



Analisis Respon Frekuensi dan Kinerja Superkapasitor pada Pemanen Energi Berbasis *Piezoelectric*

Frequency Response and Performance Analysis of Supercapacitors in Piezoelectric-Based Energy Harvesters

Ferdi Nugraha Pratama*, Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

Sumarna, Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

*e-mail: ferdinugraha50@gmail.com

Abstrak. Masalah lingkungan dan biaya pemeliharaan yang tinggi karena perangkat *Internet of Things* (IoT) bergantung pada baterai konvensional. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana sistem pemanen energi mekanik berbasis material piezoelektrik dengan konfigurasi *stack* berfungsi pada frekuensi rendah (2-10 Hz). Metode kuantitatif eksperimental digunakan dalam penelitian ini pada skala laboratorium. *Prototype* diuji dengan variasi frekuensi impak sebesar 2, 4, 6, 8, dan 10 Hz. Parameter yang diukur adalah nilai tegangan efektif (V_{rms}) *piezoelectric*. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan nilai V_{rms} keluaran *piezoelectric* seiring dengan kenaikan frekuensi eksitasi, dengan nilai berturut-turut: 2 Hz = 0,253 V; 4 Hz = 0,390 V; 6 Hz = 0,491 V; 8 Hz = 0,544 V; dan 10 Hz = 0,600 V. Dengan demikian terdapat hubungan positif antara frekuensi eksitasi mekanik dan tegangan keluaran *prototype*. Sebagai saran pengembangan penelitian lanjutan disarankan untuk mengintegrasikan rangkaian penyearah dan beban eksternal guna memperoleh analisis transfer daya yang lebih komprehensif, serta mengoptimalkan mekanisme impak agar eksitasi yang dihasilkan lebih stabil dan konsisten.

Kata Kunci: pemanen energi, piezoelektrik, V_{rms} , *internet of things*, frekuensi rendah

Abstract. Environmental issues and high maintenance costs arise because *Internet of Things* (IoT) devices rely heavily on conventional batteries. Therefore, this study aims to evaluate the performance of a mechanical energy harvesting system based on a *stack*-configured piezoelectric material at low frequencies (2-10 Hz). A quantitative experimental method was employed in this study on a laboratory scale. The *prototype* was tested with impact frequency variations of 2, 4, 6, 8, and 10 Hz. response. The measured parameter was the effective voltage (V_{rms}) output of the piezoelectric element. The results indicate an increase in the piezoelectric V_{rms} output with rising excitation frequency, with consecutive values of: 2 Hz = 0,253 V; 4 Hz = 0,390 V; 6 Hz = 0,491 V; 8 Hz = 0,544 V; and 10 Hz = 0,600 V. Thus, a positive relationship exists between mechanical excitation frequency and the *prototype's* voltage output. As a recommendation for further research, it is suggested to integrate a rectifier circuit and external load in order to obtain a more comprehensive power transfer analysis, as well as to optimize the

impact mechanism so that the resulting excitation is more stable and consistent.

Keywords: *energy harvesting, piezoelectric, V_{rms} , Internet of Things, low frequency*

PENDAHULUAN

Dengan pertumbuhan industri 4.0 dan *Internet of Things* (IoT) infrastruktur digital sangat bergantung pada penyimpanan energi seperti baterai. Pada tahun 2025 dunia membuang hingga 78 juta baterai setiap hari karena penggunaan baterai yang massif (Saft, 2024). Selain memiliki dampak negatif terhadap lingkungan usia baterai yang digunakan seringkali lebih singkat daripada jangka waktu perangkat itu sendiri. Akibatnya, biaya perawatan dan penggantian akan meningkat (SaM Solutions, 2024). Kondisi ini mendorong pergeseran paradigma menuju konsep *Green IoT* dan *self powered electronics* yaitu perangkat yang mampu beroperasi secara mandiri dengan memanen energi langsung dari alam sekitarnya.

Pengembangan energi mandiri menjadi semakin penting bagi negara kepulauan seperti Indonesia karena ketergantungan pada bahan bakar fosil yang terus meningkat dan banyaknya tantangan yang menghalangi distribusi listrik ke daerah terpencil (IEEFA, 2024). Energi mekanik dari getaran lingkungan seperti mesin industri, transportasi, dan aktivitas manusia adalah salah satu sumber energi alternatif yang melimpah namun sering diabaikan. Getaran lingkungan ini biasanya memiliki frekuensi yang cukup rendah, sekitar 5 hingga 100 Hz (Gonçalves et al., 2025; Liu et al., 2021). Pemanen energi berbasis piezoelektrik jauh lebih efisien daripada generator konvensional seperti generator elektromagnetik, elektrostatik, dan nanogenerator triboelektrik dalam hal pemanenan energi energi (Kang et al., 2025; Perrozzi et al., 2025). Material keramik *lead zirconate titanate* (PZT) yang disusun dalam konfigurasi *stack* multilayer memiliki kapasitas untuk memberikan output daya dan ketahanan mekanis yang sangat baik (Selleri, 2022).

