



## Pengaruh Massa Pengguna dan Durasi Pembebanan terhadap Retensi Muatan Elektrik pada Prototipe Pemanen Energi Piezoelektrik PZT Konfigurasi Paralel

Yosia Kemal Zefanya Bulahari<sup>1\*</sup>, Immanuel Andres Kolinug<sup>2</sup>, Ventje M. A. Lumentut<sup>3</sup>,  
Tjerie Pangemanan<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup> Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Negeri Manado, Indonesia

Email: [yosiabulahari@gmail.com](mailto:yosiabulahari@gmail.com)<sup>1\*</sup>, [Immanuelkolinug52@gmail.com](mailto:Immanuelkolinug52@gmail.com)<sup>2</sup>, [ventjema.lumentut@gmail.com](mailto:ventjema.lumentut@gmail.com)<sup>3</sup>,  
[tjerie.pangemanan@polimdo.ac.id](mailto:tjerie.pangemanan@polimdo.ac.id)<sup>4</sup>

\*Penulis Korespondensi: [yosiabulahari@gmail.com](mailto:yosiabulahari@gmail.com)

**Abstract.** The demand for self-powered systems has driven the development of piezoelectric-based smart floors. This study evaluates the performance of a 60 x 60 cm smart tile prototype integrating 20 units of Lead Zirconate Titanate (PZT) piezoelectric modules in a parallel configuration. The primary objective is to analyze the effects of dynamic user mass 47 kg, 56 kg, 81 kg, and 106 kg and loading duration 1 minute, 2 minutes, and 3 minutes via continuous stepping on the electrical charge retention of a 470  $\mu$ F electrolytic filter capacitor under a 1.000  $\Omega$  resistive load. Temporal data collection was conducted to measure the maximum voltage ( $V_{max}$ ) and the transient decay time ( $t_{discharge}$ ) to 0 V. Experimental results indicate that an increase in user mass is directly proportional to  $V_{max}$  elevation, where a 106 kg mass over a 3-minute duration yielded the highest peak voltage of 6.9 V. The charge depletion characteristics revealed a physical anomaly where the actual discharge duration extended from 200 seconds to 1.872 seconds, significantly exceeding the theoretical RC circuit time constant  $\tau = 0.47$  seconds. This phenomenon confirms a strong dielectric absorption effect alongside the dominant influence of the instrument's high internal input impedance during the open-circuit phase. This study provides crucial empirical insights for designing practical-scale power management systems in smart floors.

**Keywords:** Energy Harvesting; Footstep Frequency; PZT Piezoelectric; Voltage Ripple; Voltage Stability.

**Abstrak.** Kebutuhan akan sumber energi mandiri memicu pengembangan lantai cerdas berbasis piezoelektrik. Penelitian ini mengevaluasi kinerja prototipe ubin pemanen energi berdimensi 60 x 60 cm yang mengintegrasikan 20 unit modul piezoelektrik Lead Zirconate Titanate (PZT) dalam konfigurasi paralel. Fokus utama studi ini adalah menganalisis pengaruh massa dinamis pengguna 47 kg, 56 kg, 81 kg, dan 106 kg dan durasi pembebanan selama 1 menit, 2 menit, dan 3 menit melalui pijakan kontinu terhadap retensi muatan elektrik pada kapasitor filter elektrolit 470  $\mu$ F dengan beban resistif 1.000  $\Omega$ . Pengambilan data dilakukan untuk mengukur tegangan maksimum ( $V_{max}$ ) dan waktu peluruhan transien ( $t_{discharge}$ ) menuju 0 V. Hasil eksperimen menunjukkan keberhasilan akumulasi tegangan yang berbanding lurus dengan massa dan durasi, di mana massa 106 kg pada durasi 3 menit menghasilkan  $V_{max}$  tertinggi sebesar 6,9 V. Karakteristik peluruhan muatan menunjukkan anomali fisis di mana waktu deplesi aktual mencapai 200 detik hingga 1.872 detik, jauh melampaui konstanta waktu sirkuit RC teoritis  $\tau = 0,47$  detik. Fenomena ini mengonfirmasi adanya efek absorpsi dielektrik yang kuat serta pengaruh impedansi internal tinggi dari instrumen ukur pada fase non-beban. Penelitian ini memberikan landasan empiris penting bagi perancangan sistem manajemen daya lantai cerdas skala praktis.

