

Pemanfaatan Piezoelektrik pada Tanggul Pengaman Jalan (Polisi Tidur) sebagai Sumber Energi Listrik Lampu Penerangan Jalan

Ayu Fitriah Sapruddin^{1*}, Alda Dwiyantri², Justin Gilbert Kude Songe³

¹⁻³Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Indonesia

*Penulis Korespondensi: afitriah12@poliupg.ac.id

Abstract. *The increasing number of motor vehicles in Indonesia produces repetitive mechanical loads on road surfaces that are rarely converted into useful energy. This study designs and evaluates a piezoelectric energy-harvesting speed bump intended to support low-power street lighting. The prototype integrates 25 piezoelectric discs (50 mm diameter) connected in series, an AC–DC bridge rectifier, a 2.7 V/500 F supercapacitor for short-term storage, and a DC–DC step-up converter to charge a 12 V battery. Field tests used a motorcycle at speeds of 5, 10, and 15 km/h with rider masses of 48, 70, and 79 kg; each condition was repeated ten times and averaged. Output voltage, current, and electrical energy per pass were measured after rectification. Results indicate that higher speed and mass increase electrical output, with a peak energy of 0.021 J at 15 km/h and 70 kg and an estimated conversion efficiency of about 0.20%. After repeated charging cycles, stored energy powered a 12 V/20 W LED lamp for several minutes. The proposed integration of series piezoelectric elements with supercapacitor buffering and step-up regulation demonstrates a feasible micro-energy harvester for traffic-dense areas and provides a basis for durability and scaling studies. Future work addresses packaging, fatigue, and multi-vehicle loading.*

Keywords: *Electrical Energy; Energy Harvester; Piezoelectric; Sleeping Police; Street Lighting.*

Abstrak. Pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor di Indonesia menghasilkan beban mekanik berulang pada permukaan jalan yang umumnya belum dimanfaatkan sebagai sumber energi. Penelitian ini merancang dan menguji prototipe pemanen energi berbasis piezoelektrik yang dipasang pada tanggul pengaman jalan (polisi tidur) untuk mendukung penerangan jalan berdaya rendah. Sistem terdiri atas 25 keping piezoelektrik berdiameter 50 mm yang dirangkai seri, penyearah jembatan, superkapasitor 2,7 V/500 F sebagai penyimpan sementara, serta konverter DC–DC step-up untuk pengisian aki 12 V. Pengujian lapangan menggunakan sepeda motor dengan variasi kecepatan 5, 10, dan 15 km/jam serta massa pengendara 48, 70, dan 79 kg; setiap kondisi diulang sepuluh kali dan dirata-ratakan. Tegangan, arus, dan energi listrik per lintasan diukur setelah proses penyearahan. Hasil menunjukkan peningkatan kecepatan dan massa cenderung meningkatkan keluaran listrik, dengan energi maksimum 0,021 J pada 15 km/jam dan 70 kg serta efisiensi konversi sekitar 0,20%. Energi yang tersimpan mampu menyalakan lampu LED 12 V/20 W selama beberapa menit setelah siklus pengisian berulang. Integrasi rangkaian seri, buffer superkapasitor, dan regulasi tegangan ini menunjukkan potensi sebagai pemanen energi mikro pada lokasi lalu lintas padat. Kontribusi utama penelitian adalah rancangan integratif yang siap diuji di lapangan. Pekerjaan lanjutan mencakup optimasi distribusi tekanan, kemasan pelindung, dan uji ketahanan jangka panjang.

Kata kunci: Energi Listrik; Pemanen Energi; Piezoelektrik; Polisi Tidur; Penerangan Jalan.

1. LATAR BELAKANG

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, industrialisasi, dan peningkatan jumlah kendaraan bermotor. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), permintaan energi listrik nasional tumbuh rata-rata 4,9% per tahun dengan dominasi pemakaian pada sektor rumah tangga dan transportasi (ESDM, 2024). Ketergantungan terhadap energi fosil yang masih mencapai lebih dari 85% dalam bauran energi nasional menyebabkan meningkatnya emisi karbon dan menurunnya ketahanan energi nasional (Suryadi & Nurcahyani, 2020). Untuk itu,

pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT) menjadi langkah strategis dalam mencapai target *Net Zero Emission* 2060.

Berbagai sumber EBT seperti energi surya, angin, biomassa, panas bumi, dan air telah dikembangkan di Indonesia. Namun, penerapan teknologi tersebut masih menghadapi kendala biaya investasi, efisiensi sistem yang rendah, dan keterbatasan lahan (Rahmawati, et al., 2021). Oleh sebab itu, inovasi menuju sistem *micro energy harvesting* yang memanfaatkan energi lingkungan dan limbah energi mekanik menjadi fokus penelitian baru. Salah satu bentuk energi limbah yang menarik adalah energi mekanik akibat tekanan kendaraan bermotor di jalan raya yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal (Afif et al., 2018).

