



Penghasil Energi Listrik Menggunakan Piezoelectric yang Memanfaatkan Hukum Konversi Energi

Deva Naufal¹, Shiva Aulia Kharami¹, Sherly Mutiara Riano¹, Haula Syakira Alfisyahrin¹, Febriza Melinda Tiara¹, Nurhidayatulloh^{2*}

¹Teknik Komputer, Universitas Pendidikan Indonesia

²Pendidikan Multimedia, Universitas Pendidikan Indonesia

*Corresponding Author's e-mail: nurhidayatulloh@upi.edu

Article History:

Received: December 27, 2025

Revised: January 25, 2026

Accepted: January 30, 2026

Keywords:

Piezoelectric Effect,
Mechanical Energy
Conversion, Foot-Mounted
Power Generation, Kinetic
Energy Utilization, LED
Lighting

Abstract: This research aims to design and implement an innovative small-scale power generator prototype that utilizes wasted mechanical energy from daily human activities. The focus of this development is to convert foot pressure into sustainable alternative energy. Technically, this system adopts the concepts of electromagnetic induction and the piezoelectric effect, which can convert the kinetic energy of human body weight into electrical energy based on the principle of the law of conservation of energy, which states that energy cannot be destroyed but only converted from mechanical energy to electrical energy. The average voltage generated by a 45 kg person is 6,93 volts, capable of lighting an LED lamp for 0.5 seconds. This prototype is built using a series of piezoelectric sensors strategically configured under the foot platform. Because the energy output of piezoelectric components is alternating current (AC) with unstable fluctuations, the system is equipped with a bridge rectifier circuit to convert it to direct current (DC). The current is then stabilized and stored in an energy storage capacitor before being distributed to an electronic load. As a demonstration of the system's functionality, the collected energy is used to power an LED lamp. The results of this research are expected to serve as a reference in the development of energy harvesting technology that can be widely applied in public areas with high pedestrian traffic.

Copyright © 2026, The Author(s).
This is an open access article under the CC-BY-SA license



How to cite: Naufal, D., Alfisyahrin, H. S., Kharami, S. A., Tiara, F. M., Riano, S. M., & Nurhidayatulloh, N. (2026). A Penghasil Energi Listrik Menggunakan Piezoelectric yang Memanfaatkan Hukum Konversi Energi. *SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah*, 5(1), 621–637. <https://doi.org/10.55681/sentri.v5i1.5536>

PENDAHULUAN

Penggunaan energi listrik terus bertambah seiring dengan perkembangan zaman, ketergantungan utama pada sumber energi tak terbarukan (seperti batu bara dan minyak bumi) telah menimbulkan dampak lingkungan yang serius, termasuk emisi gas rumah kaca dan perubahan iklim. Oleh karena itu, inovasi dalam pemanfaatan sumber energi terbarukan dan ramah lingkungan menjadi sangat krusial. Tantangan terbesar dalam transisi energi adalah menemukan cara untuk memanfaatkan energi terbuang dari aktivitas sehari-hari. Jutaan langkah kaki yang dihasilkan di area padat lalu lintas, seperti stasiun, trotoar, atau pusat perbelanjaan, merupakan sumber energi kinetik yang sangat besar, tetapi sering terabaikan. Memanfaatkan energi kinetik ini dapat mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik utama (PLN) dan mempromosikan konsep *self-sustaining energy*.

Selain itu, salah satu energi listrik alternatif yang murah, ramah lingkungan, dan bisa dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik alternatif berskala kecil adalah dengan memanfaatkan material *piezoelectric*. Sumber energi listrik yang ramah lingkungan tersebut bisa diperoleh dari energi yang selama ini tanpa disadari terbuang begitu saja. Salah satunya adalah dengan cara memanfaatkan pijakan kaki manusia pada tempat yang ramai dilalui oleh mobilitas pergerakan manusia, seperti pada anak tangga atau lantai. Pembangkit energi berdaya rendah ini telah menarik perhatian secara signifikan.

Pembangkit listrik ini tidak akan membuat perubahan yang signifikan pada jumlah konsumsi penggunaan energi fosil, tetapi dapat dipakai untuk menghasilkan energi listrik sebagai konsumsi daya untuk peralatan elektronik yang berdaya rendah, seperti lampu taman atau lampu jalan juga bisa dipakai sebagai energi cadangan yang bisa disimpan terlebih dahulu pada baterai maupun kapasitor. Meskipun menghasilkan daya rendah, pembangkit piezoelektrik ini memiliki keunggulan karena bebas polusi dan didapat dari energi pijakan kaki manusia yang selama ini terbuang sia-sia. Selain itu juga, tidak tergantung pada perubahan cuaca, seperti yang terjadi pada pembangkit listrik tenaga angin atau tenaga matahari.

Dibandingkan dengan teknologi pemanenan energi lainnya seperti panel surya dan termoelektrik, piezoelektrik memiliki beberapa keunggulan khusus dalam skala mikro. Piezoelektrik dapat memanen energi mekanik dari tekanan atau getaran di lingkungan operasional tanpa bergantung pada intensitas cahaya atau perbedaan suhu yang besar, sehingga dapat berfungsi baik di area tertutup atau minim cahaya di mana panel surya kurang efektif dan gradien suhu termoelektrik sulit dicapai [1,2]. Selain itu, sistem piezoelektrik memiliki struktur mekanis sederhana yang mudah diintegrasikan dalam bentuk miniatur untuk aplikasi berskala mikro, seperti lantai trotoar atau sensor berdaya rendah, sehingga cocok untuk perangkat Internet of Things (IoT) pintar yang membutuhkan sumber energi mandiri [1,3]. Meskipun output dayanya relatif rendah dibandingkan panel surya, potensi pemanenan energi dari aktivitas manusia seperti pijakan kaki tetap signifikan untuk aplikasi lokal dan mandiri [1,4].

LANDASAN TEORI

2.1. Energi Terbarukan dan *Energy Harvesting*

Energy harvesting (pemanenan energi) adalah proses mengambil energi dari sumber eksternal seperti cahaya matahari, angin, panas, atau getaran kinetik dan mengubahnya menjadi energi listrik [5]. Langkah kaki manusia merupakan salah satu bentuk energi kinetik yang melimpah, tetapi sering terbuang. Konversi energi ini mengikuti Hukum Kekekalan Energi yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, melainkan hanya berubah bentuk dari energi mekanik menjadi energi listrik [6].

