

Sistem Pembangkit Listrik Dari Langkah Kaki Berbasis Piezoelektrik dengan Monitoring Daya Melalui Iot

Silvy Berlian Putri¹, Rizal Arifin², Mohamad Mohsin³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Ponorogo
Jalan Budi Utomo No. 10 Ponorogo, Jawa Timur, 63471
¹silvyaputri02@gmail.com, ²rarifin@umpo.ac.id, ³mmuhsin2302@gmail.com

Abstract

The increasing demand for electrical energy has encouraged the development of environmentally friendly alternative energy generation technologies, including the utilization of piezoelectric materials capable of converting mechanical energy generated by footstep pressure into electrical energy. This study aims to design and develop a piezoelectric-based electrical energy generation system with power monitoring through the Internet of Things (IoT). The designed system consists of several main components, including a series-parallel piezoelectric array, bridge rectifier, capacitor, TP4056 module, 18650 lithium-ion battery, INA219 sensor, ESP32 microcontroller, and Blynk application for real-time monitoring of voltage, current, and power. The experiments were conducted by varying the applied load and the number of footsteps to investigate the effect of mechanical pressure on the electrical output of the system. The results show that variations in load and the number of footsteps affect the electrical output, with greater load and more frequent footstep pressure tending to increase the amount of electrical energy that can be harvested. In the load variation test, the highest average output was obtained at a load of 80 kg, with a voltage of 3.266 V, current of 0.52 mA, and power of 1.698 mW. The IoT-based monitoring system was able to display voltage, current, and power parameters in real time. Therefore, the developed piezoelectric-based electrical energy generation system can utilize pressure generated by walking activities to produce electrical energy while monitoring electrical parameters through IoT, providing an alternative small-scale electrical energy source.

Keywords : *Piezoelectric, Energy Harvesting, Internet of Things (IoT), Voltage and Current Sensors , Power Monitoring.*

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi listrik mendorong pengembangan teknologi pembangkit energi alternatif yang ramah lingkungan, salah satunya melalui pemanfaatan material piezoelektrik yang mampu mengubah energi mekanik dari tekanan langkah kaki menjadi energi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem pembangkit energi listrik berbasis piezoelektrik dengan monitoring daya melalui Internet of Things (IoT). Perancangan sistem terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu rangkaian piezoelektrik seri-paralel, penyearah jembatan dioda, kapasitor, modul TP4056, baterai lithium-ion 18650, sensor INA219, mikrokontroler ESP32, serta aplikasi Blynk sebagai media pemantauan tegangan, arus, dan daya secara real-time. Pengujian dilakukan dengan variasi berat beban dan jumlah langkah kaki untuk mengetahui pengaruh tekanan mekanik terhadap keluaran listrik sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan berat beban dan jumlah langkah kaki memberikan pengaruh terhadap keluaran listrik yang dihasilkan, dengan semakin besar beban dan semakin banyak tekanan langkah yang diberikan, energi listrik yang dapat dikumpulkan cenderung meningkat. Pada pengujian variasi beban, nilai rata-rata keluaran tertinggi diperoleh pada beban 80 kg, yaitu tegangan sebesar 3,266 V, arus sebesar 0,52 mA, dan daya sebesar 1,698 mW. Sistem monitoring berbasis IoT mampu menampilkan parameter tegangan, arus, dan daya secara real-time. Dengan demikian, sistem pembangkit energi listrik berbasis piezoelektrik yang dirancang mampu memanfaatkan tekanan dari aktivitas berjalan menjadi energi listrik serta memantau parameter kelistrikan melalui IoT sebagai alternatif sumber energi listrik berskala kecil.

Kata kunci : Piezoelektrik, Energy Harvesting, Internet of Things (IoT), Sensor Tegangan dan Arus, Monitoring Daya.