Berdasarkan data Korlantas Polri (2024), jumlah kendaraan bermotor di Sulawesi Selatan mencapai 4,43 juta unit (Polri, 2024). Tekanan dari roda kendaraan yang melintasi jalan raya dapat menjadi sumber energi potensial apabila dikonversi menggunakan teknologi piezoelektrik. Piezoelektrik merupakan material yang mampu menghasilkan tegangan listrik saat diberikan tekanan mekanik, atau sebaliknya menghasilkan deformasi mekanik saat diberi medan listrik (Hadi & suryana, 2018). Efek ini pertama kali ditemukan oleh Jacques dan Pierre Curie pada tahun 1880, dan kini banyak digunakan dalam sensor, transduser, dan sistem pemanen energi (*energy harvester*).

Dalam konteks transportasi modern, konsep *road energy harvesting* berbasis piezoelektrik mulai banyak dikembangkan di berbagai negara. Di Jepang, lempeng piezoelektrik telah dipasang di stasiun Tokyo untuk mengubah energi langkah kaki penumpang menjadi listrik bagi lampu penerangan area publik (Sari & Matsumoto, 2021). Hasil penelitian Chen et al. (2021) menunjukkan bahwa perangkat piezoelektrik yang dipasang di jalan raya dapat menghasilkan daya sebesar 2–5 mW per unit pada kecepatan kendaraan 40–60 km/jam. Walaupun relatif kecil, energi tersebut cukup untuk menyalakan sensor nirkabel atau sistem penerangan hemat daya. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada karakteristik material piezoelektrik secara individu tanpa mengintegrasikan sistem penyimpanan dan pengatur tegangan. Pada penelitian ini, kebaruan yang diusulkan terletak pada konfigurasi piezoelektrik seri yang dipasang pada tanggul jalan (*speed bump*), yang kemudian dihubungkan dengan rangkaian penyearah, superkapasitor, dan *step-up converter* DC–DC untuk meningkatkan efisiensi penyaluran energi ke beban penerangan. Pendekatan ini belum banyak diaplikasikan pada studi serupa di Indonesia, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam pengembangan sistem *micro energy harvesting* berbasis infrastruktur transportasi. Kajian pada sistem pasokan daya piezoelektrik di jalan/pavement juga menunjukkan potensi pemanenan energi untuk aplikasi kelistrikan berdaya rendah pada

infrastruktur transportasi (Yang et al, 2018). Selain itu, perangkat piezoelektrik berbasis speed bump telah dilaporkan mampu mendukung aplikasi praktis pada skala mikro, termasuk pengisian daya dan pemanfaatan energi lalu lintas (Song et al, 2019).

Teknologi piezoelektrik sebagai pembangkit listrik skala kecil memiliki keunggulan dibanding energi terbarukan konvensional karena tidak tergantung pada kondisi cuaca, tidak membutuhkan lahan tambahan, dan dapat dipasang pada infrastruktur yang sudah ada (Wong, 2023). Salah satu lokasi paling potensial untuk penerapan sistem ini adalah tanggul pengaman jalan atau polisi tidur, yang secara alami menerima beban dinamis dari kendaraan dengan frekuensi tinggi. Ketika kendaraan melintas, energi mekanik dari tekanan roda terhadap permukaan tanggul dapat diubah menjadi energi listrik yang disimpan pada superkapasitor dan digunakan untuk menyalakan lampu penerangan jalan otomatis (Sidiq & Amrullah, 2021).

Beberapa studi di Indonesia telah meneliti konsep serupa. Maulana et al. (2016) menunjukkan bahwa tekanan maksimum pada bagian tengah lempeng piezoelektrik menghasilkan daya tertinggi. Penelitian Rahmawati et al. (2021) juga menunjukkan peningkatan tegangan keluaran ketika beberapa piezoelektrik dirangkai secara seri-paralel. Sementara itu, Sulistiyanti et al. (2020) menjelaskan bahwa piezoelektrik dengan konfigurasi kristal yang tepat dapat menghasilkan gaya gerak listrik cukup stabil untuk beban kecil.