2.2. Efek *Piezoelectric*

Efek *Piezoelectric* adalah kemampuan material tertentu untuk menghasilkan potensial listrik ketika diberikan tekanan mekanis [7]. Saat seseorang menginjak sensor, terjadi deformasi pada material *Piezoelectric* yang memicu perpindahan muatan listrik. Tegangan (V) yang dihasilkan berbanding lurus dengan gaya (F) yang diberikan. Semakin besar beban atau frekuensi pijakan, semakin besar pula akumulasi energi listrik yang dihasilkan [8].

2.3. Rangkaian Elektronika Penunjang

Listrik yang dihasilkan oleh sensor Piezoelectric bersifat fluktuatif dan berupa arus bolak-balik (AC), sehingga diperlukan rangkaian tambahan untuk menyearahkannya menjadi arus searah (DC) [9].

- **Dioda Bridge (Penyearah):** Berfungsi mengubah arus AC dari Piezoelectric menjadi arus DC agar dapat digunakan oleh komponen elektronik.
- **Kapasitor:** Berfungsi sebagai penyimpan energi sementara. Energi yang tersimpan ($\$E\$$) dalam Joule dihitung dengan rumus [10]:

$$\epsilon = \frac{1}{2} CV^2$$

2.4. Karakteristik LED (*Light Emitting Diode*)

LED dipilih sebagai beban karena memiliki konsumsi daya yang sangat rendah dibandingkan lampu pijar konvensional. LED hanya membutuhkan tegangan ambang (*threshold voltage*) sekitar **1.8V** hingga **3V** (tergantung warna) untuk mulai memancarkan cahaya. Hal ini menjadikannya komponen yang sangat ideal untuk sistem pembangkit energi mikro seperti Piezoelectric.

2.5. Prinsip Kerja Atomik Material Piezoelektrik

Material piezoelektrik seperti Lead Zirconate Titanate (PZT) memiliki struktur kristal yang tidak memiliki pusat simetri sehingga memungkinkan terjadinya polarisasi listrik makroskopis ketika diberikan tekanan mekanis [17][18]. Struktur kristal PZT umumnya berjenis perovskit ABO_3 , di mana ion-ion positif dan negatif tersusun sedemikian rupa sehingga tanpa stres eksternal distribusi muatan bersifat netral [17].

Pada tingkat atomik, ketika gaya mekanis (stress) diberikan ke material piezoelektrik, ion-ion dalam kisi kristal mengalami perpindahan relatif dari posisi setimbang mereka. Perpindahan ini menyebabkan ketidaksempurnaan simetri dalam posisi muatan ion positif dan negatif, sehingga timbul moment dipol listrik dalam kristal [17]. Perubahan posisi ion tersebut menghasilkan pergeseran muatan bersih yang terakumulasi pada permukaan material sebagai beda potensial listrik atau medan listrik terinduksi [17][18].

Material piezoelektrik seperti PZT yang telah mengalami proses poling (pemrosesan untuk menyelaraskan domain-domain dipol secara permanen) akan memiliki dipol-dipol yang lebih terpadu arahnya [17]. Hal ini menyebabkan kontribusi kumulatif dari dipol-dipol kecil menjadi lebih besar dan material menunjukkan respon piezoelektrik makroskopis yang lebih kuat ketika diberi tekanan mekanis. Tanpa tekanan, dipol-dipol akan cenderung kembali ke konfigurasi awal mereka atau tetap dalam keadaan terpolarisasi tergantung dari proses poling yang dilakukan [16].

Dengan demikian, efek piezoelektrik pada PZT dan material serupa merupakan manifestasi dari interaksi mekanik-listrik pada tingkat atomik, di mana deformasi kristal karena gaya eksternal menyebabkan perubahan orientasi dipol internal dan menghasilkan muatan listrik yang terdeteksi pada permukaan material.

METODE PENELITIAN

1. Pendahuluan

Landasan Teori Singkat *Energy harvesting* (pemanenan energi) adalah proses menangkap energi dari sumber eksternal (seperti cahaya matahari, angin, panas, atau getaran kinetik) dan mengubahnya menjadi energi listrik [5]. Langkah kaki manusia merupakan salah satu bentuk energi kinetik yang melimpah, tetapi sering terbuang [6]. Konversi energi ini mengikuti Hukum Kekekalan Energi yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan melainkan hanya berubah bentuk dari energi mekanik menjadi energi listrik [7].

2. Landasan Teori

2.1. Energi Terbarukan dan *Energy Harvesting*

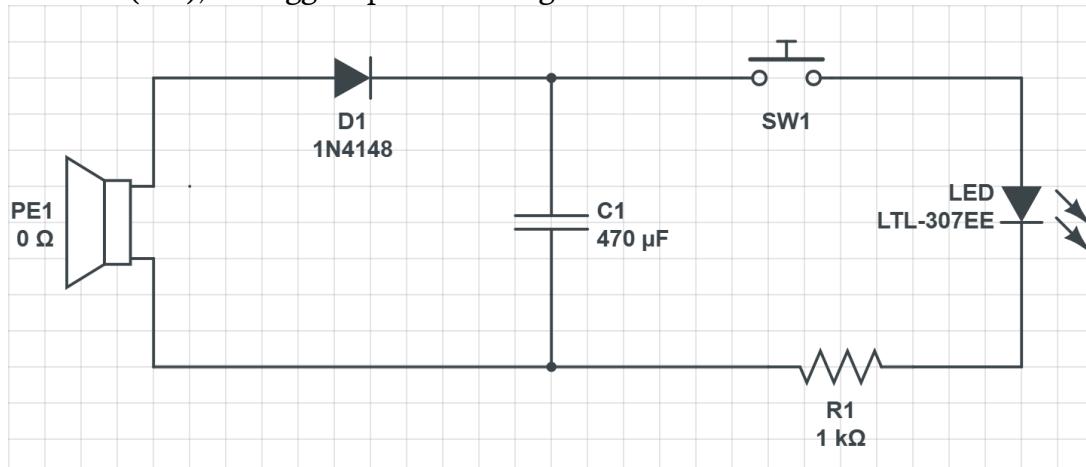
Energy harvesting (pemanenan energi) adalah proses menangkap energi dari sumber eksternal (seperti cahaya matahari, angin, panas, atau getaran kinetik) dan mengubahnya menjadi energi listrik. Langkah kaki manusia merupakan salah satu bentuk energi kinetik yang melimpah, tetapi sering terbuang. Konversi energi ini mengikuti Hukum Kekekalan Energi yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan melainkan hanya berubah bentuk dari energi mekanik menjadi energi listrik.

