E-ISSN : 3025-1311
https://journal.cib.institute/index.php/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 11 No 3 Tahun 2026

RANCANG BANGUN PEMBANGKIT DAYA PIEZOELEKTRIK MENGGUNAKAN LANGKAH KAKI PADA ANAK TANGGA RUANG PUBLIK

Ahmad Zaki Hasan [1*], Mahendra Widyartono [2]
[1,2] Teknik Listrik, Universitas Negeri Surabaya
E-mail: ahmadzaki.21021@mhs.unesa.ac.id, mahendrawidyartono@unesa.ac.id

ABSTRACT

This study aims to design and develop a piezoelectric power generator that utilizes footstep pressure on public stairways as an electrical energy source for LED lighting. The research employed an experimental method using variations in body weight and pressure applied to the stair surface. The measured parameters included voltage, current, power, and electrical output stability. The system integrates piezoelectric elements with a spring mechanism, a rectifier using 1N5819 diodes, a capacitor for temporary energy storage, and a 5 V LED load. The test results show that increasing the applied load generally increases the generated voltage, current, and power. At a body weight of 68 kg, the system was able to reach approximately 5 W of power, while the average power at a one-foot measured load of 76 kg reached 8.32 W. However, the electrical output still fluctuated, indicating that system stability was not yet optimal. The results demonstrate that footstep pressure can be converted into electrical energy and utilized as an alternative energy source for public stairway lighting.

Keywords: Piezoelectric, Footsteps, Stairway, Energy Harvesting, Electrical Energy, Pressure, Power

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun pembangkit daya piezoelektrik yang memanfaatkan tekanan langkah kaki pada anak tangga ruang publik sebagai sumber energi listrik untuk menyalakan lampu LED. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dengan variasi berat badan dan tekanan pada permukaan anak tangga. Parameter yang diuji meliputi tegangan, arus, daya, dan kestabilan keluaran listrik. Sistem menggunakan elemen piezoelektrik yang diintegrasikan dengan mekanisme pegas, rangkaian penyearah menggunakan dioda 1N5819, kapasitor sebagai penyimpan sementara, serta beban LED 5 V. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan beban secara umum meningkatkan tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan. Pada beban 68 kg, sistem mampu mencapai daya

Article History
Received: Agustus 2026
Reviewed:Agustus 2026
Published: Agustus 2026

Plagiarism Checker No 237.u873247.fh8374

Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

sekitar 5 W, sedangkan pada beban satu kaki 76 kg daya rata-rata mencapai 8,32 W. Namun, keluaran listrik masih mengalami fluktuasi sehingga kestabilan sistem belum optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tekanan langkah kaki dapat dikonversikan menjadi energi listrik dan dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif untuk penerangan anak tangga ruang publik.

Kata Kunci: ***Piezoelektrik, Langkah Kaki, Anak Tangga, Energy Harvesting, Energi Listrik, Tekanan, Daya***

PENDAHULUAN

Dalam situasi di mana permintaan energi secara global semakin meningkat dan tantangan lingkungan semakin mendesak, pencarian energi alternatif yang ramah lingkungan menjadi fokus utama. Pembangkit listrik berbasis piezoelektrik menjadi teknologi yang menarik karena dapat menghasilkan energi listrik saat material mengalami perubahan bentuk. Karena potensinya yang besar, piezoelektrik banyak dikembangkan oleh para peneliti dan perekayasa untuk berbagai kebutuhan di masa kini dan masa depan. Jika dibandingkan dengan sumber energi terbarukan lainnya, seperti tenaga surya atau angin, teknologi piezoelektrik memiliki beberapa kelebihan. Salah satunya adalah tidak tergantung pada kondisi cuaca atau waktu. Panel surya, misalnya, hanya efektif saat mendapat pencahayaan matahari, dan turbin angin membutuhkan lokasi dengan kecepatan angin yang konsisten. Sebaliknya, piezoelektrik dapat menghasilkan energi kapan saja, selama ada tekanan mekanik yang diberikan, seperti dari langkah kaki manusia. Selain itu, sistem piezoelektrik dapat diterapkan pada ruang terbatas dan tidak memerlukan lahan luas seperti instalasi solar panel, menjadikannya lebih fleksibel untuk diterapkan di area perkotaan yang padat.

