dan kecepatan langkah kaki pejalan kaki. Hubungan non-linear antara variabel input dinamis ini dengan respon elektrik sistem seringkali tidak dapat dipetakan secara akurat menggunakan perhitungan model fisika linear sederhana[7],[8].

Guna mengatasi kompleksitas tersebut, diperlukan pendekatan berbasis data (datadriven) melalui implementasi kecerdasan buatan. Algoritma *Random Forest Regression* (RFR) merupakan metode ensemble learning yang memiliki kapabilitas sangat baik dalam menangani data non-linear dan memiliki ketahanan terhadap overfitting[9], [10]. Melalui pemodelan RFR, pola hubungan antara variasi beban masukan terhadap estimasi daya keluaran dapat dipetakan secara presisi, sehingga konfigurasi elektrik yang paling efisien dapat ditentukan secara otomatis berdasarkan profil aktivitas pengguna[11].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik elektrik dan melakukan optimasi keluaran daya pada piezoelectric smart carpet melalui komparasi model RFR pada rangkaian seri dan paralel. Batasan dalam studi ini difokuskan pada variabel target berupa daya (mW) yang diturunkan dari nilai puncak tegangan dan arus searah (DC) hasil penyearahan. Keberhasilan model dievaluasi berdasarkan metrik akurasi statistik (R 2 , MAE, RMSE) untuk menentukan konfigurasi terbaik yang mampu memaksimalkan potensi pemanenan energi [12]. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan dalam pengembangan sistem manajemen daya yang cerdas untuk aplikasi pemanenan energi di infrastruktur publik.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pemanenan energi melalui material piezoelektrik merupakan metode konversi energi mekanik dari getaran atau tekanan menjadi energi listrik melalui efek piezoelektrik langsung [6]. Mekanisme ini sangat bergantung pada interaksi biomekanik antara langkah kaki manusia dan struktur lantai, di mana gaya impak yang dihasilkan ditentukan oleh massa tubuh (m) dan akselerasi (a) sesuai hukum Newton II dalam persamaan 2.1 berikut [13].

$$F = m \cdot a \qquad 2.1$$

Secara kinetik, frekuensi langkah atau rate of motion (f) memengaruhi laju deformasi material piezoelektrik, yang secara langsung

DOI : 10.36257/teliska.v19iI.11829

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

berbanding lurus dengan arus yang dihasilkan pada persamaan 2.2 [5], [14].

$$I = d33 \cdot dF\ dt \quad (2.2)$$

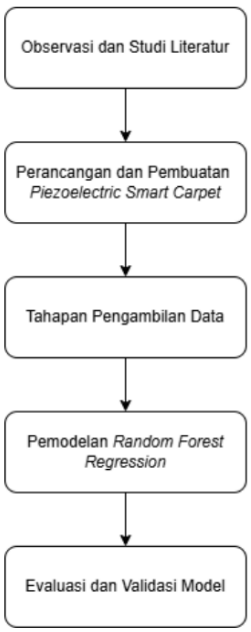
Studi terbaru menunjukkan bahwa karakteristik getaran manusia bersifat stokastik, sehingga memerlukan desain struktur karpet yang mampu meredam beban berlebih namun tetap sensitif terhadap tekanan rendah [15]. Karakteristik material Lead Zirconate Titanate (PZT) yang umum digunakan memiliki konstanta piezoelektrik (d_{33}) yang tinggi, menjadikannya sangat efektif untuk aplikasi pemanenan energi skala mikro pada area publik [3], [16].

Optimalisasi luaran daya pada sistem ini ditentukan oleh konfigurasi rangkaian elektrikal, baik secara seri maupun paralel. Dalam konfigurasi seri, total kapasitansi (Ceq) menurun ($1/C_{eq} = \sum 1/C_n$), yang membuat peningkatan tegangan keluaran ($V = Q/C_{eq}$), sehingga lebih efektif menembus ambang batas tegangan maju pada sirkuit penyearah. Sebaliknya, konfigurasi paralel meningkatkan total kapasitansi ($C_{eq} = \sum C_n$) dan densitas arus, namun sering kali menghasilkan tegangan yang lebih rendah [3],[5]. Fenomena impedansi internal yang tinggi pada elemen piezoelektrik memerlukan penyesuaian impedansi agar transfer daya maksimal dapat tercapai sesuai dengan teorema transfer daya maksimum [6],[17]. Integrasi dioda penyearah dengan jatuh tegangan rendah (low voltage drop) menjadi krusial untuk meminimalkan kerugian daya transien selama proses konversi dari arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC) [15], [18].

