

Pengaruh Jumlah Sudu dan Kecepatan Angin Terhadap Daya yang Dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Angin Berbasis Piezoelektrik dengan Kantilever

Allifa Nissa Sabilla¹, Adhes Gamayel^{1,*}, M. Zaenudin¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Global Jakarta, Jl. Boulevard Raya No. 2, Tirtajaya, Sukmajaya, Depok 16412, Indonesia

Article Info

Article history:

Received November, 21st, 2025

Revised November 24th, 2025

Accepted November 24th, 2025

Section:

Article

Keywords:

Pemanen energi piezoelektrik

Pemanen energi angin

Variasi jumlah sudu

Frekuensi getaran

Konversi energi mikro

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi jumlah sudu kincir angin terhadap kinerja pemanen energi piezoelektrik (PEH) dalam sistem konversi energi angin skala mikro. Metode penelitian mengikuti pendekatan eksperimen langsung dengan memasang kincir angin mini berporos pada stand statis, di mana elemen piezoelektrik dilengkapi sirip dan ditempatkan pada jarak 10 cm dari bluff body dengan sudut inlet 40°. Tiga konfigurasi jumlah sudu (3, 4, dan 5) diuji pada kecepatan angin tetap 8 m/s. Pengukuran tegangan listrik dan frekuensi respons dilakukan menggunakan sistem akuisisi data DATAQ selama 60 detik dengan laju sampling 100 data per detik. Hasil menunjukkan bahwa tegangan listrik maksimum sebesar 0,048 V dan frekuensi tertinggi 25,9 Hz diperoleh pada konfigurasi kincir dengan 5 sudu. Analisis lebih lanjut mengungkap bahwa variasi jumlah sudu tidak berpengaruh signifikan terhadap besarnya tegangan keluaran, namun berpengaruh terhadap frekuensi getaran yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh peningkatan frekuensi tumbukan antara sirip dan elemen piezoelektrik akibat penambahan jumlah sudu, yang memperbesar area kontak dan memicu lendutan berulang lebih sering. Hasil penelitian ini memberikan wawasan bahwa desain turbin dengan jumlah sudu yang optimal dapat meningkatkan stabilitas frekuensi osilasi pada sistem PEH, meskipun tidak secara langsung meningkatkan keluaran tegangan.

*Corresponding Author:

Adhes Gamayel

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Global Jakarta, Jl. Boulevard Raya No. 2, Tirtajaya, Sukmajaya, Depok 16412, Indonesia

Email: adhes@jgu.ac.id

DOI: 10.56904/imejour.v3i2.151

1. PENDAHULUAN

Energi merupakan fondasi utama dalam mendorong kemajuan teknologi di berbagai sektor strategis, seperti manufaktur, pertahanan nasional, kesehatan, eksplorasi luar angkasa, dan pertanian [1]. Ketersediaan pasokan energi yang andal dan berkelanjutan menjadi prasyarat bagi kelangsungan dan efisiensi operasional industri modern. Dalam konteks transisi energi global, pemanfaatan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan semakin menjadi fokus utama riset dan inovasi teknologi. Salah satu pendekatan yang berkembang pesat dalam pemanfaatan energi terbarukan adalah *energy harvesting* (pemanenan energi), yaitu proses konversi energi dari sumber ambient, seperti getaran mekanis, gerakan tubuh, gelombang laut, angin, dan aliran fluida, menjadi energi listrik yang dapat digunakan [2,3]. Di antara berbagai sumber tersebut, energi angin menarik perhatian khusus karena sifatnya yang bersih, terbarukan, dan melimpah. Lebih lanjut, aliran angin dapat menginduksi getaran

mekanis yang dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui berbagai mekanisme transduksi, termasuk triboelektrik, elektrostatik, elektromagnetik, dan piezoelektrik [4,5].