METODE PENELITIAN

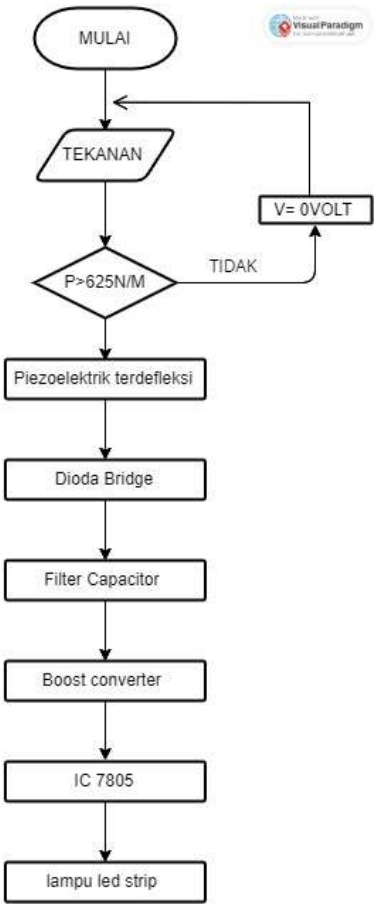
1) Jenis atau Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menemukan hubungan sebab-akibat antara variabel independen dan dependen. Variabel independen sengaja dikendalikan dan dimanipulasi. Data dikumpulkan melalui observasi dan analisis untuk memahami efek perawatan tertentu.

2) Tempat dan Waktu Penelitian

Perancangan dan pengujian dilakukan pada prototipe anak tangga yang dirancang untuk aplikasi ruang publik. Proses penelitian mencakup studi literatur, identifikasi masalah, perancangan mekanik dan elektrik, pembuatan alat, pengujian, analisis data, serta evaluasi hasil.