Prediksi performa sistem pemanen energi yang kompleks dan non-linear dapat dilakukan dengan akurat menggunakan pendekatan Machine Learning [19]. Algoritma Random Forest Regression (RFR) merupakan metode ensemble learning yang bekerja dengan membangun banyak pohon keputusan dan mengambil rata-rata prediksinya untuk mengurangi varians [20]. Keunggulan RFR terletak pada kemampuannya menangani fitur yang memiliki korelasi kompleks serta ketahanannya terhadap outliers melalui mekanisme bagging [20], [21]. Akurasi model ini dievaluasi menggunakan metrik Koefisien Determinasi (R_2) untuk mengukur sejauh mana variabel biomekanik dapat menjelaskan variabilitas luaran daya. Penggunaan metrik *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Root Mean Squared Error* (RMSE) juga diperlukan untuk memvalidasi tingkat kesalahan prediksi secara kuantitatif [9]. Pendekatan berbasis data ini memungkinkan optimasi desain sistem smart carpet secara virtual sebelum dilakukan implementasi fisik [15].

3. METODOLOGI

Metodologi penelitian ini terdiri dari tiga tahap utama, yaitu perancangan dan pembuatan sistem perangkat keras (smart carpet), pengumpulan data eksperimental, dan pengembangan model prediktif menggunakan Random Forest Regression (RFR).



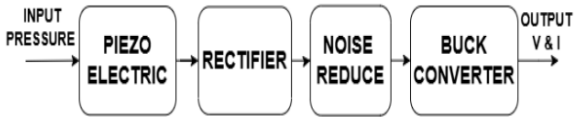
Gambar 1. Alur Penelitian

DOI : 10.36257/teliska.v19iI.11829

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

3.1. Rancang Bangun Perangkat Keras dan Konfigurasi Elektrik

Sistem pemanen energi ini dirancang dengan mengintegrasikan unit transduser piezoelektrik, struktur mekanik pendistribusi beban, dan sistem pengkondisian daya. Arsitektur sistem secara keseluruhan diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Blok Arsitektur

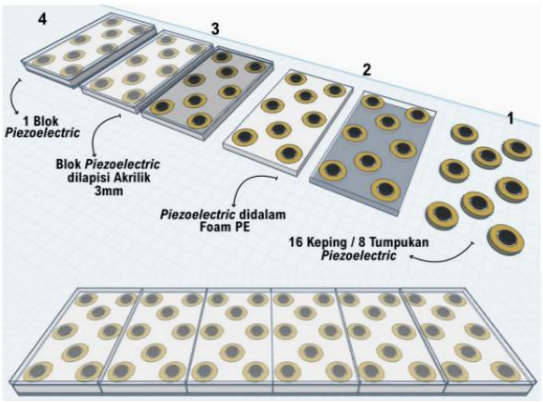
Sistem Spesifikasi teknis komponen utama yang digunakan dalam pengembangan prototipe dirangkum dalam Tabel 1. Penggunaan Noise Reduce dan Buck Converter didasarkan pada kebutuhan untuk meminimalkan rugi-rugi daya (power loss) dan menstabilkan keluaran DC yang fluktuatif. Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Komponen

Komponen	Spesifikasi
Dioda *Bridge* (*Rectifier*)	2W10 2A 1000V
Kapasitor Mylar (*Noise Reduce*)	2E104J 100nF
Dioda *Schottky* (*Buck Converter*)	1N5819 1A 40V
PCB Dot Matrix	2x8cm FR4
Rubber Foam Pad	Ketebalan 4mm
Foam PE 2cm	17cm x 26cm
Akrilik	2mm (17cm x 26cm) 3mm (100cm x 26cm)

