

# Evaluasi Output Arus dan Tegangan Piezoelektrik pada Media Pijakan dengan Memanfaatkan Energi Mekanik

Peprizal<sup>1</sup>, Alvin Darius Balapradhana<sup>2</sup>, Riki Muzakki<sup>3</sup>, Haris Gibran Rizantha<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung; Kawasan Industri Air Kantung, Sungailiat

Received: 27-12-2025  
Accepted: 31-03-2026

## Keywords:

Piezoelektrik;  
Energy harvesting;  
Energi terbarukan;  
Energi mekanik

## Correspondent Email:

[Peprizal.pep@gmail.com](mailto:Peprizal.pep@gmail.com)

**Abstrak.** *Kebutuhan energi alternatif yang berkelanjutan mendorong pengembangan teknologi energy harvesting berbasis piezoelektrik yang mampu mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji prototipe pemanen energi piezoelektrik yang diintegrasikan pada lantai area publik dengan mobilitas pejalan kaki tinggi. Metode penelitian meliputi studi literatur, identifikasi kebutuhan sistem, perancangan prototipe, karakterisasi komponen, pengujian laboratorium, serta uji lapangan. Karakterisasi dilakukan terhadap berbagai konfigurasi piezoelektrik (seri, paralel, dan kombinasi) dengan variasi kapasitor dan beban resistif untuk menentukan keluaran optimal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konfigurasi gabungan dua modul piezoelektrik yang dirangkai paralel menghasilkan tegangan rata-rata hingga 21,6 V dan arus 1,02 mA menggunakan kapasitor 1  $\mu$ F. Dalam skala pembangkitan energi, penelitian ini berkontribusi untuk menerapkan supply energi yang ramah lingkungan tanpa terkendala kondisi cuaca yang tidak konsisten. Pemilihan media yang efisien dalam penelitian ini dapat membangkitkan energi listrik yang lebih efektif dibandingkan dengan media yang terbuat dari bahan kayu/triplek.*

**Abstract.** *The need for sustainable alternative energy drives the development of piezoelectric-based energy harvesting technology capable of converting mechanical energy into electrical energy. This research aims to design and test a piezoelectric energy harvester prototype integrated into the floors of public areas with high pedestrian traffic. The research methods include literature study, system requirements identification, prototype design, component characterization, laboratory testing, and field testing. Characterization was carried out on various piezoelectric configurations (series, parallel, and combinations) with variations in capacitors and resistive loads to determine the optimal output. Test results show that the combined configuration of two piezoelectric modules connected in parallel produces an average voltage of up to 21.6 V and a current of 1.02 mA using a 1  $\mu$ F capacitor. In terms of energy generation, this research contributes to implementing environmentally friendly energy supply without being hindered by inconsistent weather conditions. The selection of efficient media in this research can generate electrical energy more effectively compared to media made of wood/plywood.*

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi energi alternatif semakin penting di era modern untuk mendukung kebutuhan listrik yang berkelanjutan. Ketergantungan terhadap energi fosil yang terus meningkat telah mendorong upaya global untuk mencari solusi energi

terbarukan yang efisien dan ramah lingkungan. Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan dalam konteks ini adalah sistem *energy harvesting*, yaitu proses pengambilan energi dari sumber lingkungan seperti getaran, panas, atau tekanan mekanik [1].

Diantara berbagai metode tersebut, sistem berbasis material piezoelektrik menjadi perhatian utama karena kemampuannya mengubah energi mekanik menjadi energi listrik tanpa memerlukan sumber eksternal [2]. Material piezoelektrik seperti PZT (*Lead Zirconate Titanate*), PVDF (*Polyvinylidene Fluoride*), dan BaTiO<sub>3</sub> (*Barium Titanate*) telah digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari sensor tekanan, sistem pemanen energi, hingga perangkat elektronik portable [3], [4]. Pengembangan material fleksibel berbasis PVDF, misalnya, memungkinkan implementasi sistem piezoelektrik pada permukaan lantai, sepatu, dan tekstil pintar [5], [6].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi konfigurasi seri-paralel pada susunan piezoelektrik dapat meningkatkan keluaran daya secara signifikan [7], [8]. Pemanfaatan energi mekanik dari aktivitas manusia seperti langkah kaki juga telah dikaji dalam berbagai penelitian sebagai sumber energi terbarukan berdaya rendah [9]. Sistem ini sangat potensial diterapkan di area dengan mobilitas tinggi seperti trotoar, terminal, dan area publik. Penelitian oleh Hariyawati dkk. [10] menunjukkan bahwa penerapan *floor energy harvester* berbasis piezoelektrik mampu menghasilkan tegangan hingga beberapa volt dari tekanan pijakan manusia. Hal ini memperkuat potensi penerapan teknologi serupa untuk mendukung konsep *smart city* berbasis energi hijau [11].

Selain itu, perkembangan sistem piezoelektrik juga diarahkan untuk meningkatkan efisiensi dan ketahanan material terhadap tekanan berulang, terutama melalui rekayasa struktur nano dan komposit. Penelitian terkini oleh [2], [3] menekankan pentingnya desain struktural dan optimalisasi sirkuit penyearah agar energi yang dihasilkan dapat disimpan secara efisien.