Di antara metode tersebut, pemanen energi piezoelektrik (*Piezoelectric Energy Harvester*, PEH) menawarkan keunggulan berupa densitas daya yang relatif tinggi, struktur yang kokoh, serta kemampuan menghasilkan listrik dari deformasi mekanis skala kecil, menjadikannya ideal untuk menyalakan perangkat elektronik berdaya rendah [6]. Konfigurasi kantilever merupakan arsitektur umum dalam desain PEH, karena respons getaran yang sensitif terhadap eksitasi eksternal searah. Sejumlah studi telah mengeksplorasi peningkatan kinerja PEH berbasis kantilever melalui modifikasi geometri, penambahan massa inertial, atau integrasi dengan struktur aerodinamis seperti *bluff body*. Sebagai contoh, pengembangan PEH kantilever dengan ujung silinder yang berfungsi sebagai pendulum, menunjukkan bahwa panjang balok elastis, massa ujung, dan kecepatan angin secara signifikan memengaruhi keluaran daya [7]. Dalam laporan penelitian, juga diperkenalkan konfigurasi galloping dengan *bluff body* tambahan, berhasil menghasilkan tegangan 5-12 V pada kecepatan angin 6 m/s, bahkan tegangan yang dihasilkan hingga mencapai 4,5 V pada kecepatan 9 m/s menggunakan *bluff body* berbentuk-D [8,9].

Pemanfaatan material piezoelektrik sebagai sumber energi listrik telah menjadi fokus berbagai penelitian dalam dekade terakhir, terutama dalam upaya mengembangkan solusi berkelanjutan untuk kebutuhan energi yang terus meningkat. Yulia dkk. [10] memperkirakan bahwa permintaan energi listrik di Indonesia akan meningkat rata-rata 8,3% per tahun, sehingga berpotensi menjadikan Indonesia sebagai negara pengimpor energi pada tahun 2033 jika tidak ada diversifikasi sumber energi. Sebagai respons, mereka mengusulkan pemanfaatan *waste vibration energy* dari lalu lintas kendaraan melalui instalasi “polisi tidur piezoelektrik”. Dalam eksperimennya, sistem tersebut mampu menghasilkan energi sebesar 2,611 mWh dari 60 kali lintasan kendaraan, dengan efisiensi konversi sekitar 2,87% dibandingkan dengan input manual.

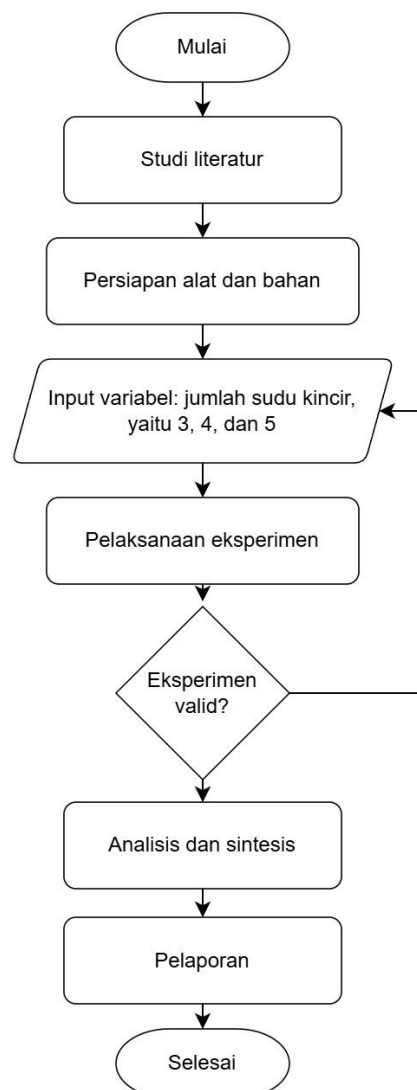
Pendekatan serupa juga dikembangkan oleh Mowaviq dkk. [11] yang merancang lantai pemanen energi berbasis piezoelektrik untuk menangkap energi mekanis dari langkah kaki. Studi tersebut menunjukkan bahwa meskipun daya yang dihasilkan dari satu elemen sangat rendah akibat tekanan terbatas, penggabungan beberapa elemen piezoelektrik secara paralel mampu meningkatkan total daya keluaran. Namun, penulis menekankan bahwa untuk mengisi baterai ponsel secara signifikan, sistem harus dipasang di lokasi dengan intensitas pejalan kaki tinggi, seperti stasiun kereta api atau pusat perbelanjaan. Pada penelitian yang lain, Ratih dkk. [12] mengusulkan solusi portabel berupa *powerbank* piezoelektrik yang dioperasikan secara manual melalui tekanan tangan. Inovasi ini ditujukan untuk mengatasi keterbatasan akses listrik dan daya tahan baterai ponsel yang cepat habis, terutama selama aktivitas luar ruangan. Meskipun demikian, ketergantungan pada input mekanis manual dan efisiensi konversi yang masih rendah menjadi tantangan utama penerapan praktisnya. Kemajuan dalam arsitektur perangkat piezoelektrik juga dilaporkan oleh Rahmawati dkk. [13] melalui pengembangan lantai pembangkit listrik berbasis konfigurasi *lanced cantilever*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa tegangan keluaran dapat dioptimalkan melalui konfigurasi rangkaian: elemen tunggal menghasilkan 1,76 V, rangkaian seri menghasilkan rata-rata 1,55 V, sedangkan rangkaian paralel mencapai 3,99 V. Setelah melalui proses penyearahan dan penyimpanan pada kapasitor, tegangan rata-rata mencapai 5,24 V. Namun, terjadi penurunan tegangan (*voltage drop*) yang signifikan ketika dihubungkan ke modul konverter, dengan modul XL6009 menunjukkan performa terbaik (rata-rata tegangan keluaran 0,15 V dan arus 54,6 μ A).