Meski demikian, penerapan teknologi piezoelektrik pada jalan raya masih menghadapi beberapa kendala, seperti fluktuasi tegangan akibat tekanan yang tidak seragam, efisiensi konversi energi yang rendah, dan durabilitas material yang terbatas (Prastyo, 2024). Untuk mengatasi hal ini, sistem tambahan seperti penyearah (*rectifier*), superkapasitor, dan konverter tegangan (*step-up converter*) diperlukan untuk menstabilkan dan menaikkan tegangan keluaran sebelum digunakan (Pasaribu, 2020). Tantangan implementasi di lapangan umumnya meliputi efisiensi yang rendah, ketahanan material, serta kebutuhan integrasi penyimpanan dan pengondisian daya (Zhou et al, 2023). Oleh karena itu, rancangan rangkaian antarmuka daya (mis. penyearah dan pengaturan beban) menjadi aspek penting untuk meningkatkan keluaran yang dapat dimanfaatkan (Zhang et al, 2022).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji rancang bangun sistem pemanfaatan piezoelektrik pada tanggul pengaman jalan (polisi tidur) sebagai pembangkit listrik bagi lampu penerangan jalan. Sistem ini dirancang agar mampu mengubah energi mekanik kendaraan yang melintas menjadi energi listrik yang kemudian disimpan dan digunakan untuk penerangan otomatis menggunakan *photocell sensor*. Secara khusus, tujuan penelitian ini adalah menjelaskan mekanisme konversi energi mekanik kendaraan menjadi energi listrik menggunakan sistem piezoelektrik, menganalisis pengaruh

massa dan kecepatan kendaraan terhadap besar energi listrik yang dihasilkan, menentukan potensi energi yang tersimpan dan dimanfaatkan untuk penerangan jalan.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan teknologi energi alternatif skala mikro (*micro energy harvesting*) yang ramah lingkungan dan ekonomis, sekaligus mendukung program *Smart Green Campus* dan *Smart City* di Indonesia. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan sistem hibrida piezo–surya, sehingga penerangan jalan di kawasan perkotaan maupun pedesaan dapat mandiri tanpa ketergantungan penuh pada pasokan listrik konvensional.

2. KAJIAN TEORITIS

Bagian ini menguraikan teori-teori relevan yang mendasari topik penelitian dan memberikan ulasan tentang beberapa penelitian sebelumnya yang relevan dan memberikan acuan serta landasan bagi penelitian ini dilakukan. Jika ada hipotesis, bisa dinyatakan tidak tersurat dan tidak harus dalam kalimat tanya.

Micro Energy Harvesting

Micro energy harvesting adalah pendekatan pemanfaatan energi lingkungan/energi terbuang (*waste energy*) dalam skala kecil untuk memberi catu daya pada beban berdaya rendah. Pada infrastruktur transportasi, salah satu sumber energi terbuang yang potensial berasal dari beban mekanik berulang akibat kendaraan yang melintas, yang pada umumnya hanya terdisipasi sebagai deformasi dan panas. Dalam konteks ini, teknologi piezoelektrik dapat digunakan untuk mengonversi tekanan/tegangan mekanik tersebut menjadi energi listrik dan dimanfaatkan pada aplikasi seperti sensor nirkabel, sistem monitoring, hingga penerangan hemat daya.

Prinsip Dasar Efek Piezoelektrik

Piezoelektrik adalah material yang menghasilkan muatan/tegangan listrik ketika mengalami tekanan (*direct piezoelectric effect*), dan sebaliknya dapat mengalami deformasi ketika diberi medan listrik (*inverse effect*). Mekanisme ini menjadikan piezoelektrik luas digunakan sebagai sensor, transduser, dan *energy harvester*. Secara konseptual, ketika material piezoelektrik diberi gaya tekan (F), terjadi regangan (*strain*) pada struktur kristalnya yang memunculkan polarisasi listrik sehingga terbentuk beda potensial pada elektroda.

Dalam aplikasi pemanen energi, keluaran piezoelektrik umumnya berupa sinyal AC yang fluktuatif karena pembebanan bersifat dinamis. Besar kecilnya keluaran dipengaruhi oleh karakter material (mis. konstanta piezoelektrik), luas area aktif, ketebalan, serta profil gaya/tekanan yang bekerja (magnitudo, durasi kontak, dan frekuensi pembebanan).

Mekanisme Konversi Energi pada Polisi Tidur (*Speed Bump*)

Polisi tidur merupakan lokasi aplikatif karena secara alami menerima beban dinamis berulang dari kendaraan. Ketika roda kendaraan melintasi polisi tidur, terjadi deformasi pada struktur (mis. karet/komposit) yang mentransfer tekanan ke modul piezoelektrik. Proses konversi dapat diringkas sebagai:

energi mekanik kendaraan → deformasi/tegangan mekanik pada modul → muatan listrik pada piezoelektrik → energi listrik pada rangkaian antarmuka.