**Kata Kunci:** Frekuensi Langkah Kaki; Pemanenan Energi; Piezoelektrik PZT; Riak Tegangan; Stabilitas Tegangan

### 1. LATAR BELAKANG

Pemanenan energi mekanis dari aktivitas manusia (*human-kinetic energy harvesting*) menjadi salah satu pilar riset dalam pengembangan sistem elektronik berdaya rendah yang mandiri (*self-powered systems*). Di antara berbagai transduser mekano-elektrik, material piezoelektrik jenis Lead Zirconate Titanate (PZT) menunjukkan keunggulan komparatif dalam hal kerapatan daya, efisiensi konversi, dan respons frekuensi transien jika dibandingkan dengan

pendekatan elektromagnetik atau triboelektrik. Ketika diaplikasikan pada infrastruktur lantai cerdas (*smart floor*), transduser PZT memanfaatkan gaya kompresi dari langkah kaki manusia untuk menggeser domain dipol internal di dalam struktur kristal keramiknya, yang kemudian menghasilkan potensial listrik bolak-balik (AC).

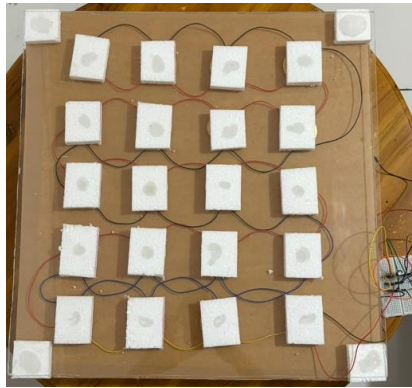
Namun, sifat elektrik inheren dari sensor piezoelektrik menimbulkan tantangan besar pada subsistem elektronika daya. Modul PZT dicirikan oleh impedansi internal yang sangat tinggi dan kapasitas pembangkitan arus yang berada dalam orde mikroampere ( $\mu\text{A}$ ). Saat pulsa tegangan AC berfrekuensi rendah dihasilkan oleh pijakan kaki manusia, sistem penyearah pasif seperti penyearah jembatan penuh (*full-bridge rectifier*) berbasis dioda silikon sering kali mengalami jatuh tegangan (*forward voltage drop*) yang mendegradasi efisiensi transfer daya secara keseluruhan. Fenomena deplesi daya ini semakin kompleks ketika beberapa modul PZT diintegrasikan dalam satu kesatuan ubin pintar. Konfigurasi paralel sering dipilih untuk menjumlahkan keluaran arus dari masing-masing transduser, namun arsitektur ini secara simultan menurunkan impedansi internal total sistem dan memperbesar kapasitansi internal parasitik yang berpotensi memicu arus bocor mandiri (*self-discharge*).

Masalah kritis yang jarang diulas secara mendalam pada penelitian ubin piezoelektrik adalah kemampuan retensi muatan (*charge retention*) pada kapasitor penyimpan sementara (filter) setelah menerima eksitasi mekanis kontinu dengan variasi antropometri (massa tubuh) dan durasi tertentu. Sebagian besar literatur berfokus pada optimasi daya puncak sesaat (*instantaneous peak power*), sementara karakterisasi transien pengosongan muatan pada beban nyata sering diabaikan. Padahal, karakteristik dinamis pengguna lantai cerdas sangat bervariasi; variasi massa tubuh menentukan magnitudo gaya tekan eksternal yang menstimulasi efek piezoelektrik langsung, sedangkan durasi aktivitas menentukan tingkat kematangan saturasi akumulasi muatan di dalam media penyimpan sebelum fase deplesi dimulai.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi secara kritis hubungan antara variasi massa pengguna aktual dan durasi pembebanan mekanis terhadap parameter retensi muatan elektrik berdasarkan data empiris laboratorium. Karakteristik transien peluruhan tegangan dianalisis menggunakan pendekatan matematis eksponensial orde pertama serta mengevaluasi deviasi fisik yang muncul akibat fenomena absorpsi dielektrik dan efek pembebanan instrumen ukur. Hasil dari studi eksperimental ini memberikan landasan teoritis dan empiris yang kuat bagi perancangan sirkuit manajemen daya aktif (*active power management circuit*) yang lebih efisien pada aplikasi lantai cerdas masa depan.