2.2. Efek *Piezoelectric*

Tujuan utama dari praktik ini adalah pemanfaatan material *Piezoelectric*. Efek *Piezoelectric* adalah kemampuan material tertentu untuk menghasilkan potensial listrik ketika diberikan tekanan mekanis. Saat seseorang menginjak sensor, terjadi deformasi pada material *Piezoelectric* yang memicu perpindahan muatan listrik. Tegangan (V) yang dihasilkan berbanding lurus dengan gaya (F) yang diberikan. Semakin besar beban atau frekuensi pijakan, semakin besar pula akumulasi energi listrik yang dihasilkan.

2.3. Rangkaian Elektronika Penunjang

Listrik yang dihasilkan oleh sensor *Piezoelectric* bersifat fluktuatif dan berupa arus bolak-balik (AC), sehingga diperlukan rangkaian tambahan:



Gambar 1. Rangkaian Elektronika

- Dioda Bridge (Penyearah): Berfungsi mengubah arus AC dari *Piezoelectric* menjadi arus searah (DC) agar dapat digunakan oleh komponen elektronik.
- Kapasitor: Berfungsi sebagai penyimpan energi sementara. Karena satu pijakan hanya menghasilkan energi yang sangat kecil, kapasitor akan mengumpulkan muatan dari banyak pijakan hingga mencapai level tegangan yang cukup untuk menyalaikan beban.
- Energi yang tersimpan dihitung dengan rumus:

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

Dengan E adalah energi dalam Joule, C adalah kapasitansi dalam Farad, dan V adalah tegangan dalam Volt.

2.4. Karakteristik LED

LED dipilih sebagai beban karena memiliki konsumsi daya yang sangat rendah dibandingkan lampu pijar konvensional. LED hanya membutuhkan tegangan ambang (*threshold voltage*) sekitar 1.8V hingga 3V (tergantung warna) untuk mulai memancarkan cahaya, sehingga sangat cocok untuk sistem dengan sumber energi mikro seperti pijakan kaki.

2.5. Prinsip Kerja Sistem secara Terintegrasi

Secara keseluruhan, sistem ini bekerja dengan alur sebagai berikut:

- Input: Gaya tekan dari pijakan kaki pada modul *Piezoelectric*.
- Konversi: Energi kinetik menjadi energi listrik (AC).
- Pengolahan: Penyearahan arus (AC ke DC) dan pengumpulan muatan di kapasitor.
- Output: Energi yang tersimpan dilepaskan untuk menyalaikan LED.

METODE PENELITIAN

I. Analisa

Berdasarkan latar belakang dan tujuan proyek yang telah dijelaskan, adapun permasalahan utama yang akan dipecahkan dan dijawab melalui perancangan dan pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara merancang susunan sistem transduser *Piezoelectric* pada platform pijakan kaki agar dapat memaksimalkan konversi energi mekanik dari pijakan menjadi energi listrik?
2. Berapa besar nilai tegangan dan arus listrik rata-rata yang mampu dihasilkan oleh sistem transduser *Piezoelectric* setelah satu kali pijakan dan bagaimana hasil tersebut dibandingkan dengan kebutuhan daya listrik LED?
3. Apakah rangkaian penyearah dan penyimpanan energi (kapasitor) yang dirancang cukup efektif dalam menstabilkan dan mengakumulasi muatan listrik sehingga mampu menyalaikan lampu LED secara berkelanjutan?
4. Berapa minimal jumlah pijakan kaki yang diperlukan oleh sistem untuk dapat menyalaikan satu unit lampu LED dengan tingkat kecerahan yang memadai?

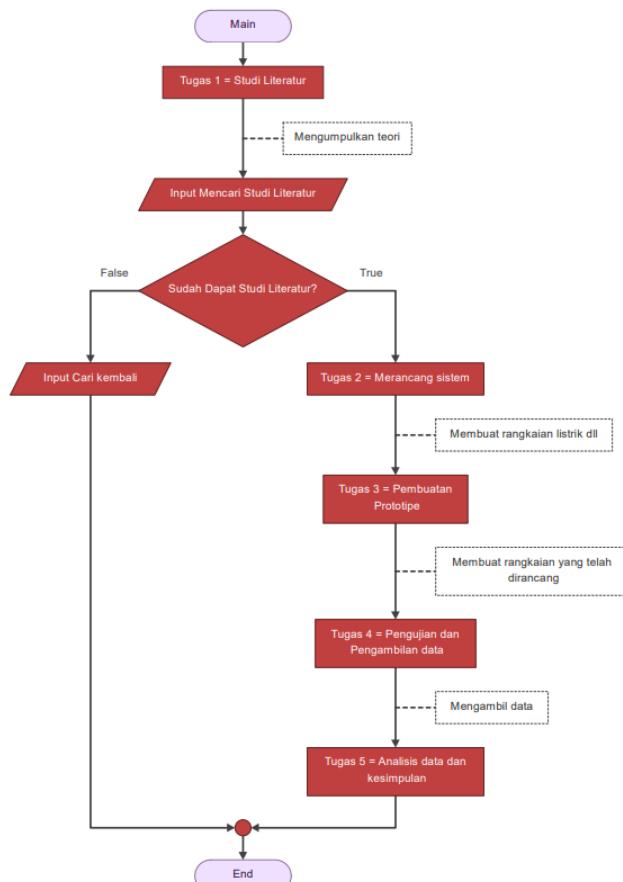
II. Tahapan penelitian

Penelitian ini dilakukan secara sistematis melalui tahapan demi memastikan prototipe berfungsi dengan semestinya. Tahapan tersebut digambarkan dalam diagram alir penelitian sebagai berikut:

Secara terperinci, tahapan penelitian ini meliputi:

1. Studi Literatur: Mengumpulkan teori mengenai pemanenan energi kinetik dan karakteristik material *Piezoelectric* dari sumber-sumber ilmiah yang telah ada sebelumnya [5], [8].
2. Perancangan Sistem: Merancang susunan *Piezoelectric* secara paralel dan rangkaian penyearah menggunakan *dioda bridge* berdasarkan standar rangkaian elektronik daya rendah [9].
3. Pembuatan Prototipe: Perakitan mekanik alat pada media akrilik dan penyolderan komponen sesuai dengan desain yang telah ditentukan.
4. Pengujian dan Pengambilan Data: Melakukan pengukuran tegangan menggunakan multimeter digital. Prosedur pengukuran dilakukan dengan variasi beban tekanan (lemah hingga sangat kuat) untuk mendapatkan akurasi data yang stabil [18].
5. Analisis Data dan Kesimpulan: Membandingkan hasil pengujian dengan teori konversi energi *Piezoelectric* untuk menarik kesimpulan akhir.

Seluruh tahapan penelitian digambarkan dalam *Flowchart* sebagai berikut:



Gambar 2. Algoritma Tahapan Penelitian

III. Metode yang dipakai

Metode yang dipakai untuk membuat teorema tersebut adalah sebagai berikut :

Tabel 1. Alat dan Bahan yang dipakai

Alat dan Bahan yang dipakai			
No	Alat	Bahan	Jumlah (Buah)
1	Solder		1
2	Timah		1
3	Lem Tembak		1
4	Isi Lem Tembak		2
5	Avometer		1
6		Piezo Uk. 50 mm	7
7		Dioda 1N14	1
8		Switch	1
9		Kapasitor 470uF	1
10		Resistor 1K	1
11		LED	5
12		Kabel Jumper	4
13		Breadboard	1
14		Akrilik 30x30cm	2
15		Baterai 9V	3

III.I. Prosedur Kerja

1. Menyiapkan seluruh komponen yang diperlukan

- Transduser *Piezoelectric* (beberapa unit).
- *Dioda Bridge* (sebagai penyearah).
- Kapasitor Elektrolit (sebagai penyimpan daya).
- Lampu LED.
- Akrilik untuk alas pijakan.
- Kabel penghubung dan alat solder.

2. Tahap Perakitan Rangkaian Elektronika

- I. Menyusun Sensor: Menghubungkan beberapa transduser *Piezoelectric* secara paralel (kutub positif ke positif, negatif ke negatif) untuk meningkatkan total arus listrik yang dihasilkan.
- II. Memasang Penyearah: Menghubungkan *output* dari susunan *Piezoelectric* ke terminal AC pada *dioda bridge*.
- III. Penyimpanan Daya: Menghubungkan terminal positif (+) dan negatif (-) dari *dioda bridge* ke kaki-kaki kapasitor yang sesuai (memperhatikan polaritas).
- IV. Pemasangan Beban: Menghubungkan lampu LED ke terminal kapasitor melalui sebuah saklar (switch) sederhana untuk mengontrol aliran listrik.

3. Tahap Pembuatan Mekanik Pijakan

- I. Menyiapkan dua lapis papan (alas bawah dan plat tekan atas).

- II. Menempelkan susunan transduser *Piezoelectric* secara merata di atas papan tekan atas.
 - III. Memberikan lapisan penekan di alas bawah tepat di bawah *Piezoelectric* agar tekanan pijakan terdistribusi merata dan tidak merusak sensor.
- 4. Tahap Pengujian dan Pengambilan Data**
- I. Uji Tanpa Beban: Melakukan satu kali pijakan kuat pada alat dan mengukur tegangan puncak yang dihasilkan menggunakan multimeter digital.
 - II. Uji Pengisian: Melakukan pijakan kaki secara berulang (misal: 10, 20, hingga 50 kali) dan mencatat kenaikan tegangan yang tersimpan di dalam kapasitor secara berkala.
 - III. Uji Nyala Lampu: Menutup saklar untuk mengalirkan listrik ke LED setelah jumlah pijakan tertentu tercapai.
 - IV. Pengamatan Durasi: Mengukur berapa lama LED dapat menyala stabil dari energi yang telah dikumpulkan.
 - V. Mencatat seluruh hasil pengukuran.

III.II. Blok Diagram sistem

Blok diagram ini penting untuk merangkum alur energi dari fisik ke elektrik secara sistematis sebelum masuk ke detail perakitan.

Sistem ini terdiri dari empat bagian utama yang saling terintegrasi:

1. **Unit Input:** Berupa gaya mekanik dari pijakan kaki.
2. **Unit Transduser:** Material *Piezoelectric* yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik AC [16].
3. **Unit Manajemen Daya:** Rangkaian penyearah (*bridge rectifier*) dan kapasitor untuk menstabilkan arus menjadi DC.
4. **Unit Output:** Lampu LED sebagai indikator pemanfaatan daya.

III.III. Variabel Penelitian

Untuk memastikan pengujian akurat, maka perlu mendefinisikan variabel-variabel yang diamati:

- **Variabel Bebas:** Tingkat kekuatan tekanan (lemah, sedang, kuat, sangat kuat).
- **Variabel Terikat:** Nilai tegangan (Volt) yang dihasilkan dan kondisi nyala lampu LED.
- **Variabel Kontrol:** Jenis material *Piezoelectric*, jumlah piezo (6 buah), dan kapasitas kapasitor (470uF).

III.IV. Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Bagian ini menjelaskan bagaimana memperlakukan angka-angka yang didapat:

1. **Teknik Observasi:** Data tegangan diambil secara langsung menggunakan Avometer pada terminal kapasitor.
2. **Analisis Statistik Deskriptif:** Data yang diperoleh dihitung nilai rata-ratanya \bar{V} dan tingkat penyimpangannya menggunakan standar deviasi σ untuk menentukan presisi alat [17].

III.V. Arsitektur Perancangan Sistem

Bagian ini menjelaskan bagaimana komponen disusun secara fisik pada media akrilik untuk memastikan tekanan mekanik terdistribusi secara optimal ke sensor *Piezoelectric*.