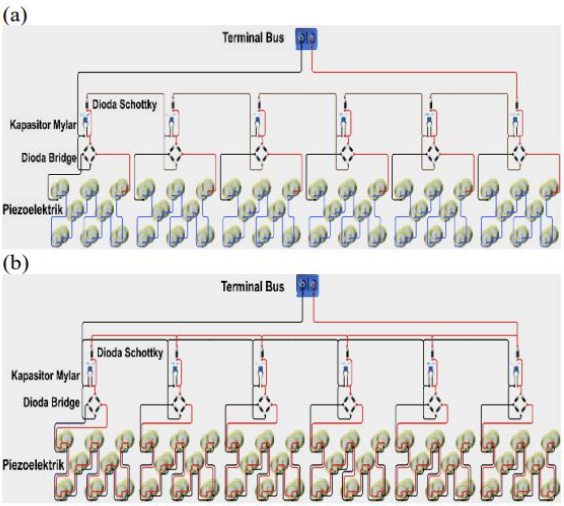
Struktur mekanik smart carpet dirancang untuk optimalisasi distribusi tekanan dan perlindungan sensor. Setiap blok modular terdiri dari 16 elemen piezoelektrik yang dikonfigurasi menjadi 8 modul sensor berpola silang guna meminimalkan dead zone. Setiap modul dilengkapi rubber foam 4 mm sebagai pegas mekanik paralel untuk membatasi deformasi selama siklus kompresidekompresi.

Modul tersebut diintegrasikan ke dalam lapisan PE Foam sebagai pengunci posisi dan peredam getaran. Lapisan akrilik 3 mm ditempatkan di bagian atas sebagai penyebar gaya impak, sementara enam unit blok disusun linear sepanjang 100 cm di atas landasan akrilik 2 mm untuk membentuk satu lintasan utuh. Tahapan perancangan sistem ini secara detail ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur Mekanik Smart Carpet

Untuk keperluan analisis komparatif, sistem diimplementasikan ke dalam dua jenis konfigurasi elektrik seri dan paralel. Pada konfigurasi seri, unit blok dihubungkan secara daisy-chain (Gambar 4.a). Sebaliknya, pada konfigurasi paralel, seluruh terminal dihubungkan ke busbar tunggal (Gambar 4.b). (a) (b)

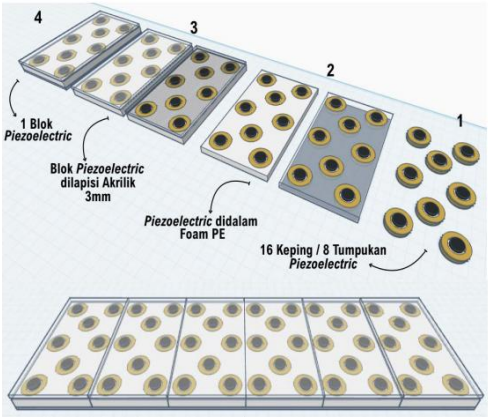


Gambar 4. (a) Skematik Rangkaian Seri, (b) Skematik Rangkaian Paralel

DOI : 10.36257/teliska.v19iI.11829

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

Realisasi fisik smart carpet mengintegrasikan komponen mekanik dan elektrik menjadi sistem fungsional. Perangkat ini diimplementasikan dalam dua lintasan (lines) independen dengan konfigurasi sirkuit seri dan paralel untuk tujuan analisis komparatif, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Implementasi Rangkaian Seri dan Paralel Smart Carpet

3.2. Pengumpulan Data

Eksperimental Dataset dibangun melalui pengujian eksperimental terkontrol yang melibatkan lima subjek manusia. Pemilihan subjek didasarkan pada variasi massa tubuh (54 kg hingga 98 kg) guna merepresentasikan rentang beban biomekanik yang luas dalam pemodelan regresi. Profil detail subjek dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Profil Subjek dan Variabel Eksperimen Parameter

Parameter	Keterangan/Nilai
Jumlah Subjek	5 Orang
Rentang Berat Badan	54 kg, 65 kg, 74 kg, 98 kg
Jenis Aktivitas	Jalan (Walk), Lari (Run)
Konfigurasi Rangkaian	Seri, Paralel
Repetisi per Skenario	5 Kali
Total Sampel	100 Sampel

Setiap subjek melakukan aktivitas jalan dan lari di atas dua lintasan smart carpet (seri dan paralel). Pengambilan data dilakukan secara berulang sebanyak lima kali untuk setiap kombinasi aktivitas dan konfigurasi guna memastikan stabilitas dan repetisi data. Parameter elektrik berupa Tegangan Puncak (Peak Voltage) dan Arus Puncak (Peak Current) diukur menggunakan multimeter digital seperti pada Gambar 6. (a) (b).