PENDAHULUAN

Piezoelektrik merupakan material yang mampu mengubah energi mekanik akibat tekanan menjadi energi listrik, maupun sebaliknya, sehingga banyak dimanfaatkan sebagai transduser dan sumber energi alternatif [1]. Teknologi ini memiliki keunggulan karena tidak bergantung pada kondisi cuaca, dapat bekerja di dalam maupun luar ruangan [2], berukuran relatif kecil, memiliki respons yang cepat, serta dapat diintegrasikan dengan sistem elektronik modern seperti Internet of Things (IoT). Pemanfaatan piezoelektrik pada tekanan langkah kaki memungkinkan energi kinetik manusia dikonversi menjadi energi listrik, di mana besar energi yang dihasilkan dipengaruhi oleh berat badan, gaya injakan, frekuensi langkah, serta kepadatan aktivitas pejalan kaki [3]. Namun, piezoelektrik memiliki keterbatasan berupa daya keluaran yang relatif kecil sehingga memerlukan media penyimpanan energi dan rancangan rangkaian yang tepat untuk mengoptimalkan hasil keluaran [4].

Konfigurasi rangkaian seri digunakan untuk meningkatkan tegangan, sedangkan rangkaian paralel meningkatkan arus, sehingga kombinasi seri-paralel dapat digunakan untuk memperoleh keluaran yang sesuai dengan kebutuhan sistem [5]. Kajian internasional menunjukkan bahwa piezoelectric energy harvesting memiliki potensi untuk mendukung perangkat berdaya rendah, tetapi keluaran sangat dipengaruhi oleh material, struktur mekanik, lokasi pemasangan, frekuensi pembebanan, serta metode pengondisian daya [6], [7]. Pada aplikasi lantai piezoelektrik, tantangan yang umum dijumpai adalah rendahnya kepadatan daya dan rugi-rugi pada rangkaian pengondisi energi, sehingga hasil yang diperoleh perlu dianalisis berdasarkan kondisi pembebanan dan konfigurasi sistem [8], [9].

Berdasarkan penelitian terdahulu, sebagian besar sistem masih menghasilkan daya yang rendah dan umumnya hanya mengukur tegangan tanpa analisis arus maupun daya secara menyeluruh, serta belum mengintegrasikan sistem penyearah, penyimpanan energi, dan monitoring secara lengkap [10], [11]. Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi array 72 piezoelektrik dengan konfigurasi 4 seri $\times$ 18 paralel, mekanisme pegas pada media pijakan, rangkaian penyearah dan penyimpanan energi, serta monitoring tegangan, arus, dan daya menggunakan INA219, ESP32, dan Blynk secara real-time. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengevaluasi keluaran listrik akibat variasi beban dan langkah kaki, tetapi juga mengintegrasikan proses pembangkitan, penyimpanan, dan pemantauan dalam satu prototipe sebagai alternatif sumber energi berskala kecil.

METODE PENELITIAN

A. Metode

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode perancangan dan implementasi sistem pembangkit listrik berbasis piezoelektrik dengan monitoring Internet of Things (IoT). Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan mulai dari identifikasi kebutuhan sistem, perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, proses perakitan alat, hingga pengujian dan analisis hasil. Metode ini bertujuan menghasilkan sistem yang mampu mengubah energi mekanik dari langkah kaki menjadi energi listrik sekaligus melakukan monitoring tegangan, arus, dan daya secara real-time menggunakan aplikasi Blynk.

Tahap awal penelitian dilakukan dengan studi literatur mengenai teknologi piezoelektrik, sistem penyimpanan energi, sensor INA219, mikrokontroler ESP32, serta platform Blynk sebagai media monitoring berbasis Internet of Things. Hasil studi literatur digunakan sebagai dasar dalam menentukan spesifikasi komponen dan merancang sistem yang sesuai dengan tujuan penelitian.