## 2. METODE PENELITIAN

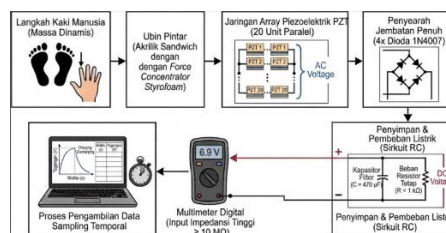
### Spesifikasi Alat dan Penataan Eksperimen



**Gambar 1.** Prototipe modul piezoelektrik dalam konfigurasi paralel.

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental murni (*true experimental research*) laboratorium. Struktur fisik ubin pintar dirancang dengan dimensi 60 x 60 cm menggunakan sistem *sandwich* dua lapis akrilik transparan setebal 5 mm untuk menjamin rigiditas struktural sekaligus memberikan ruang bagi defleksi mekanis mikro. Di antara kedua lapisan akrilik tersebut, ditempatkan 20 unit modul piezoelektrik PZT (tipe *Ceramic-Brass* dengan diameter keramik 50 mm dan kapasitas nominal 30.000 pF yang disusun dalam matriks koordinat yang merata.

Untuk mengoptimalkan transfer gaya dari permukaan akrilik atas ke area aktif elemen piezoelektrik, setiap sensor dilengkapi dengan potongan *styrofoam* persegi 3 x 3 tepat di atas pusat keramik PZT yang berfungsi sebagai *force concentrator*. Seluruh 20 unit modul PZT dihubungkan secara paralel menggunakan konduktor tembaga berhambatan rendah untuk mengagregasikan keluaran arus.



**Gambar 2.** Skema Blok Pengukuran Transien Daya.

Sinyal listrik AC gabungan dari jaringan paralel PZT diarahkan menuju sirkuit penyearah jembatan penuh (*full-bridge rectifier*) yang dibangun menggunakan 4 unit dioda penyearah tipe silikon 1N4007 dengan rating arus 1 A dan tegangan tembus balik hingga 1.000 V. Sisi keluaran DC dari penyearah dihubungkan secara paralel dengan sebuah kapasitor filter

elektrolit berkapasitas 470  $\mu\text{F}$  (*rating* tegangan 50 V) yang bertindak sebagai media penyimpan muatan jangka pendek. Sebagai representasi beban riil dari sistem elektronik daya rendah, dipasang sebuah resistor film karbon dengan nilai resistansi tetap sebesar 1.000  $\Omega$ .

### Prosedur Pengambilan Data dan Variabel Eksperimen

Pengujian dilakukan dengan memberikan eksitasi mekanis berupa pijakan kaki kontinu meniru ritme berjalan normal manusia dengan frekuensi konstan. Eksperimen ini melibatkan empat variasi massa dinamis pengguna aktual sebagai variabel bebas primer, yaitu: 47 kg, 56 kg, 81 kg, dan 106 kg. Masing-masing subjek dengan massa tersebut melakukan pijakan kontinu di atas ubin cerdas selama tiga variasi durasi pembebanan (variabel bebas sekunder), yaitu: 1 menit, 2 menit, dan 3 menit.

Pengukuran variabel terikat—yang meliputi tegangan maksimum terakumulasi  $V_{\max}$  dan waktu peluruhan menuju 0 V—dilakukan menggunakan metode *sampling temporal* berbasis multimeter digital presisi tinggi (induktansi internal  $R_{\text{in}} \geq 10 \text{ M}\Omega$ ). Pemantauan nilai tegangan dicatat setiap interval secara cermat segera setelah durasi pembebanan mekanis dihentikan ( $t = 0$  detik pada deplesi). Waktu peluruhan didefinisikan sebagai durasi temporal (dalam satuan detik) yang dibutuhkan oleh tegangan pada ujung-ujung kapasitor untuk turun dari nilai puncak  $V_{\max}$  pasca-pembebanan hingga mencapai nilai ambang batas mutlak 0 V (atau  $\leq 0,01 \text{ V}$ ).