Gambar 6. (a) Tahap pengambilan Data, (b) Experimental Setup

Prosedur akuisisi data dimulai dengan pencatatan berat badan subjek sebagai variabel input independen. Selanjutnya, subjek melakukan langkah kaki dinamis pada unit sensor, di mana energi kinetik yang dihasilkan dikonversi menjadi sinyal DC melalui rangkaian pengkondisian daya. Nilai daya keluaran (P) dihitung sebagai variabel target menggunakan hubungan Persamaan 3.1.

$$P = V_{peak} \times I_{peak} \qquad (3.1)$$

Seluruh data yang terkumpul kemudian dikonsolidasikan ke dalam format CSV untuk tahap pra-pemrosesan model Machine Learning.

DOI : 10.36257/teliska.v19iI.11829

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

3.3. Pengembangan Model Random Forest Regression

Pengembangan model prediktif dilakukan menggunakan algoritma Random Forest Regression (RFR) dengan bahasa pemrograman Python (Scikit-Learn). Dataset (n=100) diproses melalui label encoding dan dibagi menjadi training dan testing set dengan rasio 80:20. RFR dipilih karena kemampuannya meminimalkan varians melalui teknik bagging. Optimasi model dilakukan menggunakan *GridSearchCV dengan 5-fold cross-validation* untuk menentukan hiperparameter terbaik pada *n_estimators, max_depth, dan min_samples_split.*

Performa model dievaluasi menggunakan tiga metrik utama yaitu *Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Squared Error (RMSE),* dan Koefisien Determinasi (R^2). MAE mengukur rata-rata besarnya kesalahan absolut, RMSE memberikan bobot lebih pada kesalahan yang besar, dan R^2 menunjukkan sejauh mana model mampu menjelaskan variabilitas data. Formulasi ketiga metrik tersebut didefinisikan sebagai berikut.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i| \qquad (3.2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \qquad (3.3)$$

Di mana y_i adalah nilai aktual, $\hat{y}_i$ adalah nilai prediksi, $\bar{y}$ adalah rata-rata nilai aktual, dan n adalah jumlah sampel data.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

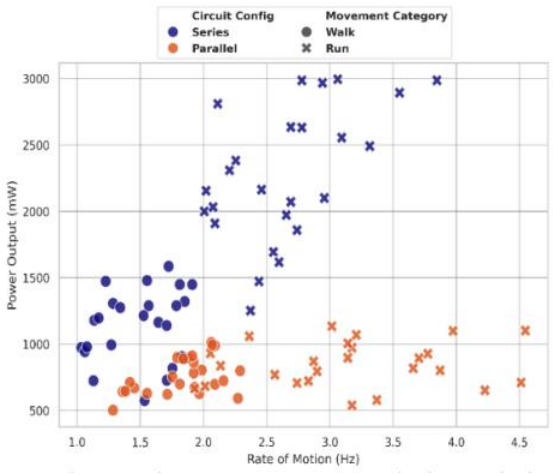
4.1 Analisis Karakteristik Elektrik Berdasarkan Variabel Biomekanik

Pengumpulan data eksperimental menghasilkan 100 sampel observasi yang diperoleh melalui pengujian fisik langsung pada sistem piezoelectric smart carpet. Dataset tersebut mencakup 50 sampel untuk konfigurasi rangkaian seri dan 50 sampel untuk rangkaian paralel yang diambil dari lima subjek dengan rentang massa tubuh 54 kg hingga 98 kg. Ringkasan statistik deskriptif dari seluruh parameter eksperimental disajikan pada Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Statistik Deskriptif Variabel Eksperimental

Parameter	Mean	Min	Max	Satuan
Berat Badan	75.4	54	98	Kg
Rate of Motion	2.28	1.03	4.54	Hz
Power Output	1255.6	501.8	2995.7	mW

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa luaran daya sistem sangat sensitif terhadap frekuensi langkah (Rate of Motion) yang ditampilkan pada Gambar 7. Berdasarkan Tabel 3, rata-rata daya yang dihasilkan adalah sebesar 1255.6 mW, dengan nilai puncak mencapai 2995.7 mW pada kondisi aktivitas lari.