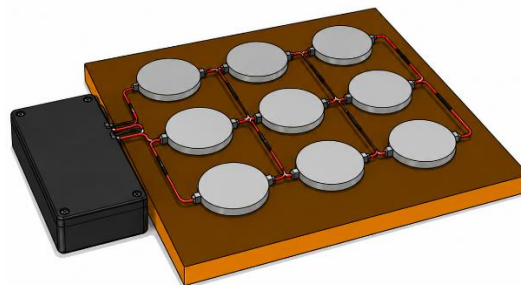
Selanjutnya dilakukan perancangan sistem yang terdiri atas perancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras dirancang menggunakan komponen utama berupa piezoelektrik sebagai pembangkit energi, bridge diode sebagai penyearah tegangan AC menjadi DC, kapasitor sebagai penyimpan energi sementara, modul TP4056 sebagai pengendali pengisian baterai lithium-ion, sensor INA219 sebagai pengukur tegangan dan arus, baterai sebagai

media penyimpanan energi, serta ESP32 sebagai pengendali utama sistem. Data hasil pengukuran kemudian dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi menuju aplikasi Blynk sehingga dapat dipantau secara real-time.

Perancangan mekanik dilakukan dengan membuat media pijakan berbahan triplek berukuran 50 cm × 50 cm yang dilengkapi dengan 72 elemen piezoelektrik, terdiri atas 64 piezoelektrik berukuran 37 mm dan 8 piezoelektrik berukuran 50 mm. Piezoelektrik disusun dalam konfigurasi seri-paralel, yaitu 4 elemen piezoelektrik dihubungkan secara seri membentuk satu kelompok, kemudian 18 kelompok tersebut dihubungkan secara paralel, sehingga diperoleh konfigurasi 4 seri × 18 paralel dengan jumlah total 72 elemen piezoelektrik. Pada bagian mekanik digunakan pegas untuk membantu mendistribusikan tekanan langkah kaki pada elemen piezoelektrik. Konfigurasi tersebut digunakan untuk memperoleh kombinasi tegangan dan arus keluaran yang sesuai dengan kebutuhan sistem.

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE untuk pemrograman ESP32. Program dirancang agar mampu membaca data sensor INA219, menghitung parameter listrik, kemudian mengirimkan data menuju aplikasi Blynk menggunakan jaringan Wi-Fi. Pada sisi aplikasi Blynk dibuat dashboard yang terdiri dari widget Gauge dan tampilan data sehingga nilai tegangan, arus, dan daya dapat dipantau secara real-time.

Setelah proses perancangan selesai, dilakukan tahap implementasi dan pengujian sistem. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi tekanan langkah kaki pada media pijakan untuk menghasilkan energi listrik. Data tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan diamati melalui sensor INA219 dan dibandingkan dengan data yang ditampilkan pada aplikasi Blynk untuk mengetahui kinerja sistem monitoring. Hasil pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi beban terhadap keluaran listrik serta keberhasilan monitoring berbasis Internet of Things.



Gambar 1. Desain Rancang Bangun Pembangkit Listrik dari Piezoelektrik

Bagian-bagian utama pada sistem pembangkit energi piezoelektrik berbasis *Internet of Things* (IoT) di atas adalah:

1. Piezoelektrik
2. Dioda Bridge (*Bridge Rectifier*)
3. Super Kapasitor (EDLC)
4. IC Charger TP4056
5. Baterai Li-ion 18650 Protected Cell
6. Sensor Arus dan Tegangan INA219
7. Mikrokontroler NodeMCU ESP32

Sistem pembangkit energi piezoelektrik dirancang untuk mengubah energi mekanik akibat tekanan langkah kaki menjadi energi listrik yang dapat disimpan dan dipantau secara real-time menggunakan teknologi Internet of Things (IoT). Rantai piezoelektrik menggunakan 64 buah piezoelektrik berukuran 37 mm dan 8 piezoelektrik berukuran 50 mm berbahan PZT (Lead Zirconate Titanate) yang disusun untuk menghasilkan tegangan AC ketika menerima tekanan. Tegangan AC yang dihasilkan kemudian disearahkan menggunakan dioda bridge (bridge rectifier) sehingga menjadi tegangan DC yang dapat dimanfaatkan oleh rangkaian berikutnya.

Energi listrik hasil penyearahan selanjutnya disimpan pada kapasitor yang berfungsi sebagai media penyimpanan energi sementara. Energi yang telah dikondisikan kemudian diteruskan ke IC Charger TP4056 untuk mengatur proses pengisian baterai lithium-ion menggunakan metode Constant Current/Constant Voltage (CC/CV). Penggunaan kapasitor dan rangkaian penyearah dimaksudkan untuk mengurangi pengaruh keluaran piezoelektrik yang berdenyut akibat tekanan langkah kaki.