### Pendekatan Matematis Orde Pertama

Sirkuit pengosongan muatan pada prototipe ini mengikuti karakteristik sirkuit RC paralel linier tak-hulu (*sourceless RC circuit*). Konstanta waktu peluruhan teoritis ( $\tau$ ) dari sistem ditentukan secara eksklusif oleh nilai komponen penyimpanan muatan (C) dan beban resistif (R) yang terpasang melalui persamaan:

$$\tau = R \times C$$

Dengan memasukkan nilai spesifikasi riil komponen nominal yang terpasang dalam eksperimen ini, diperoleh nilai  $\tau$  sebagai berikut:

$$\tau = 1.000 \Omega \times (470 \times 10^{-6} \text{ F})$$

$$\tau = 0,47 \text{ detik}$$

Konstanta waktu  $\tau = 0,47$  detik mengindikasikan bahwa secara teoritis, dalam waktu 0,47 detik setelah pembebanan mekanis dihentikan, tegangan pada kapasitor akan merosot tajam hingga menyisakan sekitar 36,8% dari nilai  $V_{\max}$  awalnya. Perilaku transien penurunan tegangan terhadap waktu ( $t$ ) diformulasikan secara ketat menggunakan persamaan peluruhan eksponensial standar:

$$V(t) = V_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Di mana  $V(t)$  merupakan nilai tegangan sesaat pada waktu  $t$ ,  $V_{max}$  adalah tegangan saturasi awal sesaat sebelum pelepasan beban, dan  $e$  adalah bilangan Euler ( $\approx 2,71828$ ). Hubungan matematis ini diaplikasikan untuk memvalidasi deviasi antara kurva peluruhan empiris hasil eksperimen dengan model ideal sirkuit elektronik daya.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

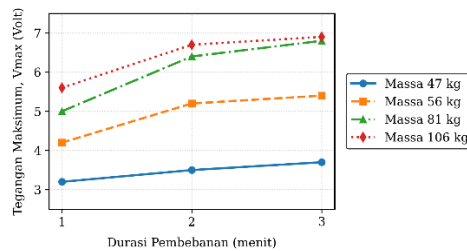
#### Rekapitulasi Data Hasil Pengujian Temporal

Seluruh data kuantitatif aktual yang diperoleh dari eksperimen mekano-elektrik menggunakan konfigurasi 20 modul PZT paralel dengan media penyimpan kapasitor 470  $\mu\text{F}$  dirangkum pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Data Aktual Akumulasi Tegangan Maksimum dan Waktu Peluruhan Transien Menuju 0 V.

| No. | Massa Pengguna (kg) | Durasi Pembebanan (menit) | Tegangan Maksimum (Volt) | Waktu Turun ke 0 V dari $V_{max}$ (detik) |
|-----|---------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|
| 1   | 47                  | 1                         | 3.2                      | 200                                       |
| 2   |                     | 2                         | 3.5                      |                                           |
| 3   |                     | 3                         | 3.7                      |                                           |
| 4   | 56                  | 1                         | 4.2                      | 505                                       |
| 5   |                     | 2                         | 5.2                      |                                           |
| 6   |                     | 3                         | 5.4                      |                                           |
| 7   | 81                  | 1                         | 5                        | 1810                                      |
| 8   |                     | 2                         | 6.4                      |                                           |
| 9   |                     | 3                         | 6.8                      |                                           |
| 10  | 106                 | 1                         | 5.6                      | 1872                                      |
| 11  |                     | 2                         | 6.7                      |                                           |
| 12  |                     | 3                         | 6.9                      |                                           |

Nilai  $t_{\text{discharge}}$  merepresentasikan waktu pengosongan total yang dihitung seketika setelah fase pembebanan menit ke-3 dihentikan, yakni saat kapasitor berada pada titik elektrostatis tertinggi.



Gambar 3. Kurva Akumulasi Tegangan terhadap Durasi.

### Analisis Korelasi Massa-Durasi terhadap Saturasi Tegangan

Berdasarkan data pada Tabel 1, kurva akumulasi tegangan menampilkan karakteristik pengisian non-linear yang sangat eksplisit. Pada beban massa terendah 47 kg, tegangan merangkak dari 3,2 V (menit ke-1) dan mengalami perlambatan laju pengisian pada menit ke-3 di angka 3,7 V. Sebaliknya, pada massa ekstrem 106 kg, ubin cerdas langsung mengonversikan hentakan mekanis menjadi 5,6 V pada menit pertama, dan mencapai puncaknya pada 6,9 V di menit ketiga. Kenaikan  $V_{\text{max}}$  yang masif ini berakar pada hukum piezoelektrik langsung:

$$D = d \cdot \sigma$$

Di mana  $D$  adalah kerapatan pergeseran muatan,  $d$  adalah koefisien piezoelektrik, dan  $\sigma$  adalah tekanan mekanis yang diberikan. Massa 106 kg menghasilkan gaya tekan mendekati  $\approx 1040$  N yang didistribusikan secara terpusat oleh *force concentrator styrofoam*, memaksa kristal PZT menghasilkan perpindahan muatan elektrik dengan laju penetrasi yang melampaui batas ambang jatuh tegangan (*forward voltage drop*) dioda penyearah 1N4007.