Gambar 7. Sebaran Power Output Terhadap Variasi Frekuensi Langkah Subjek

Perbedaan variasi frekuensi langkah berdasarkan aktivitas jalan dan lari memberikan dampak signifikan pada stabilitas tegangan transien dan sebaran daya yang dihasilkan. Pada aktivitas lari, sebaran daya cenderung lebih luas dan terkonsentrasi pada nilai yang lebih tinggi karena besarnya gaya impak yang mengenai

DOI : 10.36257/teliska.v19iI.11829

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

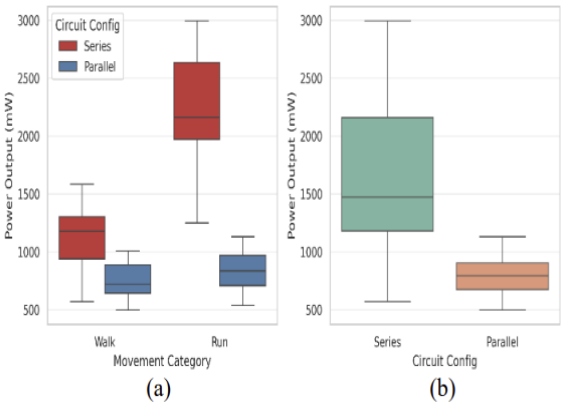
elemen sensor. Temuan ini penting dalam pengembangan model regresi untuk memprediksi potensi energi yang dapat dipanen pada area publik dengan mobilitas tinggi.

4.2 Perbandingan Power Output dari Konfigurasi Seri dan Paralel

Analisis komparatif dilakukan untuk menentukan konfigurasi optimal dalam memanen energi biomekanik. Hasil eksperimen menunjukkan perbedaan performa yang signifikan antara kedua konfigurasi, di mana rangkaian seri secara konsisten menghasilkan luaran daya yang lebih tinggi dibandingkan rangkaian paralel untuk seluruh skenario aktivitas. Ringkasan perbandingan disajikan pada Tabel 4 dan distribusi daya berdasarkan aktivitas serta konfigurasi rangkaian ditampilkan pada Gambar 8.

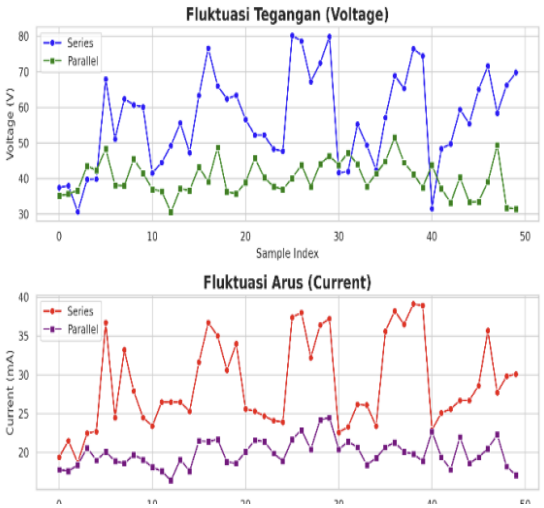
Tabel 4. Perbandingan Performa Elektrik Konfigurasi Seri dan Paralel

Konfigurasi rangkaian	Mean Tegangan (V)	Mean Arus (mA)	Mean Power Output (mW)
Seri	58.3	28.3	1649.3
Paralel	40.1	19.7	805.1



Gambar 8. Perbandingan Distribusi Power Output Berdasarkan; (a) Aktivitas, (b) Konfigurasi Rangkaian

Berdasarkan Tabel 4 dan Boxplot pada Gambar 8, rangkaian seri menghasilkan ratarata daya sebesar 1649.3 mW, unggul sebesar 104.8% dibandingkan konfigurasi paralel yang hanya menghasilkan 805.1 mW.



Gambar 9. Karakteristik Elektrik Transien dari Fluktuasi

Variabel Frekuensi Langkah Secara transien yang ditampilkan pada Gambar 9, konfigurasi seri mampu membangkitkan tegangan puncak hingga 80 V pada aktivitas lari. Keunggulan konfigurasi seri ini disebabkan oleh karakteristik elemen piezoelektrik yang memiliki impedansi internal tinggi. Dalam hubungan seri, akumulasi tegangan dari setiap keping piezoelektrik mempermudah sistem untuk melampaui ambang batas tegangan maju (forward voltage drop) pada dioda penyearah, sehingga proses pengisian kapasitor filter menjadi lebih efektif.

Sebaliknya, pada konfigurasi paralel, meskipun terdapat peningkatan kapasitas arus secara teoritis, tegangan yang dihasilkan cenderung lebih rendah dan sering kali mengalami rugi-rugi daya yang lebih besar sebelum mencapai sistem akuisisi data. Karakteristik ini menunjukkan bahwa untuk aplikasi smart carpet dengan jumlah sensor terbatas, konfigurasi seri memberikan efisiensi konversi energi yang lebih baik dalam menangkap impuls mekanik yang singkat dan fluktuatif dari langkah kaki manusia.