Untuk menggunakan material piezoelektrik pada sumber getaran lingkungan yang berfrekuensi rendah diperlukan mekanisme khusus dikarenakan material piezoelektrik bekerja dengan baik pada frekuensi resonansi tinggi (Nkemeni et al., 2024; Shams et al., 2023). Selain itu, karakteristik energi listrik yang dihasilkan piezoelektrik fluktuatif sehingga tidak dapat digunakan untuk menyalakan perangkat elektronik secara langsung. Oleh karena itu sebelum disalurkan ke beban energi yang dihasilkan membutuhkan sistem pengkondisian daya dan media penyimpanan seperti superkapasitor (Nkemeni et al., 2024; Shams et al., 2023).

Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi bagaimana sistem pemanen energi piezoelektrik dengan konfigurasi *stack* berfungsi pada frekuensi rendah skala laboratorium. Penelitian ini akan menganalisis bagaimana variasi frekuensi eksitasi (2-10 Hz) mempengaruhi keluaran tegangan efektif (V_{rms}) material *piezoelectric*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan landasan empiris bagi pengembangan catu daya mandiri untuk perangkat elektronik berdaya rendah.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan eksperimen parametrik. Sebuah *prototype* alat pemanen energi mekanik skala laboratorium menggunakan material *piezoelectric* dalam konfigurasi *stack* merupakan objek utama yang diuji. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Elektronika & Instrumentasi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta. Variabel bebas utama dalam penelitian ini adalah frekuensi impak mekanik yang divariasikan pada (2-10) Hz. Untuk mengontrol frekuensi impak digunakan modul *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk mengontrol putaran motor DC RS 775. Selanjutnya, mekanisme *rolling crank* dan *rocker arm* bergerak memukul elemen

piezoelectric. Selain itu, tipe *piezoelectric*, konfigurasi *stack*, dan rangkaian elektronik dijaga konstan selama eksperimen.

Pengukuran dilakukan dengan mengoperasikan *prototype* yang terdiri dari mekanisme pemukul dan elemen *piezoelectric*. Motor DC dinyalakan kemudian modul PWM digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor. Pengukuran dilakukan satu kali untuk setiap variasi frekuensi, hal ini dinilai sudah memadai dengan mempertimbangkan keluaran *piezoelectric* bersifat deterministik, dimana sistem akan menghasilkan respon tegangan yang sama secara konsisten. Karakteristik tegangan keluaran *piezoelectric* berupa tegangan efektif (V_{rms}). Keluaran AC dari *piezoelectric* diamati secara langsung menggunakan osiloskop digital untuk merekam bentuk gelombang sekaligus mengekstraksi nilai V_{rms} .

Sinyal tegangan analog yang dihasilkan oleh *stack piezoelectric* direkam menggunakan osiloskop digital. Osiloskop digital tidak membaca nilai efektif dalam fungsi waktu kontinu $v(t)$, sinyal analog diubah menjadi data diskrit didalam osiloskop dan proses ini menghasilkan serangkaian titik sampel tegangan terhadap waktu. Sinyal analog dinyatakan sebagai $v(t)$ maka setelah proses pada osiloskop sinyal tersebut direpresentasikan sebagai deret diskrit.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (2)$$

Data hasil pembacaan osiloskop diekstrak didapatkan data (.csv). Data setiap variasi frekuensi berjumlah ribuan data sehingga diambil data sampel untuk 1 periode pada setiap variasi frekuensi eksitasi yang kemudian dianalisis untuk mengetahui nilai V_{rms} dan diplot kedalam grafik kurna (V_{rms} vs Frekuensi) untuk melihat tren karakterisasi,