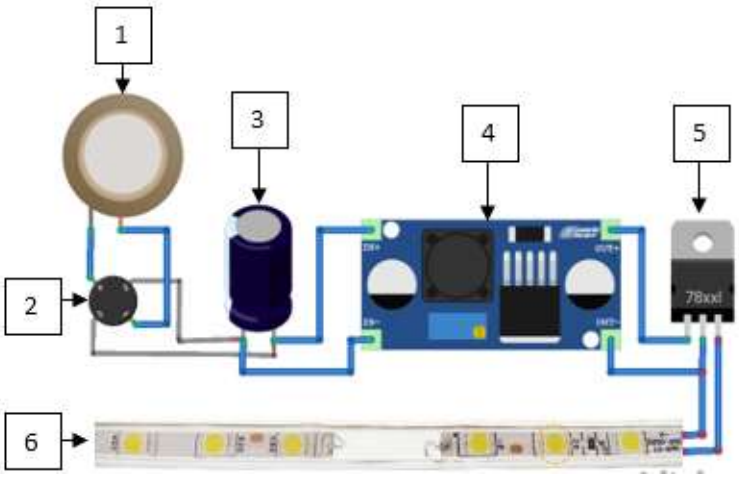
3) Flow Chart



Gambar 1 flow chart

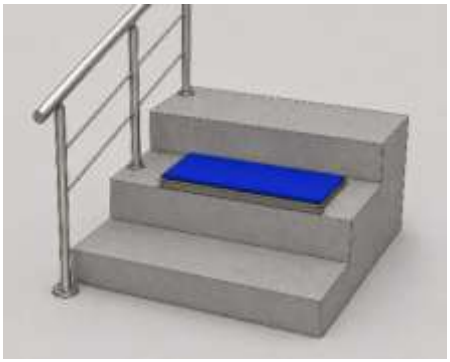
Penelitian diawali dengan tahap mulai, kemudian melakukan studi literatur untuk mempelajari piezoelektrik dan komponen pendukungnya. Setelah itu dilakukan identifikasi masalah dan perumusan masalah untuk menentukan fokus penelitian. Selanjutnya dilakukan identifikasi sistem, perancangan sistem dan hardware, kemudian konfigurasi piezoelektrik secara seri dan paralel. Setelah alat selesai dibuat, dilakukan pengujian dengan memberikan variasi beban pada anak tangga dan mengukur tegangan, arus, tekanan, serta daya yang dihasilkan. Jika hasil pengujian belum sesuai dengan tujuan, dilakukan perbaikan alat dan pengujian kembali. Jika sudah sesuai, data dianalisis untuk mengetahui hubungan antara beban atau tekanan dengan keluaran listrik. Hasil analisis kemudian dibahas dan penelitian dinyatakan selesai.

4) Perancangan Sistem

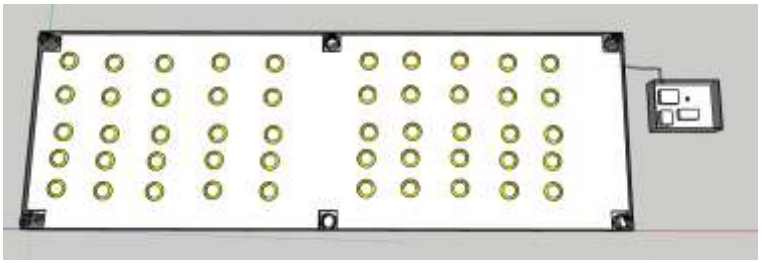


Perancangan piezoelektrik pada penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan tekanan langkah kaki manusia pada permukaan anak tangga sebagai sumber energi mekanik yang kemudian dikonversikan menjadi energi listrik. Piezoelektrik ditempatkan di bawah permukaan pijakan anak tangga sehingga ketika seseorang menginjak permukaan tersebut, tekanan akan diteruskan menuju elemen piezoelektrik dan menghasilkan tegangan listrik. Konsep ini sesuai dengan tujuan penelitian untuk mengetahui efektivitas piezoelektrik sebagai sumber daya listrik pada lantai anak tangga.

5) Desain Rancangan Pemasangan



Gambar 3 penempatan modul



Gambar 4 Posisi piezoelektrik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Desain Alat

Hasil pembuatan alat terdiri dari bagian mekanik dan elektrik yang saling terintegrasi. Bagian mekanik menerima tekanan dari langkah kaki dan meneruskannya ke piezoelektrik. Bagian elektrik mengolah keluaran piezoelektrik agar dapat digunakan untuk menyalakan LED strip 5 V. Konstruksi anak tangga memiliki ukuran panjang 90 cm dan lebar 30 cm. Susunan piezoelektrik terdiri dari 5 seri dan 20 paralel, dengan rangkaian penyearah menggunakan empat dioda 1N5819 serta kapasitor Elco 10 µF 25 V sebagai penyimpan sementara.

Data Penelitian

Tabel 1 menyajikan nilai rata-rata dari tiga kali pengukuran pada setiap variasi beban. Nilai berat badan normal, beban satu kaki, dan tekanan mengikuti data pengujian pada tugas akhir.

Table 1 hasil uji coba

NO	Berat badan normal (kg)	Berat badan pengukuran dengan satu kaki (kg)	Tekanan N/m2	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (w)
1	47	38	138,06	0,98	0,24	0,2352
				1,96	0,2	0,392
				1,08	0,12	0,1296
2	51	42	152,6	3,25	0,65	2,1125
				2,85	0,57	1,6245
				2,86	0,6	1,716
3	55	46	167,1	3,88	0,84	3,2592
				3,86	0,81	3,1266
				3,7	0,78	2,886
4	59	50	181,6	4,25	0,86	3,655
				4,18	0,89	3,7202
				4	0,88	3,52
5	67	58	210,7	5,05	0,94	4,747
				4,87	0,91	4,4317
				4,76	0,96	4,5696
6	68	59	214,3	5,42	0,99	5,3658
				5,45	1	5,45
				5,3	0,97	5,141
7	73	64	232,5	5,75	1	5,75
				5,77	1,1	6,347
				5,7	1,3	7,41
8	75	66	239,8	5,8	1,06	6,148
				5,78	1,2	6,936
				5,81	1,23	7,1463
9	80	71	257,9	5,9	1,31	7,729
				5,83	1,3	7,579
				5,91	1,28	7,5648
10	85	76	276,13	6,2	1,38	8,556
				6,05	1,35	8,1675
				6	1,37	8,22