Keuntungan pendekatan ini adalah pemanfaatan infrastruktur yang sudah ada dan tidak bergantung cuaca, sehingga cocok untuk konsep pembangkit mikro di area lalu lintas padat.

Model Listrik Setara dan Konfigurasi Rangkaian Piezoelektrik

Secara sederhana, piezoelektrik dapat dimodelkan sebagai sumber arus/tegangan dinamis dengan komponen kapasitif internal. Implikasinya:

- 1) Pada beban tertentu, akan terjadi penyesuaian impedansi (*impedance matching*) untuk memaksimalkan daya yang terserap.
- 2) Keluaran sangat dipengaruhi oleh cara elemen-elemen piezo disusun.

Konfigurasi umum:

- 1) **Seri**: menaikkan tegangan keluaran (cocok bila target sistem membutuhkan level tegangan lebih tinggi).
- 2) **Paralel**: menaikkan arus keluaran (cocok bila dibutuhkan arus lebih besar pada tegangan rendah).
- 3) **Seri-paralel**: kompromi sesuai kebutuhan beban dan karakter tekanan.

Pada penelitian ini, pemilihan rangkaian 25 keping piezoelektrik yang disusun seri ditujukan untuk meningkatkan level tegangan sebelum masuk tahap penyearahan dan penyimpanan.

3. METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan disusun untuk mendukung konsep pemanenan energi piezoelektrik atau *Piezoelectric Energy Harvesting* (PEH). Komponen utama terdiri atas sensor piezoelektrik, penyearah, superkapasitor, *step-up converter*, dan sistem penerangan otomatis berbasis sensor cahaya.

Tabel 1. Alat dan Bahan.

Alat dan Bahan	Jumlah
Multimeter	1 buah
Tang Ampere	1 buah
Step-up converter DC-DC	1 buah
Photocell sensor DC	1 buah
Aki 12 VDC	1 buah
Modul pengujian berupa tanggul pengaman jalan (<i>polisi tidur</i>) bahan karet dimensi $150 \times 35 \times 12$ cm	1 buah
piezoelektrik dengan kapasitas 25-50 nF, diameter 50mm	25 buah
Superkapasitor 2,7 V 500 F	1 buah
Lampu DC 20W	1 buah
Penyearah Jembatan	1 buah

Prosedur Penelitian

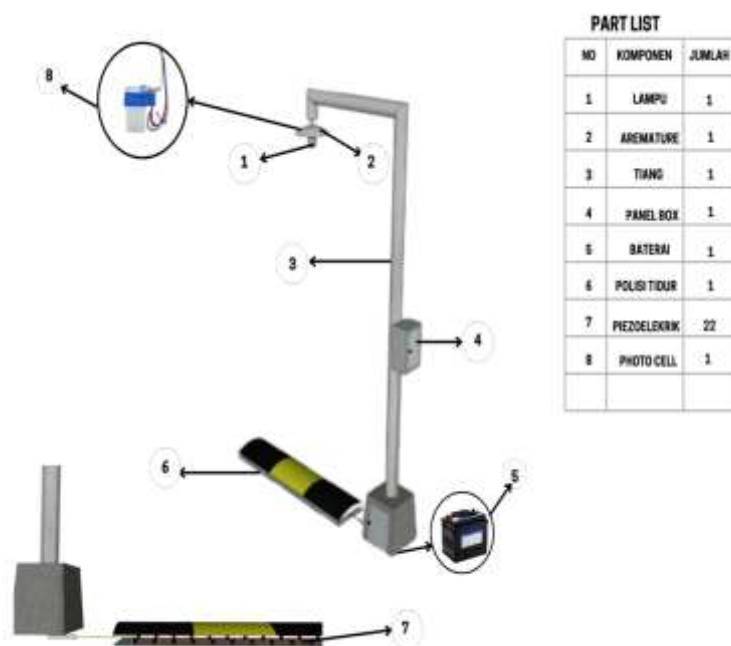
Metode penelitian ini menggunakan pendekatan rancang bangun dan eksperimental yang terdiri atas empat tahap sebagai berikut:

1) Studi Literatur

Tahapan awal dilakukan dengan mengumpulkan referensi terkait prinsip kerja piezoelektrik, desain sistem *energy harvesting*, serta penelitian terdahulu. Literatur yang dikaji menjadi dasar dalam menentukan konfigurasi jumlah dan posisi piezoelektrik pada modul polisi tidur untuk mendapatkan respon tekanan yang optimal.