Namun demikian, sebagian besar konfigurasi tersebut masih menghadapi tantangan utama: ketidakstabilan respons getaran akibat fluktuasi kecepatan angin. Variabilitas aliran angin menyebabkan osilasi yang tidak konsisten, sehingga mengurangi efisiensi konversi energi dan keandalan keluaran listrik. Stabilitas getaran, yang tercermin dalam pola defleksi kantilever yang terprediksi dan berulang, merupakan faktor kritis dalam optimasi kinerja PEH. Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan baru dalam menghasilkan getaran yang lebih stabil melalui mekanisme tumbukan terkontrol antara bilah turbin angin dan elemen PEH. Dalam sistem ini, putaran roda yang digerakkan angin menyebabkan benturan periodik antara sudu turbin dan struktur kantilever piezoelektrik, menghasilkan deformasi mekanis yang dapat dipanen. Jumlah bilah turbin dipandang sebagai parameter kunci yang memengaruhi frekuensi dan keteraturan tumbukan,

sehingga berpotensi meningkatkan stabilitas osilasi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan secara umum untuk membuktikan konsep kestabilan getaran dalam sistem kantilever PEH berbasis defleksi yang teratur akibat tumbukan mekanis dari turbin angin. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah bilah turbin terhadap besarnya tegangan listrik dan lendutan mekanis yang dihasilkan oleh PEH.

2. METODE

Penelitian ini dilaksanakan melalui pendekatan eksperimen langsung (*experimental research*) untuk mengevaluasi pengaruh variasi jumlah sudu kincir angin terhadap kinerja pemanen energi piezoelektrik (PEH) dalam sistem konversi energi angin skala mikro. Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Prototipe eksperimen dirancang dengan memasang poros (*shaft*) kincir angin mini pada sebuah *stand* tetap. Elemen piezoelektrik berbahan *Lead Zirconate Titanate* (PZT) berbentuk persegi panjang (60 mm × 60 mm) dilengkapi sirip berukuran identik (rasio lebar sirip terhadap piezoelektrik = 1:1) dan diposisikan pada jarak 10 cm di hilir *bluff body*. Sistem tersebut diatur sedemikian rupa sehingga aliran angin memasuki terowongan dengan sudut inlet tetap sebesar 40°.