Berdasarkan hasil pengujian dan perhitungan saya, didapat hipotesis mengenai Perbedaan nilai daya yang dihasilkan padahal beban dan tekanan yang diberikan sama pada setiap pengujian, hal ini dapat disebabkan karena sistem mekanik belum sepenuhnya mampu mendistribusikan tekanan secara merata ke seluruh piezoelektrik. Dalam sistem pembangkit listrik yang menggunakan piezoelektrik pada anak tangga, tekanan yang diberikan oleh pengguna tidak secara langsung diterima oleh seluruh piezoelektrik dengan besar gaya yang sama. Tekanan dari langkah kaki terlebih dahulu diterima oleh permukaan pijakan, kemudian diteruskan melalui mekanisme mekanik seperti dudukan dan pegas menuju piezoelektrik. Oleh karena itu, kondisi dan konstruksi mekanik memiliki pengaruh terhadap seberapa besar tekanan yang akhirnya diterima oleh masing-masing piezoelektrik. Meskipun pejalan kaki

memberikan beban atau berat badan yang sama, tidak seluruh piezoelektrik akan menerima tekanan yang sama besar. Hal tersebut dapat terjadi karena adanya perbedaan posisi pijakan kaki pada permukaan anak tangga. Ketika kaki menginjak tepat pada bagian tertentu, tekanan akan lebih terkonsentrasi pada area yang berada di bawah posisi kaki tersebut. Akibatnya, piezoelektrik yang berada di sekitar titik tekanan akan menerima gaya yang lebih besar dibandingkan dengan piezoelektrik yang berada lebih jauh dari titik tekanan. Dan piezoelektrik yang tidak terkena tekanan sama sekali akan menjadi beban sehingga akan mengurangi daya yang dihasilkan.

Mekanisme pegas dan dudukan piezoelektrik juga menjadi salah satu bagian penting dalam proses pendistribusian tekanan. Pegas berfungsi membantu meneruskan gaya dari permukaan pijakan menuju piezoelektrik. Namun, apabila tekanan yang diberikan pada permukaan tidak dapat diteruskan secara merata melalui mekanisme tersebut, maka terdapat kemungkinan sebagian piezoelektrik menerima gaya yang lebih besar dan sebagian lainnya menerima gaya yang lebih kecil. Kondisi tersebut menyebabkan energi mekanis yang diterima oleh piezoelektrik menjadi tidak seragam. Ketidakmerataan tekanan tersebut kemudian berpengaruh terhadap deformasi piezoelektrik. Piezoelektrik menghasilkan energi listrik sebagai akibat adanya deformasi ketika mendapatkan tekanan mekanis. Apabila deformasi yang diterima berbeda, maka keluaran listrik yang dihasilkan oleh masing-masing piezoelektrik juga dapat berbeda. Piezoelektrik yang mengalami deformasi lebih besar cenderung memberikan kontribusi keluaran yang lebih besar, sedangkan piezoelektrik yang mengalami deformasi lebih kecil memberikan kontribusi yang lebih kecil. Ketika seluruh keluaran piezoelektrik digabungkan dalam satu rangkaian, perbedaan tersebut dapat menyebabkan nilai tegangan dan arus keluaran sistem mengalami perubahan.