2) Perancangan Sistem

Desain alat difokuskan pada integrasi 25 sensor piezoelektrik yang dipasang secara seri di bawah modul polisi tidur. Rangkaian seri dipilih untuk meningkatkan tegangan keluaran, sedangkan superkapasitor digunakan untuk menstabilkan energi listrik sebelum dinaikkan tegangannya menggunakan *step-up converter* seperti pada Gambar 1. Energi listrik kemudian digunakan untuk mengisi aki 12 VDC, dan lampu penerangan jalan akan menyala otomatis melalui sensor *photocell*.



Gambar 1. Perancangan pizoelektrik pada polisi tidur.

Persamaan dasar perhitungan energi dan daya yang digunakan adalah sebagai berikut (Hadi et al, 2018) (Sulistiyaniti et al, 2020) :

$$E = P \times t \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

$$P = V \times I \quad (3)$$

Dimana:

P = Daya (Watt)

E = Energi (Joule)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

t = Waktu (s)

3) Pengujian dan Pengambilan Data

Pengujian dilakukan secara bertahap di lapangan menggunakan kendaraan roda dua dengan variasi kecepatan 5 km/jam, 10 km/jam, dan 15 km/jam, serta variasi massa pengendara 48 kg, 70 kg, dan 79 kg. Setiap kombinasi kecepatan dan massa dilakukan minimal sepuluh kali pengujian untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif. Parameter yang diukur meliputi Tegangan keluaran piezoelektrik (V_AC dan V_DC), Arus keluaran (I), Daya output (P), Energi listrik per siklus (W), Energi tersimpan

dalam superkapasitor (E). Semua data direkam menggunakan multimeter digital dan tang ampere. Sinyal tegangan keluaran dari piezoelektrik yang bersifat tidak stabil disearahkan melalui jembatan dioda, kemudian disimpan pada superkapasitor sebelum dinaikkan menggunakan konverter DC–DC. Karakteristik proses pengisian dan efisiensi transport energi dari pemanen piezoelektrik menuju superkapasitor telah dibahas pada studi terkini dan dapat menjadi acuan optimasi desain (Selleri et al, 2023). Oleh karena itu, optimasi rangkaian antarmuka dan penyimpanan energi menjadi aspek penting dalam sistem pemanen energi mikro (Zhou et al, 2023).

4) Analisis Data

Data hasil pengukuran dianalisis menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk menggambarkan hubungan antara kecepatan kendaraan dan massa terhadap energi listrik yang dihasilkan. Grafik hubungan antara kecepatan kendaraan (v) dan energi keluaran (E) diplot untuk mengidentifikasi tren karakteristik sistem [11][12]. Selain itu, dilakukan perbandingan hasil pengujian dengan penelitian terdahulu untuk mengevaluasi efisiensi sistem. Nilai efisiensi konversi (η) dihitung dengan persamaan:

$$\eta = \frac{E_{output}}{E_{mekanik}} \times 100\% \quad (5)$$

dimana $E_{mekanik}$ merupakan energi potensial akibat tekanan kendaraan pada permukaan polisi tidur, yang diperoleh dengan persamaan:

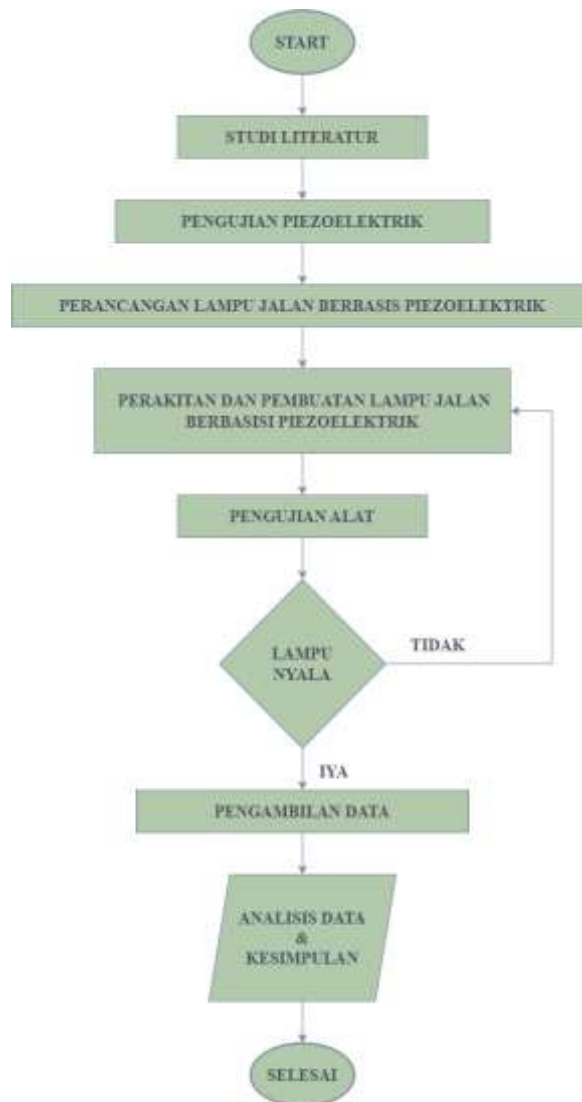
$$E_{mekanik} = m \times g \times h \quad (6)$$

dimana m adalah massa kendaraan (kg), g merupakan percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$), dan h adalah tinggi deformasi polisi tidur akibat beban (m).