- Konfigurasi Sensor:** Ketujuh *Piezoelectric* disusun dalam formasi heksagonal dengan satu pusat di tengah pada papan akrilik 30x30 cm. Jarak antar sensor diatur sedemikian rupa agar area cakupan kaki manusia (rata-rata 25–28 cm) dapat menekan minimal 4-5 sensor secara bersamaan.
- Struktur Mekanik:** Menggunakan sistem *sandwich* (dua lapis akrilik). Lapisan atas berfungsi sebagai plat tekan, sedangkan lapisan bawah sebagai alas statis. Di antara kedua lapis, diberikan bantalan karet elastis (*spacer*) agar sensor tidak langsung pecah saat menerima beban kejut yang ekstrem.

III.VI. Justifikasi Pemilihan Komponen

- Kapasitor 470uF:** Dipilih karena memiliki keseimbangan antara kecepatan pengisian (*charging time*) dan kapasitas penyimpanan. Kapasitas yang terlalu besar akan membutuhkan waktu sangat lama untuk menyala LED, sedangkan terlalu kecil akan membuat nyala LED tidak stabil (berkedip cepat) [9].
- Resistor 1k:** Digunakan sebagai pembatas arus (*current limiter*) untuk melindungi LED dari lonjakan tegangan sesaat yang dihasilkan oleh *Piezoelectric* (yang bisa mencapai puluhan Volt secara mendadak).
- Dioda 1N4148:** Menggunakan jenis *fast switching diode* karena sinyal mekanik dari pijakan kaki bersifat impulsif dan cepat, sehingga membutuhkan dioda yang mampu merespon frekuensi tinggi dengan jatuh tegangan (*voltage drop*) yang rendah [10].

III.VII. Teknik Validasi dan Pengolahan Data

Untuk memastikan data pada Bab IV akurat, digunakan teknik pengolahan data statistik:

- Repetisi Pengujian:** Setiap variasi tekanan (lemah, sedang, kuat) dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali (Uji 1, Uji 2, Uji 3) untuk menghindari data anomali.
- Perhitungan Ketidakpastian:** Menggunakan rumus standar deviasi untuk melihat seberapa konsisten alat dalam menghasilkan listrik.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum^n i = 1 (Xi - X)^2}{n - 1}}$$

- σ : Standar Deviasi
- $\sum^n i = 1$: Nilai tegangan pada tiap pengujian
- $(Xi - X)^2$: Rata-rata tegangan
- $n - 1$: Jumlah pengujian

III.VIII. Justifikasi Pemilihan Susunan Sensor dan Spesifikasi Komponen

1. Alasan Pemilihan Susunan Sensor Piezoelectric

Susunan sensor *Piezoelectric* pada penelitian ini dipilih dalam konfigurasi paralel dengan tata letak heksagonal (6 di sekeliling + 1 di tengah). Konfigurasi ini dipilih berdasarkan pertimbangan distribusi tekanan kaki manusia dan karakteristik listrik *Piezoelectric*.

Secara mekanik, luas telapak kaki manusia dewasa berkisar antara 25–28 cm, sehingga ketika seseorang menginjak permukaan pijakan berukuran 30×30 cm,

tekanan tidak terpusat pada satu titik saja. Susunan heksagonal memungkinkan minimal 4–5 sensor tertekan secara bersamaan, sehingga energi mekanik yang diterima sistem menjadi lebih besar dan merata. Jika sensor disusun hanya di satu sisi atau berjajar lurus, sebagian besar energi pijakan akan hilang karena tidak semua sensor mengalami deformasi optimal.

Secara elektrik, penyusunan paralel dipilih karena bertujuan meningkatkan arus total (current summing) tanpa menaikkan tegangan secara ekstrem. Piezoelektrik secara alami dapat menghasilkan tegangan tinggi namun arus sangat kecil. Dengan konfigurasi paralel, arus dari tiap sensor dijumlahkan sehingga kemampuan pengisian kapasitor menjadi lebih cepat, yang sangat penting pada sistem penyimpanan energi mikro.

2. Spesifikasi Sensor Piezoelectric

Sensor yang digunakan adalah piezo disc diameter 50 mm berbahan keramik piezoelektrik. Spesifikasi umumnya:

- Tegangan impuls tanpa beban: dapat mencapai 10–30 V saat tekanan kuat
- Arus keluaran: dalam orde mikroampere
- Frekuensi respons tinggi terhadap tekanan impulsif (pijakan kaki)

Ukuran 50 mm dipilih karena memiliki luas permukaan deformasi lebih besar dibanding piezo kecil (27–35 mm), sehingga menghasilkan muatan listrik lebih banyak saat tertekan.

3. Pemilihan Kapasitor Penyimpanan (470 μ F)

Kapasitor elektrolit 470 μ F dipilih sebagai penyimpan energi sementara dengan pertimbangan keseimbangan antara kapasitas penyimpanan energi dan waktu pengisian.

Energi yang dapat disimpan dihitung dengan:

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

Jika kapasitor terisi hingga 3 V (cukup untuk LED):

$$E = \frac{1}{2} (470 \times 10 - 6)(3)^2 = 0,0021 \text{ Joule}$$

Energi ini cukup untuk menyalaikan LED sesaat atau berkedip.

Jika nilai kapasitor terlalu kecil (misalnya 47 μ F), tegangan cepat naik tetapi energi yang tersimpan sangat kecil sehingga LED hanya menyala sangat singkat. Sebaliknya, jika terlalu besar (misalnya 2200 μ F), energi memang besar tetapi sistem akan membutuhkan jumlah pijakan jauh lebih banyak untuk mencapai tegangan nyala LED. Oleh karena itu 470 μ F merupakan kompromi optimal untuk demonstrasi sistem pemanen energi skala mikro.

4. Spesifikasi Dioda Penyearah (1N4148)

Digunakan dioda 1N4148 fast switching karena sinyal dari piezo bersifat impulsif dan berfrekuensi tinggi. Dioda ini memiliki:

- Waktu pemulihan cepat (reverse recovery time kecil)
- Mampu menangani sinyal tegangan impuls dari piezo
- Arus kecil sesuai karakteristik keluaran piezo

5. Resistor Pembatas Arus LED (1 k Ω)

Resistor 1 k Ω digunakan untuk membatasi arus LED agar tidak rusak akibat lonjakan tegangan sesaat. Misal tegangan kapasitor 5 V dan LED 2 V:

$$I = \frac{V_{supply} - V_{led}}{R} = \frac{5 - 2}{1000} = 3mA$$

Arus ini masih dalam batas aman LED indikator.