Sejalan dengan hal tersebut, Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro Universitas Lampung juga menyoroti pentingnya penerapan teknologi sensor dan sistem energi mikro untuk mendukung sistem energi hijau yang efisien dan terdesentralisasi, terutama dalam konteks pengembangan sistem monitoring energi di lingkungan urban [12]. Integrasi konsep ini dengan teknologi piezoelektrik akan memperluas potensi penerapan *energy*

*harvesting* dalam sistem cerdas berbasis energi terbarukan.

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, studi ini difokuskan pada perancangan dan pengujian sistem pemanen energi berbasis piezoelektrik yang memanfaatkan energi mekanik dari aktivitas pijakan manusia di kawasan publik.

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan yaitu metode pengujian sistem masih percobaan laboratorium dengan sumber getaran terkontrol, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan karakteristik getaran nyata pada lingkungan operasional sebenarnya yang cenderung acak dan dinamis yang dapat berpengaruh pada ketahanan material piezoelektrik terhadap kelelahan mekanik (*fatigue*). Dari keterbatasan tersebut, maka pada penelitian ini akan dikembangkan media pijakan yang efisien untuk diterapkan langsung di lapangan. Adapun konstruksi media pijakan yaitu menggunakan bahan plat baja dan elastomer sehingga memiliki kekuatan dan ketahanan yang baik untuk diterapkan skala lapangan.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Terkait Piezoelectric

Penelitian mengenai material piezoelektrik terus berkembang seiring meningkatnya kebutuhan energi terbarukan dan teknologi berdaya rendah. Studi oleh He dan Briscoe [1] menunjukkan bahwa material piezoelektrik modern seperti PVDF dan komposit berbasis karbon memiliki fleksibilitas tinggi dan efisiensi energi yang baik untuk perangkat wearable. Penelitian lain [5] menambahkan bahwa penggunaan material polimer berstruktur nano dapat meningkatkan sensitivitas dan daya keluaran piezoelektrik.

Selain itu, Ju et al. [6] mengembangkan sensor fleksibel berbasis PVDF untuk monitoring tekanan tubuh, sedangkan Ali et al. [7] menguji kinerja material piezoelektrik dalam aplikasi self-powered sensor dengan hasil tegangan keluaran mencapai lebih dari 10 V pada tekanan dinamis. Hasil-hasil tersebut memperkuat potensi piezoelektrik sebagai sumber energi alternatif skala kecil untuk sistem portabel dan wearable electronics.


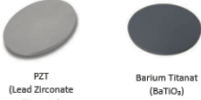
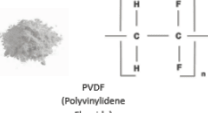
## 2.2 Pengembangan Efek Piezoelectric

Efek piezoelektrik terbagi menjadi dua jenis utama: efek langsung dan efek terbalik. Ali et al. [7] menunjukkan bahwa efek langsung dimanfaatkan dalam sensor tekanan dan sistem energy harvesting, di mana tekanan mekanik menghasilkan beda potensial listrik. Sebaliknya, He dan Briscoe [1] menjelaskan bahwa efek terbalik terjadi ketika arus listrik menyebabkan deformasi kristal dan menghasilkan getaran-prinsip dasar aktuator ultrasonik.

Efek terbalik ini dalam pengembangan transduser ultrasonik untuk aplikasi medis dan sistem deteksi presisi. Kombinasi kedua efek tersebut menjadikan piezoelektrik berperan ganda sebagai sensor dan aktuator, memperluas penerapannya dalam otomasi, biomedis, dan sistem energi cerdas [8], [9].

## 2.3 Material Piezoelectric

Material piezoelektrik terbagi menjadi tiga kelompok besar: bahan alami, bahan keramik, dan bahan polimer. Smith dan Kar-Narayan [10] menyatakan bahwa bahan alami seperti kuarsa memiliki stabilitas tinggi namun sulit diproduksi massal. Sebaliknya, bahan keramik seperti PZT dan BaTiO<sub>3</sub> memiliki efek piezoelektrik yang kuat dan mudah diproduksi [1].

Jenis	Contoh	Karakteristik
Alami	 <p>Kuarsa (Quartz) Garam Rochelle Turmalin (Tourmaline)</p>	Stabil dan tahan lama, namun sulit untuk diproduksi sehingga produksi massal sangat terbatas
Keramik	 <p>PZT (Lead Zirconate Titanate) Barium Titanat (BaTiO<sub>3</sub>)</p>	Mudah dibentuk dan diproduksi massal, efek piezoelektrik yang kuat, namun sangat rapuh dan rentan hancur
Polimer	 <p>PVDF (Polyvinylidene Fluoride)</p>	Fluksibel dan ringan, dapat diaplikasikan pada permukaan yang luas, namun efek piezoelektrik yang dihasilkan rendah

Gambar 1. Klasifikasi material piezoelektrik

Bahan polimer seperti PVDF dan komposisinya semakin banyak dikembangkan karena fleksibilitas dan bobotnya yang ringan, meskipun efek piezoelektriknya lebih rendah dibandingkan bahan keramik. Pemilihan material bergantung pada tujuan aplikasi: bahan

keramik untuk daya tinggi, dan polimer untuk fleksibilitas serta aplikasi *wearable* [11].