Hasil analisis ini dilakukan untuk menilai kelayakan sistem dalam aplikasi lampu jalan skala kecil.

Diagram Alir Penelitian

Bagan alir penelitian disusun untuk menggambarkan tahapan kegiatan secara menyeluruh mulai dari perancangan, pengujian hingga analisis hasil. Tahapan ini meliputi:



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian.

Berdasarkan pendekatan di atas, hasil penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran komprehensif tentang performa sistem piezoelektrik sebagai pembangkit listrik mikro untuk penerangan jalan, serta menjadi dasar bagi pengembangan sistem hibrida piezoelektrik–surya di masa mendatang.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan Pengujian Sistem

Sistem Sistem pemanen energi piezoelektrik yang dirancang terdiri atas 25 unit piezoelektrik berdiameter 50 mm yang dipasang secara seri di bawah modul polisi tidur berbahan karet. Setiap kali kendaraan melintas, tekanan roda menghasilkan deformasi pada lapisan karet yang menekan lempeng piezoelektrik dan menimbulkan potensial listrik (tegangan). Tegangan keluaran AC dari piezoelektrik kemudian disearahkan melalui jembatan

dioda, disimpan sementara dalam superkapasitor 2,7 V 500 F, lalu dinaikkan menggunakan step-up converter hingga mencapai tegangan 12 VDC untuk mengisi aki yang digunakan menyalakan lampu penerangan jalan otomatis [10][15].

Hasil pengujian dilakukan dengan menggunakan kendaraan roda dua dan tiga variasi kecepatan: 5 km/jam, 10 km/jam, dan 15 km/jam. Selain itu, dilakukan variasi massa pengendara sebesar 48 kg, 70 kg, dan 79 kg untuk melihat pengaruh beban terhadap keluaran energi listrik. Pada setiap kecepatan dilakukan pengambilan data sebanyak 10X kemudian hasil pada Tabel 2 merupakan hasil rata-rata dari setiap kecepatan.

Tabel 2. Hasil pengukuran energi listrik berdasarkan kecepatan dan massa pengendara.

Kecepatan (km/jam)	Massa (kg)	Tegangan (V)	Arus (A)	Energi Listrik (J)
5	48	1,32	0,0021	0,005544
10	48	1,87	0,0023	0,008602
15	48	2,06	0,0032	0,013184
5	70	1,46	0,0021	0,006132
10	70	2,37	0,0034	0,016116
15	70	2,56	0,0036	0,018432
5	79	1,28	0,0024	0,006144
10	79	1,85	0,0026	0,00962
15	79	2,33	0,0033	0,015378

Berdasarkan tabel di atas terlihat bahwa semakin besar kecepatan dan massa kendaraan, maka energi listrik yang dihasilkan juga meningkat. Hal ini sesuai dengan teori bahwa gaya tekan yang diterima piezoelektrik berbanding lurus dengan energi mekanik yang diberikan oleh kendaraan [6][11]. Peningkatan massa pengendara juga memengaruhi besarnya energi yang dihasilkan, di mana massa 70 kg menunjukkan kinerja paling optimal dengan energi maksimum mencapai 0,018432 joule pada kecepatan 15 km/jam, sedangkan massa yang terlalu ringan (48 kg) atau terlalu berat (79 kg) menghasilkan energi lebih rendah akibat perbedaan tekanan dan distribusi beban pada permukaan piezoelektrik. Secara umum, sistem menunjukkan bahwa gaya tekan dinamis kendaraan berbanding lurus dengan energi keluaran, dengan rentang energi antara 0,0055 hingga 0,0184 joule per lintasan, sehingga konfigurasi ini memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai sumber *micro energy harvesting* untuk penerangan jalan atau perangkat berdaya rendah lainnya.

Karakteristik Hubungan Kecepatan dan Energi Listrik

Hubungan antara kecepatan kendaraan dan energi listrik yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan hasil pengukuran, terjadi peningkatan energi keluaran secara hampir linear terhadap kecepatan kendaraan.