IV.VI. Analisis Efisiensi dan Kendala

1. Analisis Perbandingan Jumlah Sensor

Berdasarkan perbandingan Tabel 2 (1 piezo) dan Tabel 3 (6 piezo), terjadi peningkatan *output* tegangan yang signifikan (lebih dari 4 kali lipat). Hal ini membuktikan bahwa konfigurasi paralel pada sensor *Piezoelectric* sangat efektif untuk meningkatkan *power density* (kerapatan daya) dari satu pijakan kaki yang sama [18].

2. Kendala Mekanik

Salah satu kendala yang ditemukan adalah titik tekan pijakan. Jika kaki tidak menekan tepat di tengah plat akrilik, distribusi gaya menjadi tidak merata, sehingga beberapa sensor tidak menghasilkan tegangan optimal. Hal ini menjelaskan mengapa terdapat deviasi sebesar 0,10 V pada perhitungan ketidakpastian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Data Hasil Percobaan

Tabel 2. Tabel Data Mentah (1 piezo)

No	Berat Badan	Tingkat Tekanan Badan	Tegangan Uji 1 (V)	Tegangan Uji 2 (V)	Tegangan Uji 3 (V)	Kondisi LED
1	45 Kg	Lemah	0,2	0,5	0,2	Mati
2		Sedang	0,9	0,87	0,89	Mati
3		Kuat	1	0,9	1,5	Redup Sekali
4		Sangat Kuat	1,5	1,3	2	Redup
5	60 Kg	Lemah	2	2,5	3	Mati
6		Sedang	2,5	3	4	Mati
7		Kuat	3	7	9	Redup Sekali
8		Sangat Kuat	5	9	11	Redup
9	75 Kg	Lemah	2,1	2,4	3,4	Mati
10		Sedang	3,5	4	3,7	Mati
11		Kuat	5	5,7	5,2	Nyala
12		Sangat Kuat	6	5,9	6,2	Nyala

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan berat badan pengguna cenderung meningkatkan tegangan keluaran piezoelektrik. Hal ini terjadi karena berat badan yang lebih besar menghasilkan gaya tekan yang lebih besar pada permukaan piezoelektrik. Sesuai dengan prinsip fisika

$$f = m \cdot g$$

gaya berbanding lurus dengan massa, sehingga deformasi material piezoelektrik menjadi lebih besar dan menghasilkan beda potensial listrik yang lebih tinggi.

Meskipun terdapat sedikit ketidakteraturan data pada berat 75 kg, tren umum tetap menunjukkan hubungan yang mendekati linear antara tekanan mekanis dan tegangan keluaran. Faktor seperti posisi pijakan, distribusi beban, dan kecepatan tekanan dapat memengaruhi hasil sehingga menyebabkan variasi kecil pada data.

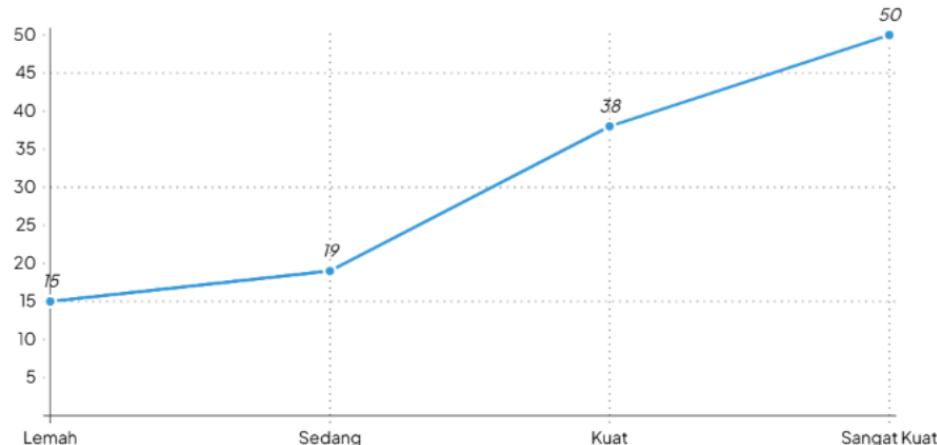
Tabel 3. Tabel Data Hasil (6 piezo)

No	Tingkat Tekanan Tangan	Tegangan Uji 1 (V)	Tegangan Uji 2 (V)	Tegangan Uji 3 (V)	Kapasitor	Kondisi LED
1	Lemah	12	15	18	470	Nyala
2	Sedang	15	18	24	470	Nyala
3	Kuat	18	42	54	470	Nyala
4	Sangat Kuat	30	54	66	470	Nyala

Tabel 4. Tegangan Rata-rata Keluaran 6 Piezoelectric

No	Tingkat Tekanan Tangan	Tegangan Rata-Rata
1	Lemah	15
2	Sedang	19
3	Kuat	38
4	Sangat Kuat	50

Untuk memperlihatkan hubungan antara tingkat tekanan tangan dan tegangan listrik yang dihasilkan, data disajikan dalam bentuk grafik.



Gambar 3. Grafik Hubungan Tingkat Tekanan Tangan terhadap Tegangan Keluaran 7 Piezoelectric

Pengaruh Rugi Tegangan Penyearah dan Stabilitas Arus Keluaran

Tegangan listrik yang dihasilkan oleh material piezoelektrik bersifat arus bolak-balik (AC), sehingga diperlukan rangkaian penyearah untuk mengubahnya menjadi arus searah (DC) agar dapat dimanfaatkan oleh beban elektronik. Pada proses penyearahan menggunakan bridge rectifier, terdapat rugi tegangan akibat karakteristik dioda. Setiap dioda silikon memiliki tegangan jatuh (*forward voltage drop*) sekitar 0,7 V. Karena arus melewati dua dioda dalam satu siklus penyearahan gelombang penuh, maka tegangan keluaran setelah penyearah dapat dihitung dengan:

$$V_{out} = V_{in} - 2V_d = V_{in} - 1,4V$$

dengan :

V_{out} = Tegangan setelah penyearah

V_{in} = Tegangan puncak dari piezoelektrik

V_d = Tegangan jatuh suatu diode

Rugi tegangan ini cukup berpengaruh pada sistem piezoelektrik karena tegangan yang dihasilkan relatif kecil. Tegangan DC hasil penyearahan masih mengandung riak (*ripple*). Untuk menstabilkannya digunakan kapasitor penyaring. Besar riak tegangan dapat diperkirakan dengan:

$$V_{ripple} = \frac{I_{load}}{fC}$$

Namun, arus DC dari piezoelektrik tetap tidak konstan karena bergantung pada tekanan mekanis. Oleh sebab itu, untuk beban elektronik yang memerlukan tegangan stabil, diperlukan rangkaian tambahan seperti DC-DC converter dengan prinsip dasar:

$$V_{in} I_{in} = V_{out} I_{out}$$

Faktor rugi tegangan dioda, riak tegangan, dan kecilnya arus keluaran menjadi tantangan utama dalam pemanfaatan energi piezoelektrik.

