

Analisis Pengaruh Intensitas dan Ukuran Tetesan Hujan terhadap Kinerja Piezoelektrik pada Pemanfaatan Curah Hujan menjadi Energi Listrik

M. Ravi Cahya Firdaus, Rifky

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Informatika, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka, Jl. Tanah Merdeka No.6 RT 10/ RW 5 Rambutan, Kecamatan Ciracas Kota Jakarta Timur, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 13830.

Email: Arvianarta17@gmail.com , rifky@uhamka.ac.id

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi mendorong pengembangan sumber energi terbarukan, namun pemanfaatan energi hujan di Indonesia masih terbatas. Studi literatur ini meninjau pengaruh intensitas curah hujan dan ukuran tetesan air terhadap keluaran listrik piezoelektrik berbahan polikarbonat. Variasi intensitas ditetapkan pada kurang dari 5 mm/jam (hujan ringan), 5 - 20 mm/jam (hujan sedang) dan 20 - 50 mm/jam (hujan lebat), dengan ukuran tetesan 2,5 mm, 5 mm, dan 7,5 mm. Metode eksperimen pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan perbedaan intensitas curah hujan dan ukuran tetesan air hujan yang jatuh pada atap telah terpasang piezoelektrik. Data mentah yang diukur adalah tegangan dan arus listrik. Hasil pengolahan data berupa kinerja piezoelektrik, yaitu daya listrik dan efisiensi. Tinjauan terhadap variasi intensitas curah hujan dan ukuran tetesan air hujan menunjukkan adanya hubungan antara energi kinetik tetesan dan tegangan keluaran piezoelektrik.

Kata Kunci: Piezoelektrik, Intensitas Curah Hujan, Ukuran Tetes Hujan, Kinerja, Listrik.

Abstract

The increasing demand for energy encourages the development of renewable energy sources, but the utilization of rain energy in Indonesia is still limited. This literature study examines the effect of rainfall intensity and water droplet size on the electrical output of polycarbonate piezoelectrics. The intensity variation is set at less than 5 mm/hour (light rain), 5-20 mm/hour (moderate rain) and 20-50 mm/hour (heavy rain), with droplet sizes of 2.5 mm, 5 mm, and 7.5 mm. The experimental method in this study was carried out by comparing the differences in rainfall intensity and the size of raindrops that fell on the roof that had been installed with a piezoelectric. The raw data measured were voltage and electric current. The results of data processing are in the form of piezoelectric performance, namely electrical power and efficiency. A review of the variations in rainfall intensity and raindrop size shows a relationship between the kinetic energy of the droplets and the piezoelectric output voltage.

Keywords: Renewable energy, Piezoelectric, Energy Conversion, Rain Intensity.

1. PENDAHULUAN

Permintaan energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan populasi dan pesatnya perkembangan teknologi. Ketergantungan terhadap sumber energi fosil seperti batu bara dan minyak bumi masih mendominasi,

padahal sumber tersebut tidak dapat diperbarui dan menjadi penyebab emisi karbon di atmosfer. Oleh karena itu, diperlukan terobosan baru dalam pemanfaatan energi terbarukan yang mudah dijangkau dan ramah lingkungan. Salah satu potensi energi alam yang menarik untuk dikembangkan adalah energi yang berasal dari curah hujan. Indonesia sebagai negara tropis memiliki tingkat

curah hujan yang tinggi hampir sepanjang tahun, namun potensi tersebut belum dimaksimalkan sebagai sumber energi alternatif. Energi kinetik yang dihasilkan oleh tetesan hujan dapat diubah menjadi energi listrik menggunakan material piezoelektrik, yaitu material yang mampu menghasilkan potensial listrik lain saat menerima tekanan mekanik atau getaran. Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui pengaruh intensitas hujan dan ukuran tetesan air hujan terhadap kinerja piezoelektrik berbasis dasar polikarbonat. Kedua variabel tersebut berperan penting karena menentukan besarnya energi kinetik yang terbentuk ketika tetesan [1] udara mengenai permukaan piezoelektrik. Semakin besar ukuran tetesan serta semakin tinggi intensitas hujan, maka semakin besar pula energi benturan yang dihasilkan. Beberapa penelitian sebelumnya telah menampilkan hubungan tersebut. Penelitian menemukan bahwa sensor piezoelektrik mampu menghasilkan tegangan hingga 1,2 V pada kondisi hujan deras, meskipun daya keluaran yang diperoleh masih relatif kecil. Sementara itu, melaporkan bahwa peningkatan ukuran tetesan udara dari 2.5 mm menjadi 7 mm dapat meningkatkan tegangan hingga 40 % dibandingkan dengan tetesan berukuran kecil [1].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini tidak hanya menganalisis pengaruh intensitas curah hujan dan ukuran tetesan terhadap keluaran listrik piezoelektrik, tetapi juga mengevaluasi efisiensi konversi energi dari energi kinetik tetesan menjadi energi listrik. Selain itu, penelitian ini mempertimbangkan pengaruh desain struktural piezoelektrik, seperti bentuk geometri dan kondisi permukaan penangkap hujan, guna memahami konfigurasi yang paling optimal dalam memanen energi hujan. Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan sistem mikro-energi berbasis curah hujan yang sesuai dengan kondisi iklim tropis di Indonesia.