## 2.4 Prinsip Kerja dan Arah Penelitian

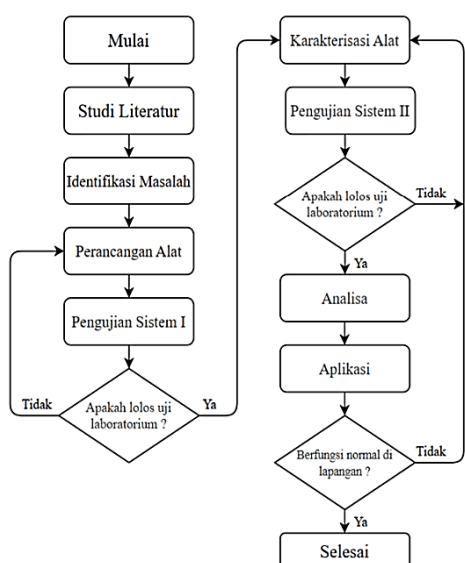
Prinsip kerja piezoelektrik berakar pada struktur kristal yang tidak memiliki simetri pusat, di mana tekanan mekanik menyebabkan pemisahan muatan yang menghasilkan tegangan listrik [12]. Sebaliknya, medan listrik eksternal dapat menyebabkan deformasi fisik [11]. Dalam mode sensor, piezoelektrik mengubah tekanan menjadi sinyal listrik dan banyak digunakan dalam sistem monitoring serta deteksi getaran [6], sedangkan pada mode aktuator, tegangan listrik memicu perubahan bentuk material untuk menghasilkan getaran, seperti pada buzzer atau transduser ultrasonik [13].

Selain itu, pentingnya pengembangan sistem sensor dan konversi energi berbasis teknologi cerdas untuk mendukung efisiensi sistem elektronik dan penerapan energi berkelanjutan di lingkungan urban [14]. Hal ini sejalan dengan arah penelitian terbaru yang menunjukkan bahwa kombinasi material piezoelektrik dengan sistem penyimpanan energi menjadi fokus utama untuk meningkatkan efisiensi energy harvesting di area beraktivitas tinggi seperti jalan, trotoar, dan ruang publik [4].

## 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan sebagaimana ditunjukkan pada diagram alir penelitian (Gambar 2). Tahapan tersebut mencakup studi literatur, identifikasi masalah, perancangan, karakterisasi komponen, pengujian sistem, perakitan prototipe, serta evaluasi hasil. Metodologi ini mengacu pada pendekatan eksperimental yang banyak digunakan dalam studi *energy harvesting* berbasis piezoelektrik [1], [7].

Tahap pertama adalah studi literatur untuk mempelajari konsep dasar *energy harvesting* berbasis piezoelektrik serta meninjau hasil penelitian terdahulu sebagai acuan dalam menentukan arah pengembangan sistem. Literatur yang digunakan meliputi penelitian mengenai karakteristik bahan piezoelektrik seperti PZT, PVDF, dan BaTiO<sub>3</sub> yang telah banyak diaplikasikan pada sistem pemanen energi dan sensor tekanan [2], [3], [11].



Gambar 2. Diagram Alir Metode Penelitian

Tahap berikutnya adalah identifikasi masalah yang difokuskan pada potensi pemanfaatan energi mekanik dari aktivitas pejalan kaki di lokasi dengan tingkat mobilitas tinggi, yaitu Hutan Kota Sungailiat dan Pasar Higienis Air Ruay. Data hasil pengamatan digunakan untuk menentukan parameter rancangan seperti jumlah dan konfigurasi piezoelektrik (seri, paralel, maupun kombinasi), serta kebutuhan sistem penyimpanan energi. Pendekatan ini sejalan dengan metodologi yang digunakan dalam penelitian *smart floor energy harvesting* [8].

Selanjutnya dilakukan perancangan dan karakterisasi komponen, adapun komponen yang digunakan pertama yaitu bahan media pijakan kaki yang meliputi alas atas dan bawah, spring, dan bahan dudukan piezoelektrik. Bahan alas atas dan bawah media yaitu plat baja tebal 5 mm dengan dimensi 100 mm x 100 mm. sehingga memiliki daya tahan yang cukup kuat untuk menahan pijakan kaki manusia. Kemudian digunakan juga spring 4 mm x 2 mm untuk media elastis pijakan. Adapun bantalan komponen piezoelektrik yaitu bahan karet elastomer 1 mm. Jumlah piezoelektrik 1 blok yaitu 7 keping.

Berikutnya dilakukan pengujian tegangan dan arus keluaran dari setiap konfigurasi piezoelektrik. Tahapan ini bertujuan menentukan kombinasi paling efisien untuk menghasilkan daya maksimum. Proses karakterisasi dilakukan menggunakan *load testing* dengan variasi tekanan yang menyerupai

pijakan manusia, sebagaimana diterapkan dalam penelitian material piezoelektrik polimer dan keramik [15].