Energi hasil konversi disimpan pada baterai Li-ion tipe 18650 Protected Cell sebagai media penyimpanan energi. Selanjutnya, sensor INA219 digunakan untuk mengukur nilai tegangan dan arus pada sisi pengukuran sistem. Daya dihitung dari hasil perkalian tegangan dan arus, kemudian data diproses oleh mikrokontroler NodeMCU ESP32 yang memiliki fitur Wi-Fi sehingga data dapat dikirim ke platform monitoring berbasis IoT untuk ditampilkan secara real-time.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Rancangan Perangkat Keras

Implementasi perangkat keras dilakukan dengan merangkai seluruh komponen yang digunakan pada sistem pembangkit energi listrik berbasis piezoelektrik sesuai dengan rancangan pada metode penelitian. Komponen utama terdiri dari piezoelektrik sebagai penghasil energi listrik akibat tekanan langkah kaki, dioda bridge sebagai penyearah tegangan AC menjadi DC, kapasitor sebagai media penyimpanan energi sementara, modul TP4056 sebagai pengatur proses pengisian baterai Li-ion 18650, sensor INA219 sebagai pembaca tegangan dan arus, serta mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama sistem



Gambar 2. Rancang Bangun Sistem Pembangkit Piezoelektrik

Seluruh komponen dihubungkan sehingga membentuk satu kesatuan sistem pembangkit dan monitoring energi listrik. Ketika pengguna menginjak lantai piezoelektrik, energi mekanik dikonversi menjadi energi listrik berupa tegangan AC. Tegangan tersebut kemudian disearahkan oleh dioda bridge menjadi tegangan DC dan disimpan sementara pada kapasitor sebelum diteruskan ke modul TP4056 untuk proses pengisian baterai. Selanjutnya, sensor INA219 melakukan pengukuran terhadap tegangan dan arus yang mengalir pada sistem, kemudian data dikirimkan ke ESP32 untuk diproses. ESP32 selanjutnya mengirimkan hasil pembacaan sensor melalui jaringan Wi-Fi ke aplikasi Blynk sehingga pengguna dapat memantau kondisi sistem secara real-time.

B. Rancangan Perangkat Lunak

Implementasi perangkat lunak bertujuan untuk mengendalikan seluruh proses pembacaan data, pengolahan informasi, serta komunikasi antara perangkat keras dengan aplikasi monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Program dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan memanfaatkan beberapa pustaka (library), yaitu WiFi.h untuk komunikasi jaringan, Wire.h sebagai komunikasi I2C, Adafruit_INA219.h untuk membaca data dari sensor INA219, serta BlynkSimpleEsp32.h sebagai media komunikasi antara ESP32 dan Blynk Cloud.

Program diawali dengan proses inisialisasi seluruh perangkat, kemudian ESP32 melakukan koneksi ke jaringan Wi-Fi dan server Blynk. Setelah koneksi berhasil, ESP32 membaca nilai tegangan dan arus dari sensor INA219 secara berkala. Data hasil pembacaan kemudian diolah untuk memperoleh informasi kondisi baterai dan daya

yang dihasilkan oleh sistem pembangkit piezoelektrik. Selanjutnya, nilai tegangan, arus, dan daya dikirimkan ke aplikasi Blynk melalui Virtual Pin sehingga dapat ditampilkan dalam bentuk angka secara *real-time*. Dengan adanya perangkat lunak ini, pengguna dapat memantau kondisi sistem dari jarak jauh menggunakan *smartphone* tanpa harus melakukan pengukuran secara langsung pada perangkat.