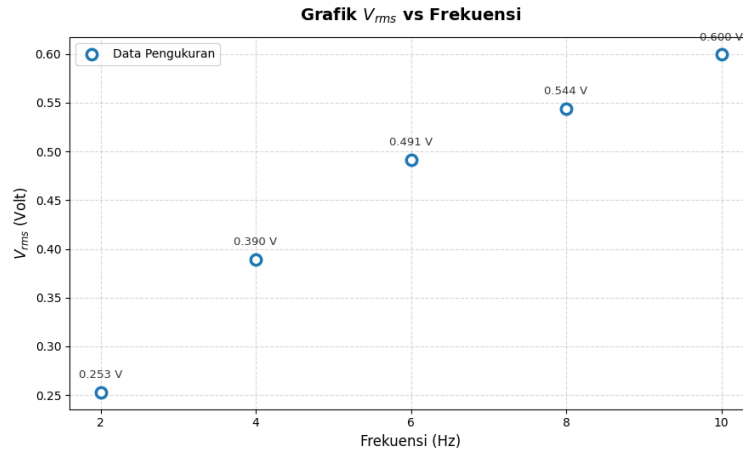
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Analisis karakteristik tegangan yang dihasilkan oleh *stack piezoelectric*.

Tabel 1. Karakteristik keluaran *piezoelectric*

Frekuensi (Hz)	V_{rms} (Volt)
2	0,252
4	0,389
6	0,491
8	0,543
10	0,599



Gambar 1. Grafik V_{rms} vs Frekuensi (Hz)

Pembahasan

Berdasarkan tabel 1 karakteristik keluaran *piezoelectric* terlihat bahwa nilai V_{rms} cenderung meningkat seiring peningkatan frekuensi eksitasi dari 2 Hz hingga 10 Hz. Pada frekuensi 2 Hz didapatkan nilai V_{rms} sebesar 0,252 V dan pada frekuensi 10 Hz nilai V_{rms} sebesar 0,599 V. Namun, peningkatan tersebut tidak bersifat linear sepanjang rentang frekuensi, terlihat pada rentang frekuensi (2-6) Hz nilai V_{rms} mengalami lonjakan yang tajam. Pada rentang frekuensi (8-10) Hz tren kenaikan V_{rms} terlihat mulai melandai, nilai V_{rms} yang dihasilkan tidak sebesar yang terjadi pada rentang 2-6 Hz. Perlambatan laju kenaikan ini mengindikasikan bahwa sistem mulai mendekati kondisi jenuh.

Gambar 1 menunjukkan tren kenaikan yang positif dan konsisten secara keseluruhan. Di titik awal pada frekuensi 2 Hz nilai V_{rms} sebesar 0,253 V. Frekuensi dinaikkan ke 4 Hz nilai V_{rms} naik tajam menjadi 0,390 V. Ini membuktikan bahwa pada rentang frekuensi rendah struktur mekanik sangat responsif mengubah energi kinetik menjadi listrik. Pada saat frekuensi dinaikkan ke 6 Hz tegangan terus naik ke 0,491 V. Di 8 Hz angkanya menyentuh 0,544 V. Tren kenaikan perlahan mulai melanda dari frekuensi 8 Hz, nilai V_{rms} yang dihasilkan tidak sebesar pada saat frekuensi 2 Hz. Titik puncak pengujian frekuensi eksitasi 10 Hz menghasilkan angka V_{rms} tertinggi sebesar 0,600 V. Kenaikan nilai V_{rms} yang berbanding lurus dengan frekuensi membuktikan bahwa semakin sering material *piezoelectric* menerima dampak mekanik semakin besar akumulasi muatan listrik yang berhasil dieksitasi.

Grafik pada Gambar 1 memperlihatkan kecenderungan peningkatan nilai V_{rms} namun jika dicermati lebih lanjut terlihat bahwa sistem mulai mendekati titik jenuh operasionalnya. Hal ini berarti peningkatan frekuensi tidak akan menghasilkan kenaikan tegangan secara terus-menerus. Pada batas tertentu, baik sistem mekanik maupun material *piezoelectric* akan sampai pada kapasitas konversi maksimalnya. Fenomena ini diduga terjadi karena keterbatasan karakteristik material *piezoelectric*, Ketika frekuensi eksitasi dinaikkan kontak antara mekanisme pemukul dan material *piezoelectric* semakin singkat sehingga material tidak memiliki waktu yang cukup untuk kembali ke posisi seimbang sehingga tegangan yang dihasilkan mengalami penurunan.