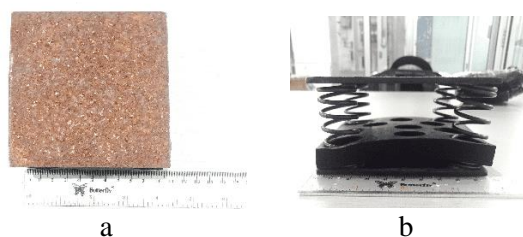
Setelah konfigurasi optimal diperoleh, dilakukan pengujian sistem tahap I di laboratorium untuk mengukur keluaran tegangan dengan rangkaian penyearah dan kapasitor, kapasitas kapasitor bervariasi untuk memperoleh pendekatan yang efisien yaitu 1  $\mu\text{f}/160\text{ V}$ , 10  $\mu\text{f}/160\text{ V}$ , 33  $\mu\text{f}/450\text{ V}$ . Hasil uji ini menjadi dasar dalam proses *assembling* prototipe dan pengujian sistem tahap II menggunakan lima orang dengan variasi berat badan 45-83 kg sebagai simulasi tekanan pijakan nyata. Pengukuran tegangan dan arus keluaran dilakukan untuk menentukan kestabilan dan efisiensi sistem [9]. Pendekatan serupa juga digunakan oleh Covaci dan Gontean dalam uji sistem pemanen energi piezoelektrik berbasis tekanan manusia [1].

Tahap terakhir adalah analisis dan evaluasi, yang mencakup perbandingan antara hasil eksperimen dengan teori serta optimasi rangkaian apabila hasil belum sesuai target. Prototipe yang dinyatakan lolos pengujian laboratorium kemudian diuji di lapangan untuk menilai kinerja aktual, efisiensi konversi energi, dan ketahanan sistem terhadap beban dinamis [14].

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui performa sistem piezoelektrik dalam menghasilkan arus dan tegangan listrik dari tekanan mekanik akibat pijakan manusia. Setiap konfigurasi diuji menggunakan kombinasi nilai kapasitor (1  $\mu\text{F}$ , 10  $\mu\text{F}$ , dan 33  $\mu\text{F}$ ) serta tahanan resistor (10  $\Omega$  hingga 4,7 k $\Omega$ ), dengan variasi bentuk alas penempatan piezoelektrik. Adapun bentuk media pijakan kaki yang telah dirangcang disajikan pada Gambar 3 sebagai berikut.



Gambar 3. Media alas atas dan bawah, b. Keseluruhan media pijakan

Berikut ini hasil pengujian dengan menggunakan 5 buah Piezoelektrik (Alas Tertutup)

#### 4.1.1 Pengujian 5 Buah Komponen Piezoelektrik dengan Alas Tertutup (Tanpa Lubang)

Tabel 1. Data Pengujian 5 Buah Piezoelektrik Tanpa Alas Bolong

KAPASITOR	Trigger / 15 s	Resistor 1 Ω		Resistor 100 Ω	
		Naik per 15 s	Turun per 15 s	Naik per 15 s	Turun per 15 s
1 μF / 160 V	1	0.24 mA	0.003 mA	0.08 mA	0 mA
	2	0.53 mA	0.13 mA	0.19 mA	0.03 mA
	3	0.66 mA	0.15 mA	0.24 mA	0.05 mA
	4	0.63 mA	0.13 mA	0.21 mA	0.03 mA
	5	0.45 mA	0.08 mA	0.39 mA	0.1 mA
	Rata-rata	0.502 mA	0.099 mA	0.222 mA	0.042 mA
10 μF / 160 V	1	0.05 mA	0.04 mA	0 mA	0 mA
	2	0.13 mA	0.11 mA	0.13 mA	0.11 mA
	3	0.18 mA	0.15 mA	0.17 mA	0.15 mA
	4	0.2 mA	0.17 mA	0.27 mA	0.23 mA
	5	0.21 mA	0.18 mA	0.32 mA	0.28 mA
	Rata-rata	0.154 mA	0.13 mA	0.178 mA	0.154 mA
33 μF / 450 V	1	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA
	2	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA
	3	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA
	4	0 mA	0 mA	0.5 mA	0.4 mA
	5	0.4 mA	0.4 mA	0.12 mA	0.11 mA
	Rata-rata	0.08 mA	0.08 mA	0.124 mA	0.102 mA

Pengujian pertama dilakukan pada lima buah piezoelektrik yang dirangkai paralel dan dipasang pada alas datar tanpa lubang. Tujuannya untuk melihat kemampuan dasar sistem dalam mengonversi energi mekanik menjadi listrik tanpa bantuan struktur peredam tambahan. Berdasarkan hasil pengujian (Tabel 1), arus rata-rata tertinggi tercatat sebesar 0,502 mA pada kombinasi kapasitor 1 μF / 160 V dan resistor 1 Ω, sementara tegangan tertinggi mencapai 11,38 V pada kondisi kenaikan eksitasi. Nilai arus dan tegangan kemudian menurun seiring bertambahnya nilai kapasitansi, terutama pada kapasitor 33 μF, di mana arusnya hampir mendekati nol.