Secara matematis, hubungan ini dapat digambarkan dengan model linier sederhana:

$$E = k \times v \times c$$

dengan E adalah energi listrik (Joule), v kecepatan kendaraan (km/jam), dan k, c konstanta empiris yang diperoleh dari hasil pengujian.

Nilai energi maksimum sebesar 0,021156 joule diperoleh pada kecepatan 15 km/jam dan massa 70 kg. Hasil ini mendekati nilai yang dilaporkan oleh Afif et al. (2018) yang menunjukkan bahwa konfigurasi 20 piezoelektrik menghasilkan energi sekitar 0,02–0,03 joule per lintasan kendaraan ringan [4]. Meskipun daya yang dihasilkan masih kecil, jika sistem dipasang pada jalan dengan frekuensi kendaraan tinggi (misalnya 1000 kendaraan per jam), maka akumulasi energi dapat mencapai nilai yang signifikan untuk aplikasi lampu hemat energi. Misalnya:

$$E_{total} = 1000 \times 0,021 = 21 \text{ Joule/jam}$$

yang cukup untuk menyalakan beberapa lampu LED 1–2 watt dalam durasi pendek, atau disimpan pada superkapasitor untuk penggunaan malam hari.

Efisiensi Konversi Energi

Untuk mengetahui performa sistem, dihitung efisiensi konversi energi mekanik menjadi energi listrik menggunakan persamaan (5):

$$\eta = \frac{E_{listrik}}{E_{mekanik}} \times 100\%$$

dimana asumsi tinggi deformasi (h) tanggul sebesar 0,015 m. Sebagai contoh, untuk massa 70 kg:

$$E_{mekanik} = 70 \times 9,81 \times 0,015 = 10,30 \text{ Joule}$$

Dengan energi listrik rata-rata 0,021 joule, maka efisiensi konversinya:

$$\eta = \frac{0,021}{10,30} \times 100\% = 0,20\%$$

Nilai ini sejalan dengan laporan Prastyo (2025) yang menemukan efisiensi sistem piezoelektrik pada rentang 0,1–0,3% tergantung tekanan dan konfigurasi material [14]. Walaupun rendah, efisiensi ini masih dapat diterima untuk sistem mikroenergi pasif (*passive micro energy harvesting*) [8][9].

Penyimpanan dan Pemanfaatan Energi

Superkapasitor berfungsi untuk menampung energi sementara dari keluaran piezoelektrik sebelum disalurkan ke beban. Berdasarkan pengukuran, tegangan superkapasitor meningkat dari 0,5 V ke 2,5 V dalam waktu 8 menit dengan frekuensi tekanan 10 siklus/menit. Energi yang tersimpan dihitung menggunakan persamaan (2):

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$
$$E = \frac{1}{2} (500) \cdot (2,5)^2 = 1562,5 \text{ Joule}$$

Nilai tersebut menunjukkan kapasitas maksimum teoretis superkapasitor, meskipun dalam praktik energi aktual yang disimpan lebih rendah karena waktu tekanan yang singkat dan rugi konversi pada penyearah [15].

Setelah tegangan mencapai 12 VDC melalui *step-up converter*, energi digunakan untuk menyalakan lampu LED 12V/20W yang dikendalikan otomatis menggunakan sensor *photocell*. Hasil uji menunjukkan lampu dapat menyala selama 5–6 menit setelah siklus pengisian berulang dilakukan selama 1 jam. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dapat berfungsi sebagai pembangkit energi tambahan (*auxiliary power*) pada area dengan lalu lintas padat.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis terhadap sistem pemanfaatan piezoelektrik pada tanggul pengaman jalan (*polisi tidur*) sebagai sumber energi listrik, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Sistem piezoelektrik mampu mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui efek deformasi akibat tekanan roda kendaraan. Pada konfigurasi 25 piezoelektrik berdiameter 50 mm yang dirangkai seri, dihasilkan tegangan maksimum sekitar 2,6 VDC dan energi sebesar 0,021156 joule pada kecepatan kendaraan 15 km/jam dengan massa pengendara 70 kg.
- 2) Energi yang dihasilkan meningkat seiring bertambahnya kecepatan dan massa kendaraan, dengan hubungan hampir linear antara kecepatan kendaraan dan keluaran energi listrik. Hal ini membuktikan bahwa intensitas tekanan sangat berpengaruh terhadap respons piezoelektrik [11][12].