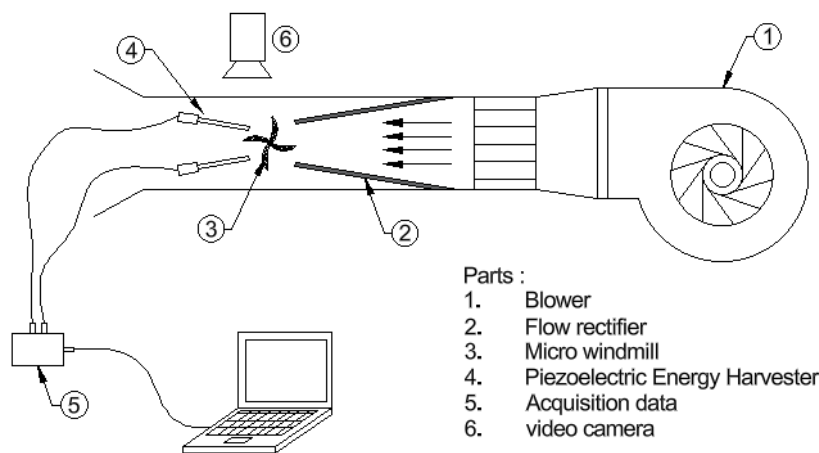


Gambar 1. Diagram alir penelitian.

Tiga variasi konfigurasi kincir angin sumbu horizontal digunakan sebagai perlakuan, yaitu dengan jumlah sudu 3, 4, dan 5. Seluruh kincir terbuat dari bahan plastik *polypropylene* (PP) untuk memastikan konsistensi sifat mekanis dan massa. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jumlah

sudu kincir angin, sedangkan variabel terikat meliputi tegangan listrik keluaran, frekuensi getaran, dan kuat arus yang dihasilkan oleh elemen piezoelektrik. Variabel terkontrol mencakup: (1) rasio geometri sirip–piezoelektrik (1:1), dan (2) sudut inlet aliran angin (40°), yang dipertahankan konstan selama seluruh pengujian.

Eksperimen dilakukan di dalam terowongan angin yang dilengkapi *blower* AC 220 V berukuran 12 inci untuk menghasilkan aliran udara terkendali, sebagaimana terlihat pada Gambar 2. Sebelum pengujian, kecepatan dan arah aliran angin diukur menggunakan *anemometer* untuk memastikan bahwa elemen piezoelektrik ditempatkan pada zona dengan kecepatan aliran maksimum. Pengukuran respons listrik dilakukan menggunakan sistem akuisisi data *DATAQ DI-245*, yang terhubung ke perangkat lunak komputer untuk merekam data secara real-time. Setiap pengujian berlangsung selama 60 detik dengan laju sampling 100 data per detik. Data mentah kemudian diekspor ke *Microsoft Excel* untuk diproses lebih lanjut, termasuk analisis statistik dan visualisasi dalam bentuk grafik.



Gambar 2. Skema dan bagian-bagian peralatan penelitian.

Sebagai validasi tambahan, pengukuran tegangan dan arus listrik juga dilakukan menggunakan *multitester digital*. Pendekatan ini memastikan akurasi pengukuran dan konsistensi hasil antar pengujian. Dengan desain eksperimen yang terkontrol dan instrumen yang terkalibrasi, penelitian ini bertujuan untuk memberikan data empiris yang andal mengenai hubungan antara desain turbin angin mini dan kinerja pemanen energi berbasis piezoelektrik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Pengujian Pada Kecepatan Angin 6 m/s

Data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 1. Data tersebut menunjukkan bahwa variasi jumlah sudu kincir angin mini, yaitu 3, 4, dan 5 sudu, tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap magnitude tegangan listrik yang dihasilkan oleh elemen piezoelektrik pada kondisi operasional yang terkontrol (kecepatan angin 6 m/s, sudut inlet 40° , dan lebar sirip 60 mm). Tegangan puncak tertinggi sebesar 0,0250 V diperoleh baik pada konfigurasi 3 maupun 5 sudu, sedangkan konfigurasi 4 sudu menghasilkan tegangan lebih rendah, yaitu 0,0097 V. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan jumlah sudu tidak secara linier meningkatkan keluaran tegangan, yang bertentangan dengan asumsi intuitif bahwa lebih banyak sudu akan menghasilkan lebih banyak energi mekanis. Namun, hal yang berbeda teramati pada respons frekuensi sistem. Frekuensi getaran tertinggi dicatat pada konfigurasi kincir dengan 5 sudu (13,5 Hz), diikuti oleh 4 sudu (12,5 Hz), dan terendah pada 3 sudu (9,999 Hz). Pola ini menunjukkan bahwa jumlah sudu memiliki pengaruh langsung terhadap frekuensi tumbukan antara bilah kincir dan sirip piezoelektrik. Semakin banyak sudu, semakin sering terjadi interaksi mekanis dalam satu putaran penuh, sehingga menghasilkan osilasi berulang dengan frekuensi lebih tinggi. Mekanisme ini konsisten dengan prinsip dasar pemanenan energi berbasis