Saat pemukul menghantam elemen *piezoelectric* material tidak langsung berhenti bergerak melainkan terus berosilasi hingga energi mekaniknya habis teredam. Pada eksitasi frekuensi rendah, misalnya 2 Hz dengan jeda antar dampak sekitar 0,5 detik, pelat *piezoelectric* memiliki waktu untuk kembali ke posisi setimbangnya sebelum hantaman berikutnya terjadi. Sebaliknya, pada frekuensi 10 Hz dengan jeda hanya 0,1 detik hantaman berikutnya sudah

terjadi saat pelat masih dalam kondisi bergetar. Kondisi ini menimbulkan interferensi yang menghalangi pelat untuk mencapai defleksi maksimalnya.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengevaluasi *prototype* pemanen energi mekanik berbasis piezoelektrik dengan eksitasi pada frekuensi rendah. Sistem mekanik mampu memberikan eksitasi pada material piezoelektrik dengan mengonversi putaran motor DC menjadi impact yang konsisten melalui mekanisme cam eksentrik. *Prototype* yang dikembangkan berfungsi dengan baik pada rentang frekuensi eksitasi rendah mulai dari 2 Hz hingga 10 Hz. Selain itu, sebagai hasil dari deformasi mekanik pada material *piezoelectric* menghasilkan tegangan listrik.

Terdapat korelasi positif antara peningkatan frekuensi impact mekanik dengan nilai V_{rms} yang dihasilkan. Dari rentang pengujian yang dilakukan sistem mencatat keluaran terendah sebesar 0,253 V pada frekuensi 2 Hz dan memuncak pada 0,600 V pada eksitasi 10 Hz. Peningkatan tegangan tidak terjadi secara linear tak hingga. *Prototype* menunjukkan tren penurunan pada rentang frekuensi tinggi (8–10 Hz) yang ditandai dengan mengecilnya kenaikan V_{rms} . Penurunan ini secara fisis dipicu oleh tumpang tindih osilasi mekanik di mana frekuensi impact yang terlalu cepat memotong waktu relaksasi material *piezoelectric* dan menciptakan interferensi. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pemanen energi berbasis *piezoelectric* dengan mekanisme impact pada frekuensi rendah dapat menghasilkan energi listrik dalam skala kecil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Bagian ini berisi ucapan terima kasih kepada sponsor, pendonor dana, narasumber, atau pihak-pihak yang berperan penting dalam pelaksanaan penelitian. Tidak perlu menuliskan ucapan terima kasih kepada redaktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Saft. (2024). IoT in 2025: Four trending topics. Saft. <https://saft.com/en/energizing-iot/iot-2025-four-trending-topics>
- Institute for Energy Economics and Financial Analysis. (2024). The risks of fossil fuel dependence in Indonesia's Electricity Supply Business Plan (RUPTL) 2025–2034. IEEFA. <https://ieefa.org/resources/risks-fossil-fuel-dependence-indonesias-electricity-supply-business-plan-ruptl-2025-0>
- Gonçalves, L. D. S., Morais, M. C., Medeiros, K. A. R., & Hall Barbosa, C. R. (2025). Electrical characterization and modelling of polyvinylidene fluoride thin film for application in piezoelectric energy harvesting. *Acta IMEKO*, 14(3). <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v14i3.1987>
- Liu, L., Guo, X., Liu, W., & Lee, C. (2021). Recent progress in the energy harvesting technology—from self-powered sensors to self-sustained iot, and new applications. In *Nanomaterials* (Vol. 11, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/nano11112975>
- Kang, W., Ji, G., & Huber, J. E. (2025). Mechanical energy harvesting: From piezoelectric effect to ferroelectric/ferroelastic switching. In *Nano Energy* (Vol. 133). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110489>
- Perrozzi, M. V., lo Monaco, M., & Somà, A. (2025). Recent Advances in Translational Electromagnetic Energy Harvesting: A Review. In *Energies* (Vol. 18, Issue 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

- <https://doi.org/10.3390/en18071588>
- Nkemeni, V., Meyeveville, F., Kuaban, G. S., Czekalski, P., Tokarz, K., Nsanyuy, W. B., Deussom Djomadji, E. M., Katche, M. L., Tsafack, P., & Zieliński, B. (2024). Evaluation of Green Strategies for Prolonging the Lifespan of Linear Wireless Sensor Networks. In *Sensors* (Vol. 24, Issue 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/s24217024>
- Selleri, G. (2022). Nanostructured piezoelectric materials for the design and development of self-sensing composite materials and energy harvesting devices (Doctoral dissertation, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna). <http://amsdottorato.unibo.it/10352/>
- Shams, O. A., Abdulrazig, O. D. H., Sanousy, S. M., Elmnifi, M., Jassim, L., Majdi, H. S., & Habeeb, L. J. (2023). Modeling of Electricity Generation Using Smart Piezoelectric-Materials. *International Journal of Heat and Technology*, 41(6), 1655–1660. <https://doi.org/10.18280/ijht.410629>