2. Perhitungan Data

- Perhitungan Tegangan Rata-rata

$$V = \sum V_{in}$$

$$V = (6,8 + 7,1 + 6,5 + 7,3 + 6,9 + 7,0) = \frac{41,66}{6} = 6,93$$

- Deviasi Standar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Tabel 5. Standar Deviasi Prototipe

Piezo	V_i	$V_i - V$	$(V_i - V)^2$
1	6,8	-0,13	0,0169
2	7,1	0,17	0,0289
3	6,5	-0,43	0,1849
4	7,3	0,37	0,1369
5	6,9	-0,03	0,0009
6	7,0	0,07	0,0049

Deviasi standar = **0,25 V**

- Analisis Ketidakpastian

$$\Delta V = \frac{\sigma n}{\sqrt{\Delta V}} = \sigma n$$

$$\Delta V = \frac{0,25}{\sqrt{0,252,45}} = 0,10 V$$

3. Interpretasi Hasil

Berdasarkan data pada Tabel 2 dan Tabel 3, terlihat bahwa tegangan listrik yang dihasilkan meningkat seiring dengan bertambahnya kekuatan tekanan tangan. Kondisi LED berubah dari tidak menyala hingga menyala terang, yang menunjukkan adanya peningkatan energi listrik yang dihasilkan oleh *piezoelectric*.

4. Perbandingan Teori

Secara teori, efek *piezoelectric* menyatakan bahwa tekanan mekanik yang diberikan pada material *piezoelectric* akan menghasilkan muatan listrik akibat deformasi struktur kristalnya. Susunan seri pada tujuh *piezoelectric* menyebabkan tegangan total merupakan hasil penjumlahan tegangan masing-masing piezo. Hasil percobaan menunjukkan kecenderungan yang sesuai dengan teori tersebut.

5. Analisis Kesalahan (*Error Analysis*)

Beberapa sumber kesalahan yang mungkin memengaruhi hasil percobaan antara lain:

- Tekanan tangan tidak konstan, sehingga tegangan yang dihasilkan tidak stabil.
- Perbedaan waktu dan kecepatan penekanan, yang memengaruhi respon *piezoelectric*.
- Keterbatasan multimeter dalam menangkap tegangan sesaat.

- Kerugian energi pada rangkaian, seperti dioda penyuarah dan LED

6. Tujuan

Tujuan praktikum untuk mengetahui kemampuan tujuh *piezoelectric* dalam mengubah energi mekanik dari tekanan tangan menjadi energi listrik telah tercapai. Hal ini dibuktikan dengan terukurnya tegangan listrik dan menyalanya LED sebagai indikator keluaran.

KESIMPULAN

Kesimpulan dan saran (*Future works*)

I. Kesimpulan

Berdasarkan pembuatan dan pengujian prototipe “*Penghasil Energi Listrik Menggunakan Piezoelectric yang Memanfaatkan Hukum Konversi Energi*”, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Piezoelectric terbukti mampu menghasilkan energi listrik dari energi kinetik pijakan kaki manusia, sehingga prinsip konversi energi mekanik menjadi energi listrik dapat diterapkan dalam skala mikro [19].
2. Arus dan tegangan yang dihasilkan memiliki karakter tidak konstan serta standar deviasi relatif tinggi akibat variasi tekanan pijakan, distribusi gaya yang tidak merata, serta karakter intrinsik material piezoelektrik [19][21].
3. Energi keluaran masih berupa arus bolak-balik (AC), sehingga dibutuhkan rangkaian penyuarah (rectifier) untuk mengubahnya ke arus searah (DC) agar dapat dipakai oleh sebagian besar perangkat elektronik berdaya rendah [20].
4. Prototipe ini menunjukkan potensi sebagai solusi energi alternatif berskala kecil di lokasi dengan mobilitas manusia tinggi, serta dapat menjadi bagian dari upaya *green energy* secara lokal [19][20].

II. Saran

Berdasarkan hasil yang diperoleh serta keterbatasan pada penelitian ini, maka direkomendasikan beberapa pengembangan lebih lanjut sebagai berikut:

1. Penggunaan Material Piezoelektrik dengan Koefisien Piezo Lebih Tinggi

Material piezoelektrik seperti PMN-PT atau PZN-PT memiliki koefisien piezoelektrik lebih tinggi dibanding PZT konvensional, sehingga dapat meningkatkan energi listrik yang dihasilkan dari tekanan yang sama dan mempercepat pengisian kapasitor penyimpanan energi [19].

2. Penambahan Sirkuit Boost Converter dan Energy Management

Menambahkan boost converter dan IC manajemen daya (misalnya LTC3108) dapat membantu menaikkan dan menstabilkan tegangan DC keluaran sehingga beban DC seperti LED atau sensor IoT dapat dinyalakan secara lebih konsisten tanpa bergantung pada tegangan kapasitor yang fluktuatif [20].

3. Optimasi Mekanik pada Media Pijakan

Mendesain ulang struktur mekanik pijakan (misalnya dengan bantalan elastis adaptif atau mekanisme distribusi gaya yang lebih merata) agar deformasi sensor piezo lebih seragam sehingga variasi keluaran listrik dapat diminimalkan [21].

4. Integrasi Penyimpanan Energi Canggih

Menggabungkan superkapasitor atau baterai mikro dengan sistem manajemen energi akan meningkatkan kemampuan sistem untuk menyimpan dan menyediakan energi dalam jumlah yang lebih besar.