Fenomena ini terjadi karena kapasitor dengan kapasitas kecil lebih cepat terisi dan melepaskan muatan listrik dibandingkan kapasitor dengan kapasitas besar. Artinya,

semakin besar nilai kapasitansi, semakin lambat respon pengisian, sehingga daya instan yang dihasilkan lebih kecil. Temuan ini sejalan dengan studi Maani Miandoab et al. [15], yang menjelaskan bahwa penggunaan kapasitor kecil ( $\leq 10 \mu\text{F}$ ) lebih efektif untuk sistem *piezoelectric energy harvesting* karena waktu pengisian yang singkat memungkinkan transfer energi lebih cepat ke beban.

Selain itu, permukaan alas yang kaku menyebabkan distribusi tekanan tidak merata pada setiap piezoelektrik. Hanya sebagian elemen yang menerima beban penuh pijakan, sehingga energi yang dikonversi menjadi listrik tidak maksimal. Menurut Covaci dan Gontean [10], kondisi ini umum terjadi pada sistem tanpa peredam elastik, karena gaya mekanik cenderung terserap oleh struktur alas sebelum sepenuhnya diteruskan ke elemen piezoelektrik.

#### 4.1.2 Pengujian 7 Komponen Piezoelektrik dengan Alas Elastomer Berlubang

Konfigurasi kedua menggunakan tujuh buah piezoelektrik yang dirangkai paralel dan dipasang pada alas berbahan elastomer dengan lubang di bawahnya. Desain berlubang ini dibuat untuk meningkatkan deformasi tiap piezoelektrik saat menerima tekanan dari pijakan, karena elastomer memungkinkan pergerakan vertikal lebih besar dan lubang berfungsi sebagai ruang ekspansi gaya tekan.

Hasil pengujian menunjukkan peningkatan performa signifikan dibanding konfigurasi pertama. Nilai arus rata-rata maksimum mencapai 1,44 mA pada kombinasi kapasitor 1 μF / 160 V dan resistor 1 Ω, sementara tegangan tertinggi tercatat 2,58 V. Dibandingkan konfigurasi alas tertutup, arus keluaran meningkat sekitar 23%, menandakan bahwa desain mekanik alas berpengaruh langsung terhadap efisiensi konversi energi.

Hasil ini memperkuat pernyataan Chakhchaoui et al. [6], bahwa penggunaan substrat fleksibel seperti PVDF/elastomer dapat meningkatkan respon mekanik hingga dua kali lipat dibandingkan bahan keras seperti keramik PZT. Selain itu, temuan ini juga mendukung teori dari Timmermans dan Michiels [4], yang menyebutkan bahwa struktur fleksibel dapat memperpanjang umur kerja sensor karena mampu mendistribusikan tekanan secara lebih merata.

Tabel 2. Data Pengujian 7 Piezoelektrik Dengan Alas Bolong

KAPASITOR	Triger / 10 s	Resistor 150 Ω		Resistor 1 Ω		Resistor 1 KΩ		Resistor 4,7 KΩ	
1 μF / 160 V	1	1	mA	1.12	mA	1.02	mA	0.91	mA
	2	1.3	mA	1.6	mA	0.84	mA	1.34	mA
	3	1.4	mA	1.4	mA	0.98	mA	1.31	mA
	4	1.49	mA	1.62	mA	1.02	mA	1.42	mA
	5	1.54	mA	1.44	mA	1.08	mA	1.2	mA
	Rata-rata	1.35	mA	1.436	mA	0.988	mA	1.236	mA
10 μF / 160 V	1	0.12	mA	0.11	mA	0.06	mA	0.16	mA
	2	0.33	mA	0.3	mA	0.2	mA	0.28	mA
	3	0.51	mA	0.46	mA	0.32	mA	0.41	mA
	4	0.64	mA	0.59	mA	0.4	mA	0.52	mA
	5	0.73	mA	0.71	mA	0.47	mA	0.56	mA
	Rata-rata	0.47	mA	0.434	mA	0.29	mA	0.386	mA
33 μF / 450 V	1	0.07	mA	0	mA	0	mA	0	mA
	2	0.14	mA	0.02	mA	0.03	mA	0	mA
	3	0.2	mA	0.1	mA	0.1	mA	0.06	mA
	4	0.26	mA	0.18	mA	0.16	mA	0.14	mA
	5	0.32	mA	0.25	mA	2.2	mA	0.21	mA
	Rata-rata	0.2	mA	0.11	mA	0.498	mA	0.082	mA

Namun, peningkatan jumlah piezoelektrik juga menimbulkan efek resistansi internal yang lebih tinggi akibat koneksi paralel ganda, sehingga tegangan yang dihasilkan tidak meningkat secara linear terhadap jumlah sensor. Fenomena ini juga dipaparkan oleh Santos et al. [8], yang menjelaskan bahwa arus meningkat lebih signifikan daripada tegangan pada sistem paralel, karena pembagian muatan di tiap elemen.

Berdasarkan data pada Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian dengan variasi nilai kapasitor (1 μF, 10 μF, dan 33 μF) serta nilai resistor (150 Ω, 1 Ω, 1 KΩ, dan 4,7 KΩ) pada waktu pemacu (trigger) 10 detik. Nilai pengukuran merepresentasikan keluaran listrik DC hasil konversi energi mekanik oleh piezoelektrik yang telah melalui proses penyearahan.