DOI : 10.36257/teliska.v19iI.11829

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

4.3 Analisis Performa Model Random Forest Regression dan Kepentingan Fitur (*Feature Importance*)

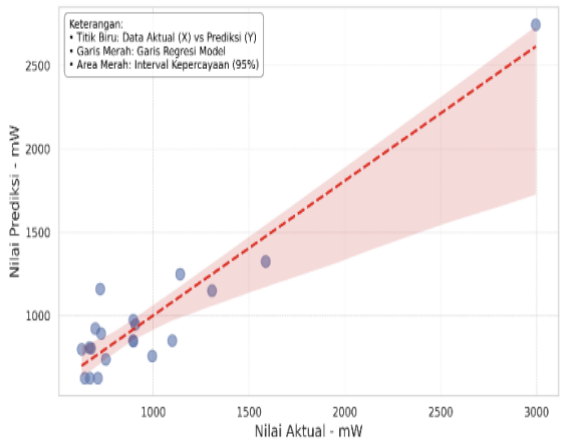
Evaluasi terhadap model Random Forest Regression (RFR) dilakukan untuk menguji sejauh mana algoritma machine learning dapat mengestimasi luaran daya berdasarkan input biomekanik dan konfigurasi elektrik. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan testing set, model menunjukkan kemampuan generalisasi yang baik. Metrik performa model diringkas dalam Tabel 5.

Tabel 5. Metrik Evaluasi Performa Model RFR

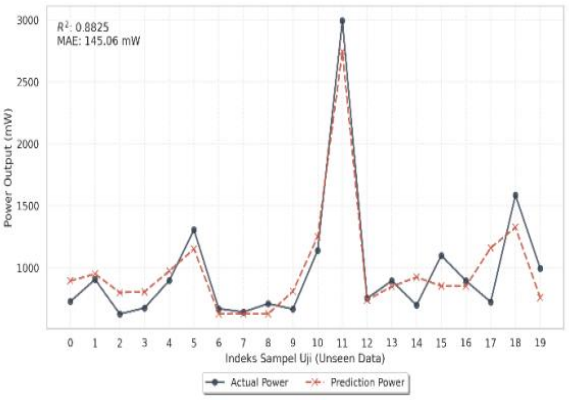
Metrik Evaluasi	Nilai
Koefisien Determinasi	88.25%
Mean Absolute Error (MAE)	145.06 mW
Root Mean Squared Error (RMSE)	179015 mW

Nilai R^2 sebesar 88.25% menunjukkan bahwa model RFR mampu menjelaskan mayoritas variabilitas data luaran daya. Meskipun terdapat nilai MAE sebesar 145.06 mW, margin kesalahan ini dianggap dapat diterima mengingat karakteristik piezoelektrik yang sangat fluktuatif saat menerima beban impulsif dari langkah kaki manusia. Rendahnya selisih antara nilai aktual dan prediksi mengonfirmasi bahwa optimasi hiperparameter melalui *GridSearchCV* telah berhasil meminimalkan overfitting pada dataset eksperimental yang terbatas.

Visualisasi perbandingan antara nilai aktual hasil pengukuran dan nilai prediksi model disajikan melalui *scatter plot* pada Gambar 10 dan *line chart* pada Gambar 11.



Gambar 10. Scatter Plot Nilai Aktual vs Prediksi Daya



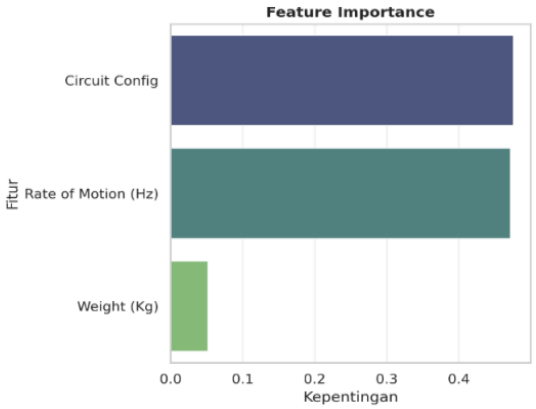
Gambar 11.Perbandingan Tren Nilai Aktual dan Prediksi pada Sampel Data Uji

Distribusi titik pada Gambar 10 yang terkonsentrasi di sekitar garis diagonal $y = x$ memvalidasi nilai R 2 sebesar 88.25%. Sementara itu, Gambar 11 menunjukkan bahwa model mampu mengikuti fluktuasi transien dari luaran daya piezoelektrik secara konsisten, meskipun terdapat deviasi pada beberapa titik puncak (peak). Kemampuan model dalam menangkap tren data ini membuktikan bahwa algoritma RFR mampu untuk estimasi energi biomekanik.