- 3) Efisiensi konversi energi mekanik ke energi listrik masih rendah, yaitu sekitar 0,20%, namun hasil ini sejalan dengan efisiensi sistem sejenis yang dilaporkan dalam penelitian terdahulu [14]. Efisiensi rendah disebabkan oleh keterbatasan luas kontak piezoelektrik, distribusi tekanan yang tidak merata, serta rugi energi pada penyearah dan *converter*.
- 4) Energi listrik yang dihasilkan dapat disimpan dalam superkapasitor 2,7 V 500 F, lalu dinaikkan menggunakan step-up converter hingga 12 VDC untuk mengisi aki dan menyalakan lampu LED 12V/20W. Sistem penerangan dapat beroperasi secara otomatis dengan bantuan sensor *photocell*.
- 5) Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi piezoelektrik berpotensi menjadi sumber energi alternatif skala mikro (*micro energy harvesting*) untuk penerangan jalan, terutama di lokasi dengan frekuensi kendaraan tinggi dan kebutuhan daya rendah.

Dengan demikian, sistem ini layak dikembangkan sebagai salah satu solusi energi terbarukan berbasis infrastruktur transportasi yang ramah lingkungan dan berkontribusi terhadap penghematan energi listrik konvensional..

DAFTAR REFERENSI

- Afif, A., Setiawan, M., & Hidayat, R. (2018). Analisis material piezoelektrik sebagai pembangkit energi. *Jurnal Energi Terbarukan*, 5(3), 141–148.
- Chen, X., Li, Q., & Zhang, M. (2021). Piezoelectric energy harvesting from road traffic. *Renewable Energy Journal*, 64(3), 101–110.
- Hadi, S., & Suryana, R. (2018). Prinsip kerja dan karakteristik piezoelektrik untuk energi harvesting. *Jurnal Rekayasa Energi*, 4(1), 11–18.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024 (pp. 1–45). Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi.
- Korlantas Polri. (2024). Statistik kendaraan bermotor Provinsi Sulawesi Selatan 2024 (pp. 12–19). Kepolisian Negara Republik Indonesia.
- Maulana, F., & Hidayati, T. (2016). Optimasi posisi tekanan pada piezoelektrik untuk efisiensi daya. *Jurnal Teknik Energi dan Manufaktur*, 6(1), 31–39.
- Pasaribu, J., & Rahardjo, T. (2020). Desain sistem penyimpanan energi superkapasitor untuk pemanenan energi mikro. *Jurnal Teknologi dan Sistem Energi*, 5(1), 18–27.
- Prastyo, R. (2025). Pengaruh tegangan step-up converter pada sistem piezoelektrik jalan. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi* (Vol. 3). Bandung, Indonesia.

- Rahmawati, D., Lestari, N., & Subagio, H. (2021). Konversi energi mekanik ke listrik dengan piezoelektrik. *Jurnal Teknik Elektro*, 9(1), 23–30.
- Rahmawati, D., Santoso, R., & Halimah, A. (2021). Konfigurasi seri-paralel piezoelektrik untuk peningkatan tegangan output. *Jurnal Konversi Energi dan Sistem Tenaga*, 10(2), 76–84.
- Sari, D., & Matsumoto, K. (2021). Aplikasi piezoelektrik di Stasiun Tokyo sebagai energi alternatif. *Renewable Energy Review*, 11(2), 89–97.
- Sidiq, A., & Amrullah, H. (2021). Pemanfaatan polisi tidur sebagai penghasil energi listrik berbasis piezoelektrik. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Terapan* (Vol. 4). Makassar, Indonesia.
- Song, G. J., Kim, K.-B., Cho, J. Y., Woo, M. S., Ahn, J. H., Eom, J. H., & Jeong, W. (2019). Performance of a speed bump piezoelectric energy harvester for an automatic cellphone charging system. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.040>
- Sulistiyanti, S. R., & Putra, A. N. (2020). Analisis sensor piezoelektrik sebagai pembangkit mikro energi. *Jurnal Energi Terapan Indonesia*, 7(2), 65–72.
- Suryadi, H., & Nurcahyani, R. (2020). Potensi energi baru dan terbarukan di Indonesia. *Jurnal Energi Alternatif*, 8(2), 55–63.
- Wong, Y. (2023). *Piezoelectric materials and smart infrastructure applications* (2nd ed., pp. 55–72). Springer Nature.
- Yang, H., Wang, L., Zhou, B., Wei, Y., & Zhao, Q. (2018). A preliminary study on the highway piezoelectric power supply system. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(2), 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.08.006>
- Zhang, Y., Wang, L., Li, X., & Chen, Z. (2022). Circuit techniques for high efficiency piezoelectric energy harvesting. *Micromachines*, 13(7), 1044. <https://doi.org/10.3390/mi13071044>
- Zhao, B., Zhang, X., & Xu, T.-B. (2025). Charging process behaviors and energy transportation efficiencies from a piezoelectric energy harvester to a super-capacitor. *Journal of Energy Storage*, 110, 115236. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115236>