Perubahan tegangan dan arus tersebut kemudian berpengaruh langsung terhadap nilai daya listrik yang dihasilkan, karena daya merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus. Dengan demikian, apabila tekanan yang diterima piezoelektrik berubah, maka deformasi yang terjadi juga berubah, kemudian keluaran tegangan dan arus berubah, sehingga daya yang dihasilkan oleh sistem juga dapat mengalami perubahan. Kondisi inilah yang dapat menjelaskan mengapa beban listrik yang digunakan sama, tetapi nilai daya yang diperoleh pada setiap pengujian tidak selalu sama. Perbedaan tersebut juga dapat terjadi ketika pengujian dilakukan menggunakan berat badan yang sama. Misalnya, apabila seorang pengguna dengan berat badan tertentu melakukan pengujian lebih dari satu kali, posisi kaki pada pengujian pertama belum tentu sama dengan posisi kaki pada pengujian berikutnya. Pada pengujian pertama, tekanan mungkin lebih banyak diterima oleh bagian tengah permukaan anak tangga, sedangkan pada pengujian berikutnya tekanan mungkin lebih banyak diberikan pada bagian samping. Meskipun berat badan pengguna tetap sama, distribusi gaya pada piezoelektrik menjadi berbeda. Akibatnya, keluaran tegangan dan arus yang dihasilkan dapat mengalami perubahan.

Selain itu, langkah kaki manusia merupakan tekanan yang bersifat dinamis, sehingga gaya yang diberikan tidak selalu konstan. Ketika kaki mulai menyentuh permukaan anak tangga, tekanan masih relatif kecil. Tekanan kemudian meningkat ketika seluruh berat badan mulai diteruskan ke permukaan, dan selanjutnya berkurang ketika kaki mulai diangkat. Perubahan tekanan selama proses tersebut menyebabkan piezoelektrik mengalami perubahan deformasi secara terus-menerus. Oleh sebab itu, keluaran listrik yang dihasilkan juga dapat berubah selama proses injakan. Hal tersebut menunjukkan bahwa berat badan hanya menunjukkan besarnya beban secara keseluruhan, sedangkan daya yang dihasilkan sistem juga dipengaruhi oleh bagaimana beban tersebut diteruskan secara mekanis kepada piezoelektrik. Dengan kata lain, tiga pengujian dengan berat badan yang sama dapat menghasilkan nilai daya yang berbeda apabila tekanan yang diterima oleh piezoelektrik tidak sama.

Dengan demikian, ketidakmerataan distribusi tekanan dapat dianggap sebagai salah satu faktor penyebab terjadinya perbedaan nilai daya pada setiap pengujian. Kondisi ini tidak menunjukkan bahwa piezoelektrik tidak mampu menghasilkan energi listrik, karena sistem

tetap mampu menghasilkan daya dan menunjukkan peningkatan daya ketika beban ditingkatkan. Akan tetapi, kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem belum mampu mengubah tekanan dari langkah kaki menjadi keluaran listrik yang konsisten dan stabil. Oleh karena itu, diperlukan perbaikan pada bagian mekanik, khususnya pada konstruksi permukaan pijakan, posisi piezoelektrik, mekanisme pegas, serta dudukan piezoelektrik agar gaya dari langkah kaki dapat diteruskan secara lebih merata ke seluruh elemen piezoelektrik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis pembangkit listrik tenaga piezoelektrik pada anak tangga, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Besarnya daya yang dihasilkan piezoelektrik untuk menyalakan lampu LED dipengaruhi oleh besar beban atau tekanan yang diberikan pada permukaan anak tangga. Hasil pengujian pada Tabel 1 menunjukkan bahwa semakin besar berat badan yang diberikan, secara umum semakin besar pula tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan oleh sistem. Berdasarkan hasil tersebut, kebutuhan daya lampu LED sebesar 5 W mulai dapat dicapai pada beban di atas 68 kg. Dengan demikian, sistem piezoelektrik yang dirancang telah mampu menghasilkan daya yang dapat digunakan untuk menyalakan lampu LED pada kondisi pembebanan tertentu. Namun, pada beban yang lebih rendah, daya yang dihasilkan belum mencukupi kebutuhan LED sehingga nyala lampu menjadi lebih redup.
2. Sistem belum mampu mempertahankan kestabilan tegangan dan daya secara optimal ketika terjadi variasi tekanan atau beban. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan berat badan dan tekanan menyebabkan perubahan pada tegangan, arus, dan daya keluaran. Meskipun terdapat kecenderungan bahwa peningkatan tekanan menghasilkan daya yang lebih besar, nilai keluaran listrik tidak sepenuhnya stabil. Hal tersebut menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan oleh sistem masih mengalami variasi pada kondisi pengujian yang berbeda.