#### 4.1.3 Pengujian Gabungan Dua Media Piezoelektrik (Rangkaian Paralel)

Konfigurasi ketiga merupakan kombinasi dua media piezoelektrik (alas tertutup dan alas berlubang) yang digabung secara paralel. Tujuan pengujian ini adalah untuk melihat apakah penggabungan dua jenis media dengan karakteristik mekanik berbeda dapat menghasilkan keluaran daya lebih besar. Berdasarkan hasil pengujian (Tabel 3), arus

rata-rata tertinggi mencapai 1,02 mA pada kapasitor 1 μF dan resistor 1 Ω. Nilai ini merupakan yang tertinggi di antara seluruh konfigurasi, menunjukkan adanya efek sinergi antara dua jenis media yang memberikan variasi tekanan dan distribusi gaya yang lebih kompleks.

Tabel 3. Data Pengujian Dari 2 Media Piezoelektrik Dengan Rangkaian Paralel

KAPASITOR	Trigger / 15 s	Resistor 1 Ω		Resistor 100 Ω	
		Naik per 15 s	Turun per 15 s	Naik per 15 s	Turun per 15 s
1 μF / 160 V	1	0.9 mA	0.2 mA	0.76 mA	0.1 mA
	2	1.06 mA	0.2 mA	0.8 mA	0.1 mA
	3	0.9 mA	0.2 mA	0.8 mA	0.1 mA
	4	1.1 mA	0.2 mA	0.6 mA	0.1 mA
	5	1.14 mA	0.2 mA	0.9 mA	0.1 mA
	Rata-rata	1.02 mA	0.2 mA	0.772 mA	0.1 mA
10 μF / 160 V	1	0.02 mA	0.01 mA	0.33 mA	0.28 mA
	2	0.19 mA	0.16 mA	0.77 mA	0.64 mA
	3	0.3 mA	0.26 mA	1.04 mA	0.89 mA
	4	0.41 mA	0.35 mA	1.23 mA	1.07 mA
	5	0.47 mA	0.4 mA	1.37 mA	1.18 mA
	Rata-rata	0.278 mA	0.236 mA	0.948 mA	0.812 mA
33 μF / 450 V	1	0 mA	0 mA	0 mA	0 mA
	2	0.1 mA	0.09 mA	0.19 mA	0.18 mA
	3	0.25 mA	0.23 mA	0.35 mA	0.33 mA
	4	0.38 mA	0.36 mA	0.48 mA	0.46 mA
	5	0.49 mA	0.47 mA	0.6 mA	0.56 mA
	Rata-rata	0.244 mA	0.23 mA	0.324 mA	0.306 mA

Pada kapasitor 33 μF, arus rata-rata yang dihasilkan berkisar antara 0,23–0,32 mA, namun stabil dan konstan. Kondisi ini sesuai dengan hasil penelitian Mokhtari et al. [5], yang menyatakan bahwa kombinasi struktur elastik dan rigid pada sistem piezoelektrik dapat meningkatkan efisiensi total hingga 30% karena gaya tekan dapat diserap dan dilepaskan secara bertahap.

Temuan ini juga selaras dengan penelitian sebelumnya oleh Peprizal dkk, yang mengemukakan bahwa penggunaan beberapa modul piezoelektrik dalam konfigurasi paralel dapat meningkatkan total keluaran arus hingga dua kali lipat dibanding sistem tunggal, tanpa menyebabkan gangguan fase pada sinyal keluaran [16].

#### 4.2. Perhitungan Daya dan Efisiensi Energi

Daya ( $P$ ) dihitung menggunakan persamaan:

$$P = V \times I \quad (1)$$

Sementara efisiensi konversi energi dihitung dengan:

$$\eta = \frac{P_{\text{output}}}{E_{\text{input}}} \times 100\% \quad (2)$$

Untuk konfigurasi terbaik (dua media piezoelektrik paralel, kapasitor 1  $\mu\text{F}$ , resistor 1  $\Omega$ ):

$$\begin{aligned} V &= 21,6 \text{ V}, I = 1,02 \text{ mA} \\ P &= 21,6 \times 0,00102 = 0,02203 \text{ W} \\ &= 22,03 \text{ mW} \end{aligned}$$

Dengan asumsi energi mekanik dari satu pijakan manusia sekitar 10 J, maka:

$$\eta = \frac{0,02203}{10} \times 100\% = 0,22\%$$

Nilai efisiensi ini masih dalam kisaran sistem piezoelektrik skala kecil (0,1–1%), sebagaimana dilaporkan oleh Covaci dan Gontean [10] serta Santos et al. [8].

#### 4.3. Pembahasan Umum

Secara umum, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem piezoelektrik yang dikembangkan mampu menghasilkan energi listrik dari tekanan mekanik yang diberikan oleh pijakan manusia. Nilai arus dan tegangan yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh jumlah piezoelektrik, jenis alas, serta kombinasi kapasitor dan resistor yang digunakan. Dari ketiga konfigurasi yang diuji, penggabungan dua media piezoelektrik (alas elastomer berlubang dan alas tertutup) memberikan hasil paling optimal dengan tegangan maksimum mencapai 21,6 V dan arus 1,02 mA, sehingga menghasilkan daya 22 mW.