Untuk membedah faktor yang paling memengaruhi akurasi tersebut, dilakukan analisis *Feature Importance* seperti pada Gambar 12 berikut:

DOI : 10.36257/teliska.v19iI.11829

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765



Gambar 12. Analisis Kepentingan Fitur (Feature Importance) pada Model RFR

Hasil analisis menunjukkan bahwa Circuit Config/Konfigurasi Rangkaian (47.59%) dan Rate of Motion/Frekuensi Langkah (47.18%) memberikan kontribusi dominan yang hampir setara terhadap prediksi daya. Hal ini menegaskan bahwa optimasi energi pada smart carpet ditentukan oleh sinergi antara desain sirkuit elektrikal dan intensitas aktivitas fisik. Sebaliknya, variabel *Weight*/Berat Badan hanya memberikan kontribusi sebesar 5.22%. Rendahnya pengaruh variabel ini mengindikasikan adanya fenomena saturasi mekanik pada struktur karpet, di mana lapisan PE foam dan akrilik membatasi transmisi gaya berlebih ke elemen piezoelektrik.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa konfigurasi rangkaian elektrik memiliki peran penting dalam efisiensi pemanenan energi biomekanik. Rangkaian seri terbukti lebih optimal dengan rata-rata luaran daya mencapai 1649.3 mW. Capaian daya tersebut melampaui konfigurasi paralel sebesar 104.8% lebih tinggi karena kemampuan hubungan seri dalam mengakumulasi tegangan hingga 80 V yang efektif melampaui ambang batas sistem penyearah.

Di sisi lain, implementasi algoritma Random Forest Regression (RFR) mampu mengestimasi daya dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 88.25% dan *Mean Absolute Error* (MAE) sebesar 145.06 mW. Melalui analisis *feature importance*, ditemukan bahwa konfigurasi rangkaian (47.59%) dan frekuensi langkah (47.18%) merupakan faktor utama, sementara berat badan hanya memberikan kontribusi sebesar 5.22%. Rendahnya pengaruh massa tubuh ini mengonfirmasi adanya fenomena saturasi mekanik pada struktur karpet yang membatasi transmisi gaya berlebih, sehingga intensitas aktivitas fisik menjadi variabel yang lebih dominan dalam menentukan potensi energi yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Y. Zhang et al., “A review on energy harvesting for sustainable IoT monitoring systems,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 232, p. 116779, Feb. 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.11677 9.

[2] Q. He and J. Briscoe, “Piezoelectric Energy Harvester Technologies: Synthesis, Mechanisms, and Multifunctional Applications,” ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 16, no. 23, pp. 29491–29520, 2024, doi: https://doi.org/10.1021/acsami.3c17037.

[3] P. Visconti, L. Bagordo, R. Velázquez, D. Cafagna, and R. De Fazio, “Available Technologies and Commercial Devices to Harvest Energy by Human Trampling in Smart Flooring Systems: A Review,” Energies, vol. 15, no. 2, p. 432, 2022, doi: https://doi.org/10.3390/en15020432.

DOI : 10.36257/teliska.v19iI.11829

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

[4] M. A. Anggoro and Amperawan, "Implementasi PLTS Off-Grid 200 WP Dengan Sistem Monitoring Beban Berbasis Arduino Uno," J. TELISKA, vol. 17, no. 3, pp. 33–40, 2024, doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.1400491 2.

[5] Y. Oktarina, N. A. O. Ferrisa, and P. Risma, "Piezoelectric Output Analysis," Sriwij. Electr. Comput. Eng. J., vol. 1, no. 2, pp. 77–84, 2025, doi: https://doi.org/10.62420/selco.v1i2.10.

[6] N. Sezer and M. Koç, "A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting," Nano Energy, vol. 80, p. 105567, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.10 5567.