getaran, di mana frekuensi eksitasi mekanis merupakan faktor kritis dalam menentukan respons dinamis elemen piezoelektrik.

Tabel 1. Data hasil pengujian dengan menggunakan kecepatan angin 6 m/s, sudut sudu 40°, dan ukuran sirip 60 mm.

No.	Jumlah Sudu	Tegangan PZT (V)	Frekuensi (Hz)	RPM
1	3	0.0250	9.99	847.5
2	4	0.0097	12.5	747.3
3	5	0.0250	13.5	743.6

Meskipun demikian, kenaikan frekuensi tidak selalu diikuti oleh peningkatan tegangan. Hal ini dapat dijelaskan melalui karakteristik fisik sistem: tegangan listrik yang dihasilkan oleh material piezoelektrik bergantung pada besarnya deformasi (lendutan) dan laju perubahan regangan (*strain rate*), bukan hanya frekuensi getaran. Pada kecepatan angin tetap, penambahan jumlah sudu mengurangi jarak sudut antar bilah, sehingga waktu kontak dan durasi tumbukan per siklus mungkin menjadi lebih singkat. Akibatnya, meskipun frekuensi meningkat, amplitudo lendutan sirip, yang menjadi sumber utama regangan pada piezoelektrik, tidak mengalami peningkatan signifikan, bahkan berpotensi menurun akibat durasi impuls mekanis yang lebih pendek. Inilah yang menjelaskan mengapa tegangan maksimum pada konfigurasi 5 sudu tidak lebih tinggi daripada konfigurasi 3 sudu.

b. Pengujian pada Kecepatan Angin 7 m/s

Pada kecepatan angin 7 m/s, sebagaimana hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2, respons sistem pemanenan energi menunjukkan pola yang berbeda dibandingkan dengan pengujian pada kecepatan 6 m/s. Tegangan listrik maksimum tertinggi tercatat sebesar 0,047 V pada konfigurasi kincir angin dengan 4 sudu, sedangkan konfigurasi 5 sudu menghasilkan 0,023 V, dan konfigurasi 3 sudu hanya menghasilkan 0,0013 V. Temuan ini menunjukkan bahwa pada kecepatan angin yang lebih tinggi, jumlah sudu kincir mulai memengaruhi keluaran tegangan, dengan konfigurasi 4 sudu memberikan performa paling optimal dalam kondisi eksperimen ini. Di sisi lain, frekuensi getaran menunjukkan peningkatan konsisten seiring dengan penambahan jumlah sudu, yaitu 16,66 Hz untuk 3 dan 4 sudu, serta 17,67 Hz untuk 5 sudu. Peningkatan frekuensi ini konsisten dengan mekanisme operasi sistem, di mana setiap putaran kincir menghasilkan sejumlah tumbukan antara bilah dan sirip piezoelektrik. Semakin banyak sudu, semakin tinggi jumlah tumbukan per satuan waktu, sehingga frekuensi osilasi mekanis meningkat. Hal ini memperkuat hipotesis bahwa frekuensi respons sistem sangat dipengaruhi oleh interaksi antara jumlah sudu dan kecepatan rotasi kincir, yang pada gilirannya ditentukan oleh kecepatan aliran angin.

Tabel 2. Data hasil pengujian dengan menggunakan kecepatan angin 7 m/s, sudut sudu 40°, dan ukuran sirip 60 mm.