Hasil tersebut memperlihatkan adanya peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan konfigurasi tunggal. Kombinasi dua jenis media memberikan variasi tekanan yang lebih dinamis dan distribusi gaya yang lebih merata, sehingga deformasi tiap elemen piezoelektrik menjadi lebih efisien dalam mengonversi energi mekanik menjadi energi listrik.

Peningkatan performa ini sejalan dengan hasil penelitian Santos et al. [8], yang

menyatakan bahwa konfigurasi paralel pada beberapa piezoelektrik meningkatkan arus total dan stabilitas output, sementara efisiensi konversi dipengaruhi oleh struktur penyangga mekanik. Hal yang sama juga dijelaskan oleh Covaci dan Gontean [10], bahwa desain mekanik berbasis elastomer dapat meningkatkan respons deformasi hingga 40%, terutama untuk aplikasi pada permukaan yang menerima tekanan berulang seperti lantai pejalan kaki.

Selain faktor mekanik, faktor elektrik seperti nilai kapasitansi juga berperan besar. Kapasitor kecil (1  $\mu\text{F}$ ) menunjukkan hasil tegangan tertinggi karena mampu merespons perubahan tekanan secara cepat, namun dengan penyimpanan energi yang terbatas. Sebaliknya, kapasitor besar (33  $\mu\text{F}$  atau lebih) menghasilkan tegangan yang lebih stabil, tetapi daya yang lebih kecil karena waktu pengisian yang lebih lama. Temuan ini sesuai dengan teori Maani Miandoab et al. [15], yang menyebutkan bahwa terdapat trade-off antara stabilitas dan besarnya daya pada sistem energy harvesting berbasis piezoelektrik.

Dari sisi efisiensi energi, perhitungan menunjukkan nilai sekitar 0,22%, yang masih berada dalam kisaran efisiensi tipikal sistem piezoelektrik skala kecil (0,1–1%), sebagaimana dilaporkan oleh Chakhchaoui et al. [6] dan Mokhtari et al. [5]. Nilai ini sudah cukup baik untuk aplikasi low-power devices seperti sensor, perangkat monitoring nirkabel, atau sistem IoT berdaya rendah yang tidak memerlukan sumber daya besar.

Selain itu, hasil penelitian ini juga memperkuat temuan dari Pradistia dkk, bahwa sistem piezoelektrik paralel berpotensi diaplikasikan dalam platform *smart floor* untuk mendukung konsep kota cerdas (*smart city*) yang memanfaatkan energi terbarukan dari aktivitas manusia sehari-hari [17].

Dengan hasil yang diperoleh, sistem ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan beberapa arah peningkatan, antara lain:

1. Integrasi dengan sistem penyimpanan energi seperti superkapasitor atau baterai lithium untuk menampung energi dalam jangka panjang.
2. Penerapan rectifier aktif atau synchronized switching circuit seperti yang disarankan oleh Lallart et al. [7], guna meningkatkan efisiensi transfer energi.

3. Optimasi desain mekanik alas agar tekanan lebih terdistribusi merata pada seluruh elemen piezoelektrik, sesuai rekomendasi Santos et al. [8].

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil membuktikan bahwa sistem piezoelektrik berbasis PVDF dan PZT yang dirangkai paralel memiliki potensi nyata untuk menghasilkan energi listrik dari pijakan manusia. Meski daya yang dihasilkan masih tergolong kecil, pendekatan ini merupakan langkah awal yang penting untuk menuju sistem energi hijau skala mikro yang dapat diterapkan di ruang publik seperti trotoar, terminal, atau pusat perbelanjaan.

## 5. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian, modul piezoelektrik yang dipasang pada media pijakan menunjukkan bahwa variasi tekanan, frekuensi pijakan, dan distribusi beban menjadi variabel utama yang membedakan besar kecilnya keluaran arus dan tegangan. Semakin besar tekanan dan semakin sering pijakan diberikan, maka kinerja konversi energi piezoelektrik meningkat. Modul menghasilkan output tertinggi pada kondisi pijakan dengan tekanan paling kuat dan frekuensi yang lebih cepat, sehingga nilai tegangan dan arus yang dihasilkan lebih besar dibandingkan kondisi pijakan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa energi mekanik dari pijakan dapat dimanfaatkan secara efektif, meskipun keluaran masih bersifat fluktuatif tergantung konsistensi gaya yang diterapkan.

Dalam skala pembangkitan energi, penelitian ini berkontribusi untuk menerapkan supply energi yang ramah lingkungan tanpa terkendala kondisi cuaca yang tidak konsisten. Pemilihan media yang efisien dalam penelitian ini dapat membangkitkan energi listrik yang lebih efektif dibandingkan dengan media yang terbuat dari bahan kayu/triplek.

- a. Pada penelitian selanjutnya, dapat menggunakan media pijakan dengan material yang lebih kaku agar transfer energi mekanik ke piezoelektrik lebih optimal.
- b. Menambah jumlah modul piezoelektrik secara paralel atau seri untuk memperoleh tegangan dan arus yang lebih tinggi sesuai kebutuhan aplikasi.