Gambar 3. Tampilan monitoring tegangan, arus, dan daya

C. Pengujian Sistem Pembangkit

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem pembangkit energi listrik berbasis piezoelektrik terhadap variasi berat beban. Setiap pengujian dilakukan sebanyak lima kali dengan variasi jumlah langkah kaki, kemudian hasil pengukuran dirata-ratakan sehingga diperoleh nilai rata-rata tegangan, arus, dan daya pada masing-masing beban. Perhitungan daya menggunakan persamaan $P = V \times I$. Untuk analisis energi kumulatif, energi dapat dihitung menggunakan $E = P \times t$, dengan E adalah energi (J), P adalah daya (W), dan t adalah waktu (s). Pada penelitian ini pengukuran difokuskan pada keluaran tegangan, arus, dan daya rata-rata; waktu pengisian baterai dan energi kumulatif selama proses pengisian belum diukur secara khusus sehingga tidak digunakan sebagai parameter kuantitatif hasil penelitian.

Tabel 2. Hasil Rata-rata Pengujian Sistem Berdasarkan Variasi Beban

No	Berat Beban (kg)	Rata-rata Tegangan (V)	Rata-rata Arus (mA)	Rata-rata Daya (mW)
1.	80	3,266	0,52	1,698
2.	70	2,848	0,48	1,367
3.	60	2,540	0,40	1,016
4.	50	1,950	0,30	0,585

D. Hasil Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian, sistem pembangkit energi listrik berbasis piezoelektrik mampu menghasilkan energi listrik dari tekanan langkah kaki. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar beban yang diberikan, nilai tegangan, arus, dan daya rata-rata cenderung meningkat. Nilai rata-rata tertinggi diperoleh pada beban 80 kg, yaitu sebesar 3,266 V, 0,52 mA, dan 1,698 mW, sedangkan nilai terendah diperoleh pada beban 50 kg, yaitu sebesar 1,950 V, 0,30 mA, dan 0,585 mW. Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan gaya tekan meningkatkan deformasi mekanik pada elemen piezoelektrik sehingga keluaran listrik yang terukur juga meningkat.

Selain menghasilkan energi listrik, sistem berhasil melakukan monitoring tegangan, arus, dan daya secara *real-time* menggunakan sensor INA219, mikrokontroler ESP32, dan aplikasi Blynk melalui jaringan Wi-Fi. Data hasil pengukuran dapat ditampilkan secara langsung pada aplikasi sehingga kondisi sistem dapat dipantau dengan mudah. Integrasi tersebut menjadi pembeda utama prototipe ini karena proses pembangkitan, penyimpanan, pengukuran, dan monitoring kelistrikan berada dalam satu sistem. Namun, karena penelitian ini belum melakukan pengukuran khusus

terhadap waktu pengisian baterai dan energi kumulatif, evaluasi lanjutan perlu dilakukan untuk menentukan kapasitas energi yang dapat dikumpulkan dalam periode waktu tertentu.

Selain mampu menghasilkan energi listrik, sistem juga berhasil melakukan monitoring tegangan dan arus secara real-time menggunakan sensor INA219, mikrokontroler ESP32, dan aplikasi Blynk melalui jaringan Wi-Fi. Data hasil pengukuran dapat ditampilkan secara langsung pada aplikasi sehingga kondisi sistem dapat dipantau dengan mudah. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pembangkit energi piezoelektrik berbasis Internet of Things (IoT) telah bekerja sesuai dengan perancangan dan mampu melakukan proses pembangkitan, penyimpanan, serta monitoring energi listrik secara terpadu.