No.	Jumlah Sudu	Tegangan PZT (V)	Frekuensi (Hz)	RPM
1	3	0.012	16.6	548.2
2	4	0.047	16.6	812.8
3	5	0.023	17.6	692.8

Perbandingan antara hasil pada kecepatan 6 m/s dan 7 m/s mengungkap pengaruh dominan kecepatan angin terhadap keluaran tegangan. Tegangan maksimum pada kecepatan 6 m/s hanya mencapai 0,025 V, sedangkan pada 7 m/s naik hampir dua kali lipat menjadi 0,047–0,048 V. Peningkatan ini selaras dengan prinsip dasar konversi energi angin, di mana energi kinetik angin berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan aliran. Dengan demikian, peningkatan kecepatan angin tidak hanya mempercepat rotasi kincir, tetapi juga meningkatkan gaya tumbukan terhadap sirip, sehingga menghasilkan deformasi piezoelektrik yang lebih besar dan tegangan keluaran yang lebih tinggi.

c. Pengujian pada Kecepatan Angin 8 m/s

Pada kecepatan angin 8 m/s, sistem pemanenan energi piezoelektrik menunjukkan peningkatan signifikan dalam respons listrik dibandingkan dengan pengujian pada kecepatan yang lebih rendah, sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 3. Tegangan listrik maksimum tertinggi sebesar 0,048 V berhasil dicapai pada konfigurasi kincir angin dengan 5 sudu, disertai frekuensi getaran tertinggi yaitu 25,9 Hz. Konfigurasi 3 sudu menghasilkan tegangan 0,029 V pada frekuensi 24,9 Hz, sedangkan konfigurasi 4 sudu memberikan tegangan lebih rendah (0,015 V) meskipun frekuensinya hampir setara (25 Hz). Temuan ini menunjukkan bahwa pada kecepatan angin yang lebih tinggi, interaksi antara jumlah sudu dan dinamika tumbukan mulai menentukan efisiensi konversi energi secara lebih jelas.

Tabel 3. Data hasil pengujian dengan menggunakan kecepatan angin 8 m/s, sudut sudu 40°, dan ukuran sirip 60 mm.

No.	Jumlah Sudu	Tegangan PZT (V)	Frekuensi (Hz)	RPM
1	3	0.029	24.9	641.3
2	4	0.015	25	778.8
3	5	0.048	25.9	783.1

Hasil ini mengonfirmasi bahwa kecepatan angin merupakan faktor dominan dalam menentukan magnitudo tegangan keluaran. Peningkatan kecepatan dari 6 m/s ke 8 m/s tidak hanya mempercepat rotasi kincir, tetapi juga memperbesar energi kinetik yang ditransfer ke sirip melalui tumbukan mekanis. Akibatnya, deformasi pada elemen piezoelektrik meningkat, sehingga menghasilkan tegangan listrik yang lebih tinggi. Hal ini selaras dengan hukum dasar konversi energi mekanik-ke-listrik pada material piezoelektrik, di mana tegangan keluaran berbanding lurus dengan laju dan besarnya regangan yang diinduksi. Di sisi lain, peningkatan jumlah sudu kincir, khususnya hingga 5 sudu, terbukti efektif dalam meningkatkan frekuensi getaran sistem. Frekuensi tertinggi (25,9 Hz) teramati pada konfigurasi 5 sudu, yang menunjukkan bahwa semakin banyak bilah kincir, semakin sering terjadi interaksi mekanis antara sudu dan sirip dalam satu satuan waktu. Frekuensi tinggi ini penting karena menentukan laju osilasi sistem, yang berpotensi mendekati atau bahkan menyamai frekuensi resonansi elemen kantilever piezoelektrik, kondisi ideal untuk memaksimalkan daya yang dihasilkan oleh pemanen energi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa tegangan listrik maksimum sebesar 0,048 V dan frekuensi tertinggi 25,9 Hz diperoleh pada konfigurasi kincir angin dengan 5 sudu pada kecepatan angin 8 m/s, menunjukkan bahwa kecepatan angin dan jumlah sudu berpengaruh signifikan terhadap kinerja sistem, meskipun jumlah sudu tidak secara langsung meningkatkan tegangan melainkan memperbesar frekuensi getaran akibat peningkatan jumlah tumbukan antara sudu dan sirip piezoelektrik. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan melakukan modifikasi desain terowongan angin agar aliran angin lebih terfokus dan efisien dalam memutar kincir, serta menguji berbagai jenis dan bahan piezoelektrik guna mengidentifikasi material yang memberikan respons listrik optimal dalam kondisi operasional serupa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada Universitas Global Jakarta atas dukungannya selama penyelesaian penelitian ini.