- c. Mendesain konstruksi pijakan yang lebih presisi untuk meminimalkan kehilangan energi akibat penyebaran tekanan yang tidak merata.
- d. Menggunakan rangkaian penyearah, penyimpan energi, dan penguat yang lebih efisien untuk mendapatkan keluaran daya yang lebih stabil dan maksimal.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Q. He and J. Briscoe, "Piezoelectric Energy Harvester Technologies : Synthesis, Mechanisms, and Multifunctional Applications," 2024, doi: 10.1021/acsami.3c17037.
- [2] B. Tirta, Gerhana, Z. Saputra, and Peprizal, "Impact of load distribution on energy generation in a piezoelectric floor prototype," *J. Renew. Energy Mech.*, vol. 8, no. 02, 2025, doi: 10.25299/rem.2025.vol8(02).24936.
- [3] H. Zhao, X. Cheng, C. Xin, and F. Zhao, "Composite, High-sensitivity and self-powered flexible pressure sensor based on multi-scale structured piezoelectric," *Chem. Eng. J.*, no. 519, 2025.
- [4] S. Mahboubizadeh, S. Taghavi, and S. Baghshahi, "Heliyon Piezoelectricity performance and  $\beta$ -phase analysis of PVDF composite fibers with BaTiO<sub>3</sub> and PZT reinforcement," *Heliyon*, vol. 10, no. 3, p. e25021, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25021.
- [5] S. W. Technologies, F. Mokhtari, M. Shamshirsaz, and M. Latifi, "Nanofibers-Based Piezoelectric Energy Harvester for," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 11, pp. 1–15, 2020.
- [6] L. Chakhchaoui, N., Farhan, R., Chu, Y. M., Khan, U., Eddiai, A., Omari, L. E. H., & Van Langenhove, "Flexible smart textile coated by PVDF/Graphene oxide with excellent energy harvesting toward a novel class of self-powered sensors: Fabrication, Characterization and Measurements.," *Preprints*, vol. 1, no. March, p. 2021030786., 2021, doi: 10.20944/preprints202103.0786.v1.
- [7] M. N. Lallart, M. Null, L. High, and S. Switching, "Synchronized Switching

- technique for piezoelectric energy harvesting To cite this version : HAL Id : hal-03657317 High gain , load-tolerant self-powered series-parallel Synchronized Switching technique for piezoelectric energy harvesting,”* 2022.
- [8] L. M. dos Santos, F. L. Santos, F. Scinocca, and G. P. Villibor, “Piezoelectric energy harvesting in agricultural machinery: Impact of PZT configurations and rectification techniques on power generation,” *Energy Reports*, vol. 13, no. November 2024, pp. 455–464, 2025, doi: 10.1016/j.egy.2024.11.017.
- [9] F. Qian, T.-B. Xu, and L. Zuo, “Piezoelectric energy harvesting from human walking using a two-stage amplification mechanism,” *Energy*, vol. 189, 2019.
- [10] C. Covaci and A. Gontean, “Piezoelectric energy harvesting solutions: A review,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 12, pp. 1–37, 2020, doi: 10.3390/s20123512.
- [11] M. A. Valemtina, E. M. Silalahi, and B. Widodo, “Perancangan Prototype Pembangkit Piezoelektrik Lantai Untuk Suplai Energi Listrik Lampu Penerangan Pintu Masuk Rumah,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 1, 2025.
- [12] R. F. Pradistia and D. A. Prasetya, “Pemanfaatan Sensor Piezoelektrik Sebagai Penghasil Sumber Energi Dengan Tekanan Anak Tangga,” *J. Tek. Elektro*, 2022.
- [13] I. Agung, A. Saputro, V. Virdyawan, and T. Tjahjowidodo, “Design, Manufacture and Control of a Multi-layer Piezoelectric Actuator,” *Int. J. Technol.*, vol. 15, no. August 2023, pp. 1118–1132, 2024, doi: 10.14716/ijtech.v15i4.6605.
- [14] A. Kusuma and H. M. Manik, “Rancang Bangun Transceiver dan Transduser Piezoelektrik untuk Analisis Target Strength Argo Float Designing Transceiver and Piezoelectric Transducer for Argo Float Target Strength Analysis,” *Positron*, vol. 13, no. 02, pp. 112–118, 2023, doi: 10.26418/positron.v13i2.57340.
- [15] E. Maani Miandoab, A. H. Jafari, and A. Valipour, “Design of Piezoelectric Tile for Energy Harvesting: Experimental Approach,” *J. Mater. Appl.*, vol. 10, no. 2, pp. 83–89, 2021, doi: 10.32732/jma.2021.10.2.83.
- [16] Peprizal, Z. Saputra, A. P. Maulana, B. Tirta, and Gerhana, “Analisis Performa Pembangkit Listrik Pada Lantai Berbasis Piezoelektrik Untuk Pengisian Baterai Lithium,” *Resistor*, vol. 8, no. 3, pp. 143–151, 2025.
- [17] R. F. Pradistia and D. A. Prasetya, “Pemanfaatan Sensor Piezoelektrik Sebagai Penghasil Sumber Energi Dengan Tekanan Anak Tangga,” *J. Tek. Elektro*, 2022.