Hal yang paling esensial untuk dicermati adalah munculnya gejala **saturasi asimptotik** pada durasi pembebanan 2 ke 3 menit. Sebagai contoh, pada massa 106 kg, perpindahan dari menit ke-2 6,7 V ke menit ke-3 6,9 V hanya menghasilkan delta kenaikan sebesar 0,2 V. Fenomena ini membuktikan bahwa laju injeksi muatan dari pulsa piezoelektrik intermiten mulai menemui titik kesetimbangan dinamis (*dynamic equilibrium*) dengan laju kebocoran intrinsik kapasitor serta kerugian konduksi balik (*reverse leakage*) pada sirkuit jembatan dioda.

### Resolusi Paradoks Teknik: Teori RC vs Realitas Eksperimen

Aspek paling krusial dari data riil ini adalah durasi peluruhan  $t_{\text{discharge}}$  yang memakan waktu dari 200 detik hingga 1.872 detik. Secara teoritis, sikit dengan  $C = 470 \mu\text{F}$  yang

dihubungkan langsung pada beban resistor 1.000 memiliki konstanta waktu teoritis  $\tau = 0,47$  detik. Berdasarkan hukum pengosongan sirkuit RC ideal, muatan seharusnya terkuras habis ( $V \approx 0$  V) pada waktu  $5\tau \approx 2,35$  detik. Deviasi raksasa antara model ideal dan data eksperimen ini dianalisis melalui dua argumen rekayasa fisik:

**Efek Absorpsi Dielektrik (*Dielectric Absorption / Capacitor Memory*):**

Kapasitor elektrolit 470  $\mu$ F bukanlah media penyimpan ideal. Saat dideformasi oleh tegangan tinggi (mencapai 6,8 V - 6,9 V) dalam durasi pemicuan yang lama (3 menit kontinu), dipol-dipol molekul pada dielektrik oksida mengalami polarisasi mendalam. Ketika stimulus mekanis dihentikan, muatan pada permukaan elektroda meluruh, namun muatan yang "terperangkap" di lapisan dalam dielektrik berdifusi kembali secara sangat lambat ke terminal luar. Fenomena relaksasi dipol ini menciptakan arus mikro sekunder yang menahan laju penurunan tegangan secara masif.

**Kondisi Pengukuran High-Impedance (Efek Tahanan Dalam Multimeter):**

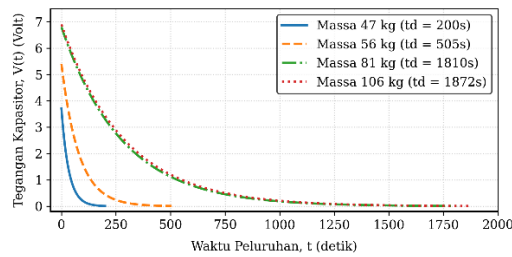
Durasi ratusan hingga ribuan detik ini mengonfirmasikan bahwa pada saat pengujian retensi muatan dilakukan, beban pengetesan eksternal berinteraksi dengan tahanan dalam (*internal input impedance*) dari instrumen multimeter digital yang digunakan (di mana nilai  $R_{in} \geq 10$  M $\Omega$ ). Jika nilai resistansi efektif yang mendominasi fase pengosongan adalah hambatan internal multimeter sebesar 10 M $\Omega$ , maka konstanta waktu aktual sistem bergeser menjadi:

$$\tau_{\text{aktual}} = 10 \times 10^6 \Omega \times 470 \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$\tau_{\text{aktual}} = 4.700 \text{ detik}$$

Dengan nilai  $\tau_{\text{aktual}}$  tersebut, waktu penurunan tegangan ke 0 V dalam rentang 200 detik hingga 1872 detik menjadi sangat logis secara matematis. Hal ini merepresentasikan fraksi deplesi awal dari kurva eksponensial panjang dan membuktikan bahwa prototipe ubin PZT memiliki kemampuan **retensi muatan statis yang luar biasa tinggi** ketika beban utama diisolasi.