[7] J. Noh, S. Bae, Y.-J. Yoon, and P. Kim, "Nonlinear Dynamic Analysis of a Piezoelectric Energy Harvester with Mechanical Plucking Mechanism," Sensors, vol. 23, no. 13, p. 5978, 2023, doi: https://doi.org/10.3390/s23135978.

[8] N. Arora, P. Singh, R. Kumar, R. Pratap, and A. Naik, "Mixed Nonlinear Response and Transition of Nonlinearity in a Piezoelectric Membrane," ACS Appl. Electron. Mater., vol. 6, no. 1, pp. 155– 162, Jan. 2024, doi: https://doi.org/10.1021/acsaelm.3c00735 .

[9] G. James, D. Witten, T. Hastie, and R. Tibshirani, An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R, 2nd ed. Springer, 2021. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-0716- 1418-1.

[10] Y. Tong, "Data-Driven Computing Methods for Nonlinear Physics Systems with Geometric Constraints," Jun. 2024, arXiv preprint arXiv:2406.16956. doi: https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.169 56.

[11] M. Yadav, D. Yadav, R. K. Garg, R. K. Gupta, S. Kumar, and D. Chhabra, "Modeling and Optimization of Piezoelectric Energy Harvesting System Under Dynamic Loading," in Advances in Fluid and Thermal Engineering, B. S. Sikarwar, B. Sundén, and Q. Wang, Eds., Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 339–353. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16- 0159-0_30.

[12] H. E. Chimeh, S. Nabavi, M. A. Janaideh, and L. Zhang, "Deep-Learning-Based Optimization for a Low-Frequency Piezoelectric MEMS Energy Harvester," IEEE Sens. J., vol. 21, no. 19, pp. 21330–21341, 2021, doi: https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3102 537.

[13] K. K. Selim, I. H. Smaili, H. M. Yehia, M. M. R. Ahmed, and D. A. Saleeb, "Piezoelectric Sensors Pressed by Human Footsteps for Energy Harvesting," Energies, vol. 17, no. 10, p. 2297, 2024, doi: https://doi.org/10.3390/en17102297.

[14] APC International, "What Is Piezoelectric Theory," APC International Ltd. Accessed: Dec. 18, 2025. [Online]. Available: https://www.americanpiezo.com/knowle dge-center/piezo-theory/

P-ISSN: 2085-0786
E-ISSN: 2654-2765

[15] L. Olatomiwa et al., "Piezoelectric Floor Mat Systems for Sustainable Energy Harvesting," Saudi J. Eng. Technol., vol. 10, no. 6, pp. 260–269, 2025, doi: https://doi.org/10.36348/sjet.2025.v10i0 6.002.

[16] H. Wang and P. Zhang, "Enhancing the Performance of PZT-5H Piezoelectric Ceramics by Vacuum Sintering," Ceramics, vol. 8, no. 4, p. 139, 2025, doi: https://doi.org/10.3390/ceramics8040139 .

[17] J. Liang and W.-H. Liao, "Impedance matching for improving piezoelectric energy harvesting systems," in Proc. SPIE, San Diego, CA, USA: SPIE, Apr. 2010, p. 76430K. doi: https://doi.org/10.1117/12.847524.

[18] A. U. Din, S. C. Chandrathna, and J.-W. Lee, "Resonant Rectifier ICs for Piezoelectric Energy Harvesting Using Low-Voltage Drop Diode Equivalents," Sensors, vol. 17, no. 4, p. 901, 2017, doi: https://doi.org/10.3390/s17040901.

[19] K. K. Selim, L. Mostafa, and S. O. Abdellatif, "Machine learning-driven optimization of piezoelectric energy harvesters for low-frequency applications," Microsyst. Technol., vol. 31, no. 9, pp. 2599–2615, 2025, doi: https://doi.org/10.1007/s00542-025- 05879-0.

[20] S. S. Shukla, J. Dhanya, P. Kumar, Priyanka, and V. Dutt, "An ensemble random forest model for seismic energy forecasting," Nat. Hazards Earth Syst. Sci., vol. 25, no. 10, pp. 3713–3736, Oct. 2025, doi: https://doi.org/10.5194/nhess25-3713-2025.

[21] F. Diba, "Analisis Random Forest Menggunakan Principal Component Analysis Pada Data Berdimensi Tinggi," Indones. J. Comput. Sci., vol. 12, no. 4, Aug. 2023, doi: https://doi.org/10.33022/ijcs.v12i4.3329.