Berdasarkan kedua hasil tersebut, sistem pembangkit listrik tenaga piezoelektrik yang dirancang telah mampu membuktikan bahwa tekanan dari langkah kaki dapat dikonversikan menjadi energi listrik dan digunakan untuk menyalakan lampu LED, tetapi kinerja sistem masih belum optimal dari sisi kestabilan keluaran. Oleh karena itu, sistem masih memerlukan pengembangan terutama pada bagian mekanik, seperti konstruksi pegas, dudukan, dan mekanisme pijakan agar tekanan dari langkah kaki dapat diteruskan secara lebih merata ke seluruh piezoelektrik. Selain itu, diperlukan pengembangan pada rangkaian pengolahan energi agar keluaran listrik yang dihasilkan dapat menjadi lebih stabil

DAFTAR PUSTAKA

Ade, R. H. (2020). Prototipe Pemanfaatan Piezoelektrik Pada Pijakan Kaki Manusia Sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif. *Universitas Islam Indonesia Yogyakarta*, 1–28.

Alfraidila, F., Harmadi, H., & Rasyid, R. (2022). Rancang Bangun Pembangkit Sumber Energi Listrik Berbasis Piezoelektrik Pada Sepatu Untuk Pendaki Gunung. Jurnal Fisika Unand, 11(3), 285–291.

ANANDA MUHAMAD TRI UTAMA. (2022). RANGKAIAN PENYALA LAMPU LED SMD MENGGUNAKAN METODE PENYAKLARAN STRING SMD. 9, 356–363.

Aryawan, I. P., Sukariawan, K. D., Wiguna, G. R. T., & Astika, I. P. F. (2020). Sistem Kendali Analog Sensor Suhu Dalam Prototipe. (November), 9–11.

Azizi, M. K., & Fauziyah, M. (2024). Meningkatkan Elektrifikasi Lokasi Remote Area dengan Konversi Getaran Menjadi Lampu Penerangan Berbasis Piezoelektrik. 12(1).

CAHRUDIN. (2022). Rancang Bangun Prototipe Pembangkit Listrik Piezoelektrik Menggunakan Metode Cantilever Beam.

Doitpoms, M. S. (2026). The piezoelectric dipole moment. Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science University of Cambridge.

Firdausi, N. I. (2020). MODEL SISTEM ELEKTRIK PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG AIR LAUT MENGGUNAKAN PIEZOELECTRIC DI PULAU GILI LABAK SUMENEP MADURA. Kaos GL Dergisi, 8(75), 147–154.

H.D, N. K., & Rifaldi, S. (2022). Analisis Potensi Energi Listrik yang Dihasilkan dari Rancang Bangun Prototipe Alat Pembangkit Listrik Menggunakan Piezoelektrik Memanfaatkan Energi Kinetik dari Keset Kaki dengan Metode Energy Harvesting. EPSILON: Journal of Electrical Engineering and Information Technology, 20(1), 38–49.

Hamzah, N., Tandioga, R., & Rahmansyah, M. A. (2024). Rancang Bangun Sistem Hybrid Grid Connected Skala Laboratorium Berbasis Piezoelectric Dan Tenaga Surya. 22(2), 232–239.

Hanifah, L. Z., Kurniawan, B. P., Arista, Y., & Rahayu, L. P. (2022). Analisis Daya Piezoelektrik Pada Alat Pencegahan Penyebaran Coronavirus Terintegrasi IoT. Journal of Applied Electrical Engineering, 6(1), 27–31.