Berdasarkan hasil penelitian, sistem pembangkit energi listrik berbasis piezoelektrik yang dirancang telah berhasil direalisasikan dan mampu mengubah energi mekanik dari tekanan langkah kaki menjadi energi listrik yang selanjutnya disalurkan menggunakan dioda bridge, disimpan sementara pada kapasitor dan baterai melalui modul TP4056, serta dimonitor secara real-time menggunakan sensor INA219, mikrokontroler ESP32, dan aplikasi Blynk. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan beban cenderung meningkatkan tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan, dengan nilai rata-rata tertinggi pada beban 80 kg sebesar 3,266 V, 0,52 mA, dan 1,698 mW. Sistem monitoring IoT mampu menampilkan parameter kelistrikan secara langsung melalui jaringan Wi-Fi. Dengan demikian, prototipe dapat digunakan sebagai alternatif pemanfaatan energi langkah kaki untuk menghasilkan energi listrik berskala kecil dan mendukung perangkat berdaya rendah. Penelitian lanjutan disarankan melakukan pengukuran energi kumulatif dan waktu pengisian baterai untuk mengevaluasi kemampuan penyimpanan energi secara lebih menyeluruh.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, sistem pembangkit energi listrik berbasis piezoelektrik yang dirancang telah berhasil direalisasikan dan mampu mengubah energi mekanik dari tekanan langkah kaki menjadi energi listrik yang selanjutnya disalurkan menggunakan dioda bridge, disimpan pada baterai melalui modul TP4056, serta dimonitor secara real-time menggunakan sensor INA219, mikrokontroler ESP32, dan aplikasi Blynk. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar beban yang diberikan, semakin tinggi pula tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan, dengan nilai rata-rata tertinggi pada beban 80 kg sebesar 3,266 V, 0,52 mA, dan 1,698 mW. Selain itu, sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) mampu menampilkan data tegangan, arus, dan kondisi sistem secara langsung melalui jaringan Wi-Fi, sehingga keseluruhan sistem telah bekerja sesuai dengan tujuan perancangan sebagai alternatif pemanfaatan energi langkah kaki untuk menghasilkan dan memantau energi listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. Andrea Songklanaita, Rd. Apip Miptahudin, "Implementasi Generator Langkah kaki Untuk Mengoptimalkan Potensi Energi Terbarukan Dan Energi Kinetik," *J. Elektrosista*, vol. 13, no. 1, pp. 92–97, 2025.
- [2] Moonik Arief, R. Jotje, and M. Benny, "Pemanen Energi Listrik Dari Curah Hujan Melalui Transduser Piezoelektrik Secara Seri Dan Paralel," *jurnal poros Tek. mesin unsrat*, vol. Volume 12, no. 1, 2023.
- [3] M. S. Rohman and S. T. A. Supardi, "Lantai Piezoelektri Sebagai Penghasil Sumber Energi Listrik dengan Memanfaatkan Pijakan Kaki," *eprints.ums.ac.id*, p. 60, 2021.
- [4] A. F. Kallawa, A. Fikri, and M. Mujirudin, "Pengaruh Rangkaian Seri Dan Paralel Terhadap Tegangan Pada Piezoelektrik," *J. Manufaktur, Energi, Mater. Tek.*, vol. 1, pp. 52–57, 2022.
- [5] M. H. Samuel Adrian Suwono, Reynard Kent Rusly, "Genic Lantai Penghasil Listrik," *academia.edu*, vol. 1, pp. 167–186, 2021.
- [6] N. Sezer and M. Koç, "A Comprehensive Review on the State-of-the-Art of Piezoelectric Energy Harvesting," *Nano Energy*, vol. 80, Art. no. 105567, 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105567.

-
- [7] “Footwear for Piezoelectric Energy Harvesting: A Comprehensive Review on Prototypes Development, Applications and Future Prospects,” *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 28, Art. no. 101134, 2024, doi: 10.1016/j.cossms.2023.101134.
- [8] S. Sharma, R. Kiran, P. Azad, and R. Vaish, “A Review of Piezoelectric Energy Harvesting Tiles: Available Designs and Future Perspective,” *Energy Conversion and Management*, vol. 254, Art. no. 115272, 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115272.
- [9] B. Zhao, F. Qian, A. Hatfield, L. Zuo, and T.-B. Xu, “A Review of Piezoelectric Footwear Energy Harvesters: Principles, Methods, and Applications,” *Sensors*, vol. 23, no. 13, Art. no. 5841, 2023, doi: 10.3390/s23135841.
- [10] G. K. R. k.Sai Bhargav, “Advanced Foot step power generation system for mobile charging Advanced Foot steppower generation system for mobile charging,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2325, pp. 1742–6596, 2022.
- [11] S. Gonçalves *et al.*, “Application of PVDF Transducers for Piezoelectric Energy Harvesting in Unmanned Aerial Vehicles,” *Energies*, vol. 18, no. 17, pp. 1–22, 2025.