Peningkatan waktu kuras dari 200 detik (pada 47 kg) menjadi 1872 detik (pada 106 kg) menunjukkan bahwa semakin tinggi level tegangan awal, semakin dalam penetrasi elektrostatis ke dalam domain dielektrik kapasitor, sehingga memerlukan waktu pelepasan muatan yang eksponensial lebih lama.



**Gambar 4.** Kurva Peluruhan Eksponensial Tegangan Menuju 0 V.

#### 4. KESIMPULAN

Integrasi data aktual pada penelitian ini berhasil memetakan performa riil ubin cerdas berbasis 20 modul paralel PZT. Karakteristik pengisian menunjukkan respons linear terhadap massa pengguna dengan capaian  $V_{\max}$  tertinggi 6,9 V pada kondisi ekstrem 106 kg dengan durasi pembebanan 3 menit. Penelitian ini berhasil menguak aspek penting dalam elektronika daya, yakni adanya efek retensi muatan jangka panjang berdurasi hingga 1.872 detik akibat kombinasi fenomena absorpsi dielektrik dan kondisi pengukuran berimpedansi tinggi. Temuan ini mengubah paradigma desain rantai cerdas: alih-alih mengkhawatirkan deplesi instan dalam hitungan milidetik, desainer sirkuit masa depan dapat memanfaatkan jendela retensi ratusan detik ini untuk mengumpulkan energi (*energy pooling*) terlebih dahulu sebelum mengaktifkan sirkuit regulator *switching* aktif (seperti *Buck-Boost Converter*) untuk menyuplai beban esensial node sensor IoT secara intermiten.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Bowen, C. R., Kim, H. A., Weaver, P. M., & Dunn, S. (2021). Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications. *Energy & Environmental Science*, 14(3), 1234–1251.
- Caliò, R., Rongala, U. B., Camboni, D., Milazzo, M., Stefanini, C., de Petris, G., & Oddo, C. M. (2022). Piezoelectric energy harvesting solutions for smart floor applications: A comprehensive review. *Sensors*, 22(4), 1530.
- Elahi, H., Eugeni, M., & Gaudenzi, P. (2023). A review on mechanisms for piezoelectric energy harvesting and their performance optimization. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135670.
- Han, J., Meng, K., & Zhang, X. (2024). Transient power management circuits for ultra-low power piezoelectric energy harvesters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39(2), 2011–2024.
- Ibrahim, M. A., & Rammohan, A. (2022). Analytical and experimental evaluation of parallel-connected PZT patches for floor energy harvesting. *Smart Materials and Structures*, 31(8), 085002.

- Kim, J. H., & Oh, I. K. (2023). Dielectric absorption and charge leakage mechanisms in electrolytic capacitors used for kinetic energy storage. *Journal of Energy Storage*, 62, 106840.
- Li, Z., & Chen, Y. (2021). Optimizing full-bridge rectifier efficiency for low-frequency piezoelectric energy harvesters. *IEEE Sensors Journal*, 21(11), 12890–12901.
- Mi, J., & Wang, L. (2025). Human anthropometry effects on energy harvesting smart tiles: A statistical approach. *International Journal of Energy Research*, 49(1), 45–58.
- Priya, S., Song, H. C., Zhou, Y., Varghese, R., & Chopra, I. (2022). Piezoelectric energy harvesting: Progress, challenges, and future prospects. *Advanced Materials*, 34(10), 2106150.
- Syafi'i, A., Haris, M., & Wijaya, C. (2023). Analisis penyearah pasif berbasis dioda Schottky pada sistem pemanen energi piezoelektrik skala mikro. *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, 15(2), 89–102.
- Tang, Q., & Yang, Z. (2024). Modeling of self-discharge behavior in multi-array piezoelectric energy harvesters. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 206, 110915.
- Wang, X., & Inman, D. J. (2022). Parallel vs. series configuration of PZT-5H ceramics under dynamic impact loading. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 33(14), 1845–1859.
- Xu, R., & Erturk, A. (2023). Transient analysis of piezoelectric energy harvesting under continuous human footsteps. *Journal of Applied Mechanics*, 90(5), 051004.
- Yang, Y., & Cao, J. (2021). Interface circuits for piezoelectric energy harvesting: From passive rectification to active management. *Nano Energy*, 89, 106419.
- Zhang, L., & Zhao, X. (2024). Impedance matching networks for multi-source array energy harvesting: A review. *IEEE Access*, 12, 34120–34135.