Listijorini, E., Susilo, S., Adhiwindoro, A., Febrianto, I., Shihab, M. A., Dwiyoga, M. A., & Rizqi Ananda, R. (2024). Rancang Bangun ALPENLIBE (Alat Pemanen Energi Listrik Berbasis Piezoelektrik) Sebagai Upaya Mewujudkan Energi Terbarukan. Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur Dan Energi, 7(1), 1–7.

Meng, Y., Chen, G., & Huang, M. (2022). Piezoelectric Materials: Properties, Advancements, and Design Strategies for High-Temperature Applications. Nanomaterials, 12(7).

Novianto, D. (2022). Pemodelan Dan Analisis Energi Listrik Bangkitan Pada Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Tipe Linear Electromagnetic-Piezoelectri.

Pemanen, S., Berbasis, E., Sebagai, P., Energi, S., Pada, T., Jalan, K., Muhsinin, A., Badruzzaman, H., & Hendardi, A. R. (2022). Sistem Pemanen Energi Berbasis Piezoelektrik Sebagai Sumber Energi Terbarukan Pada Konstruksi Jalan. Live and Applied Science, 2(September), 2964–772.

Pemhaugunan panc, U. (2021). PERANCANGAN SISTEM PENGISIAN BATE'RAI PEMBA}TGKIT LISTRIK ENERGI TERBARUKAN MENGGUNAKAhI SENSOR PilEZOELEKTRIK BERDASARKAN BSRAT TEKA]IIAIY Dis rsun dau diajut-n slbaqai s{ah satu syarat untukMenempuh ujian Akhir Mernperolen ft131 sarjana Tehik pada Falml.

Rahmawati, D., Ulum, M., Farisal, M., & Joni, K. (2021). Lantai Pembangkit Listrik Menggunakan Piezoelektrik dengan Buck Converter LM2596. Jurnal Arus Elektro Indonesia, 7(3), 84.

Ratih, R. M., Yasyak, M. I., Nugroha, H., & Fadlilah, U. (2019). Powerbank Piezoelektrik menggunakan Tekanan Tangan. Emitor: Jurnal Teknik Elektro, 20(1), 47–51.

Ridwan, Irawan, R., Fadillah, A., Tri Wijaya Putra, D., Jeremi Badar, J., & Agung Pratama, R. (2024). Potensi Pemanfaatan Getaran Mekanik Pada Shockbreaker Mobil Sebagai Penunjang Penghasil Listrik Menggunakan Piezoelektrik. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 10(1), 8–14.

Setiawan, R. A., Alam, S., Murdika, U., & Sumadi, S. (2020). Rancang Bangun Sistem Pemanen Energi di Lantai Menggunakan Modul BQ25570 pada Aplikasi Piezoelectric Energy Harvesting. Rekayasa, 13(3), 277–283.

Stiawan, E., & Taufiq, A. J. (2020). Rancang Bangun Alat Pemanen Energi Listrik Dari Tekanan Mekanik Berbasis Piezoelektrik. Jurnal Riset Rekayasa Elektro, 2(2), 79–84.

Sudrajat, A., Salsabila, F. F., Santoso, H. H., & Repi, V. V. R. (2021). Disain dan Pembuatan Pembangkit Listrik Mandiri Pada Sandal Penyandang Tunanetra. Jurnal Ilmiah Giga, 24(2), 64.

Valemtina, M. A., Silalahi, E. M., Widodo, B., Elektro, P. T., Teknik, F., & Timur, J. (2025). PERANCANGAN PROTOTYPE PEMBANGKIT PIEZOELEKTRIK LANTAI UNTUK SUPLAI ENERGI LISTRIK LAMPU PENERANGAN PINTU MASUK RUMAH. 13(1).

Zhu, H., Fang, Y., Fah Tee, K., & Yan, Y. (2025). Force-Dependent Output Voltage in Poly(Vinylidene Fluoride) Piezoelectric Flexible Sensors. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 20(5), 549–553