5. Aplikasi pada Sistem IoT Hemat Energi

Prototipe ini dapat dikembangkan untuk menyediakan daya pada perangkat IoT hemat energi, sehingga pemanenan energi kinetik pijakan kaki juga dapat memberi manfaat pada aplikasi smart city.

PENGAKUAN/ACKNOWLEDGEMENTS

Ucapan terima kasih yang disampaikan sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Nurhidayatulloh S.Pd., M.T., selaku dosen mata kuliah Fisika yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan ilmu yang sangat bermanfaat selama proses praktikum.
2. Rekan-rekan satu kelompok yang telah bekerja sama dengan solid dalam tahap perancangan, perakitan, hingga pengujian alat.

DAFTAR REFERENSI

- ¹Owindi, K.K.S., dan N. Arosha Hemali. "Piezoelectric Energy Harvesting from Human Energy Waste: A Review of Materials, Performance, and Environmental Potential." *Journal of Environmental Professionals Sri Lanka* 14, no. 1 (2025): 1–12.
- ²Brusa, E. "A Review of Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Structures, and Design Considerations." *Sensors* 12, no. 12 (2023).
- ³Sutikno, T. "Energy Harvesting Technologies on Highway Systems: Comparative Analysis of Piezoelectric, Photovoltaic, and Thermoelectric Systems." *Intelektual Journal of Energy Harvesting Storage* 1, no. 1 (2023): 35–42.
- ⁴Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review." *Sensors* 20, no. 12 (2020).
- ⁵Yuliana, Hajiar, and Rady Yusaniar. *Rancang Bangun Sistem Energy Harvesting di Ruang Bising Menggunakan Piezoelektrik Array*. n.d.
- ⁶Windiyanti Rokmana, Arinta. "Analisis Pemahaman Konsep Hukum Kekekalan Energi Mekanik Mahasiswa Tadris IPA Pada Mata Kuliah Energi Dalam Sistem Kehidupan." *AL-MIKRAJ Jurnal Studi Islam dan Humaniora (E-ISSN 2745-4584)* 5, no. 01 (November 2024): 1310–23. <https://doi.org/10.37680/almikraj.v5i01.6242>.
- ⁷Prasetyo, Dedi Ary, and Relingga Frendy Pradistia. "Pemanfaatan Sensor Piezoelektrik Sebagai Penghasil Sumber Energi Dengan Tekanan Anak Tangga." *Emitor: Jurnal Teknik Elektro* 22, no. 1 (March 2022): 55–64. <https://doi.org/10.23917/emitor.v22i1.15140>.

- ⁸Ekawita, Riska, Rahmat Awaludin Salam, Nolla Kusumawardani, and Elfi Yuliza. *PENGUJIAN KONFIGURASI PIEZOELEKTRIK PENGHASIL TEGANGAN LISTRIK DARI ENERGI MEKANIK*. n.d.
- ⁹Arpin, Risal Mantofani. *Skematik Rangkaian Penyearah Setengah Gelombang pada Rangkaian Elektronika Analog*. 01, no. 01 (2020).
- ¹⁰Noor, Syamsudin, and Noor Saputera. *EFISIENSI PEMAKAIAN DAYA LISTRIK MENGGUNAKAN KAPASITOR BANK*. 6, no. 2 (2014).
- ¹¹Owindi, K.K.S., dan N. Arosha Hemali. "Piezoelectric Energy Harvesting from Human Energy Waste: A Review of Materials, Performance, and Environmental Potential." *Journal of Environmental Professionals Sri Lanka* 14, no. 1 (2025): 1–12.
- ¹²Piezoelectric ceramics and structure overview, dalam Piezo Hannas, What is the mechanism of piezoelectric materials? (akses daring).
- ¹³A critical review on dipole alignment and poling effect in piezoelectric materials, *Materials Advances*, DOI:10.1039/D2MA00559J.
- ¹⁴Jurusan Fisika FMIPA UNEJ , Jember, Mutmainnah Mutmainnah, Imam Rofii, Jurusan Fisika FMIPA UNEJ , Jember, Misto Misto, Jurusan Fisika FMIPA UNEJ , Jember, Dewi Ulul Azmi, and Jurusan Fisika FMIPA UNEJ , Jember. "Karakteristik Listrik dan Optik pada LED dan Laser." *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika* 8, no. 2 (July 2020): 203–8. <https://doi.org/10.23960/jtaf.v8i2.2577>.
- ¹⁵Pertiwi, Novia Ayu Sekar, Ino Angga Putra, and Suci Prihatiningtyas. "ANALISIS KEMAMPUAN MAHASISWA PENDIDIKAN FISIKA MENGGUNAKAN MULTIMETER SEBAGAI ALAT UKUR BESARAN LISTRIK DALAM PRAKTIKUM ELEKTRONIKA DASAR." *EDUSCOPE: Jurnal Pendidikan, Pembelajaran, dan Teknologi* 8, no. 1 (August 2022): 64–68. <https://doi.org/10.32764/eduscope.v8i1.2621>.
- ¹⁶Nugroho Soelami, Fx, Edi Leksono, Irsyad Nashirul Haq, Justin Pradipta, Putu Handre Kertha Utama, Aretha Fieradiella Pahrevi, Faizatuzzahrah Rahmaniah, and Meditya Wasesa. "Pemodelan Manajemen Energi Microgrid pada Sistem Bangunan Cerdas." *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi* 9, no. 4 (December 2020): 414–22. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v9i4.488>.
- ^{17,18}Mowaviq, M Imbarothur, and Andi Junaidi. *LANTAI PEMANEN ENERGI LISTRIK MENGGUNAKAN PIEZOELEKTRIK*. 10, no. 2 (2018).
- ¹⁹Zou, H., dan Z. L. Wang. "Advanced Materials for Enhanced Piezoelectric Energy Harvesting." *Materials Today Physics* 23 (2023): 100643.
- ²⁰Rounds, S., P. K. Wright, dan J. Rabaey. "Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks: With Special Focus on Piezoelectric Vibration Energy Harvesting." Springer (2004).
- ²¹Liu, H., dan D. J. Inman. "A Review of Piezoelectric Energy Harvesting for Vibration and Wave Excitation." *Shock and Vibration Digest* 46, no. 2 (2014): 117-130.