REFERENCES

- [1] M. H. Hasan, T. M. I. Mahlia, and H. Nur, "A review on energy scenario and sustainable energy in Indonesia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 2316–2328, May 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.12.007.
- [2] W. Yang and S. Towfighian, "A hybrid nonlinear vibration energy harvester," *Mechanical Systems and*

- Signal Processing, vol. 90, pp. 317–333, June 2017, doi: 10.1016/j.ymssp.2016.12.032.
- [3] X. Ma and S. Zhou, “A review of flow-induced vibration energy harvesters,” *Energy Conversion and Management*, vol. 254, p. 115223, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115223.
 - [4] Q. Wen, X. He, Z. Lu, R. Streiter, and T. Otto, “A comprehensive review of miniaturized wind energy harvesters,” *Nano Materials Science*, vol. 3, no. 2, pp. 170–185, June 2021, doi: 10.1016/j.nanoms.2021.04.001.
 - [5] A. Truitt and S. N. Mahmoodi, “A review on active wind energy harvesting designs,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 14, no. 9, pp. 1667–1675, Sept. 2013, doi: 10.1007/s12541-013-0226-4.
 - [6] S. Ju and C.-H. Ji, “Impact-based piezoelectric vibration energy harvester,” *Applied Energy*, vol. 214, pp. 139–151, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.01.076.
 - [7] Q. Xu, A. Gao, Y. Li, and Y. Jin, “Design and Optimization of Piezoelectric Cantilever Beam Vibration Energy Harvester,” *Micromachines*, vol. 13, no. 5, p. 675, Apr. 2022, doi: 10.3390/mi13050675.
 - [8] I. Mehdipour, F. Madaro, F. Rizzi, and M. De Vittorio, “Comprehensive experimental study on bluff body shapes for vortex-induced vibration piezoelectric energy harvesting mechanisms,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 13, p. 100174, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100174.
 - [9] W. Du, L. Liang, Z. Zhou, W. Qin, H. Huang, and D. Cao, “Enhancing piezoelectric energy harvesting from the flow-induced vibration of an apple-shaped bluff body based on topology optimization,” *Energy*, vol. 307, p. 132667, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.132667.
 - [10] E. Yulia, E. Permana Putra, E. Ekawati, and N. Nugraha, “Polisi Tidur Piezoelektrik Sebagai Pembangkit Listrik dengan Memanfaatkan Energi Mekanik Kendaraan Bermotor,” *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 8, no. 1, p. 105, Oct. 2016, doi: 10.5614/joki.2016.8.1.9.
 - [11] M. I. Mowaviq, A. Junaidi, and S. Purwanto, “LANTAI PERMANEN ENERGI LISTRIK MENGGUNAKAN PIEZOELEKTRIK,” *energi*, vol. 10, no. 2, pp. 112–118, Jan. 2019, doi: 10.33322/energi.v10i2.219.
 - [12] R. M. Ratih, M. I. Yasyak, H. Nugroha, and U. Fadlilah, “Powerbank Piezoelektrik menggunakan Tekanan Tangan,” *emitor*, vol. 20, no. 1, pp. 47–51, Nov. 2019, doi: 10.23917/emitor.v20i1.8597.
 - [13] D. Rahmawati, M. Ulum, M. Farisal, and K. Joni, “Lantai Pembangkit Listrik Menggunakan Piezoelektrik dengan Buck Converter LM2596,” *JAEL*, vol. 7, no. 3, p. 84, Dec. 2021, doi: 10.19184/jaei.v7i3.28128.



Integrated Mechanical Engineering Journal (IMEJOUR) is licensed under a [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).