2. PEMANEN ENERGI PIEZOELEKTRIK DARI TETESAN HUJAN

Efek piezoelektrik merupakan fenomena fisik di mana suatu material menghasilkan tegangan listrik ketika mendapat tekanan atau regangan mekanik. Proses ini terjadi karena pergeseran momen dipol di dalam struktur kristal material sehingga

menimbulkan beda potensial di antara elektroda. Dalam sistem pemanenan energi, efek ini disebut sebagai direct piezoelectric effect, yakni perubahan energi mekanik menjadi energi listrik secara langsung. Material yang sering digunakan antara lain Lead Zirconate Titanate (PZT) dan Polyvinylidene Fluoride (PVDF). PZT memiliki sensitivitas tinggi dan menghasilkan tegangan besar, namun bersifat rapuh sehingga kurang ideal untuk penggunaan di luar ruangan. Sebaliknya, PVDF menawarkan fleksibilitas tinggi dan ketahanan terhadap cuaca, membuatnya lebih cocok untuk aplikasi dinamis seperti penangkapan energi dari hujan [1].

Penelitian menunjukkan bahwa proses peregangan (stretching) dan perlakuan termal dapat meningkatkan fraksi fase β pada PVDF, yaitu fase yang memiliki sifat piezoelektrik aktif. Peningkatan fase ini berbanding lurus dengan kenaikan koefisien piezoelektrik, sehingga kemampuan material dalam mengkonversi regangan menjadi tegangan listrik menjadi lebih tinggi. Nilai yang dihasilkan dari proses optimal mencapai sekitar $-26,5$ pm/V, membuktikan bahwa pengaturan struktur mikro material dapat meningkatkan efisiensi konversi energi [1].

Selain karakteristik material, bentuk geometrik dari sensor piezo juga berperan besar terhadap performa sistem. Struktur seperti cantilever beam, disk, atau lembaran fleksibel mampu menangkap gaya tumbukan dengan pola deformasi yang berbeda. Ketika tetesan hujan mengenai permukaan piezo, terjadi getaran dan lenturan yang menyebabkan pergeseran muatan internal. Muatan inilah yang kemudian dikumpulkan dan diubah menjadi energi listrik yang dapat digunakan [1].

Mekanisme konversi energi kinetik hujan menjadi energi listrik setiap tetesan hujan membawa energi kinetik yang besarnya ditentukan oleh massa dan kecepatan, pada saat tetesan tersebut mengenai permukaan piezoelektrik, sebagian energi tersebut menyebabkan penurunan elastis pada struktur, yang kemudian diubah menjadi energi listrik melalui mekanisme piezoelektrik Piezoelectric Energy Harvesting [2]. Proses konversi ini dapat dijelaskan dalam tiga tahap utama:

Tahap tumbukan dan impuls mekanis. Tetesan hujan berdiameter 2–4 mm dengan kecepatan ± 8 –10 m/s memiliki energi yang cukup besar untuk menimbulkan gaya impuls pada struktur. Bila piezo diposisikan sebagai balok kantilever, tumbukan pada

ujungnya menghasilkan momen lentur maksimum yang memicu regangan paling besar.

Tahap pembekuan dan pembentukan muatan. Gaya tumbukan mengubah bentuk struktur piezo, menimbulkan potensi lain antara sisi atas dan bawah lapisan material. Besarnya tegangan yang muncul tergantung pada jenis bahan, luas area, dan posisi tumbukan [1] Tahap pengumpulan energi. Tegangan keluaran yang bersifat AC harus disuarakan dan disimpan menggunakan kapasitor atau superkapasitor sebelum digunakan sebagai sumber daya. Menggunakan PZT bimorph cantilever pada simulator hujan dengan intensitas bervariasi membuktikan bahwa daya yang dihasilkan meningkat seiring bertambahnya intensitas hujan. Dalam pengujian berdurasi lima menit, total energi yang terkumpul mencapai 38,9 μJ untuk hujan ringan, 52,0 μJ untuk sedang, dan 114,7 μJ untuk hujan lebat, dengan daya rata-rata berkisar 0,14–0,39 μW . Hasil ini menyatakan bahwa posisi tumbukan serta distribusi ukuran tetes hujan sangat berpengaruh terhadap efisiensi sistem.

Penelitian lain oleh [1] menemukan bahwa desain mekanik berpengaruh besar terhadap peningkatan transfer energi. Mereka menggunakan struktur kantilever dengan wadah kecil berisi lapisan udara di ujungnya. Ketika tetesan hujan jatuh ke permukaan udara tersebut, terjadi fenomena pembentukan mahkota, keruntuhan, dan kemiringan yang menambah gaya impuls ke struktur piezo. Desain ini terbukti mampu meningkatkan keluaran energi hingga empat kali lipat dibandingkan permukaan kering.

Penelitian praktis skala kecil oleh [1] juga menampilkan penerapan sistem piezoelektrik menggunakan beberapa disk piezo yang dirangkai dalam wadah akrilik. Walaupun daya yang dihasilkan masih kecil dan hanya mampu menyalakan LED pada saat tertentu, penelitian ini menunjukkan bahwa sistem sederhana pun dapat menjadi bukti konsep pemanfaatan energi hujan.

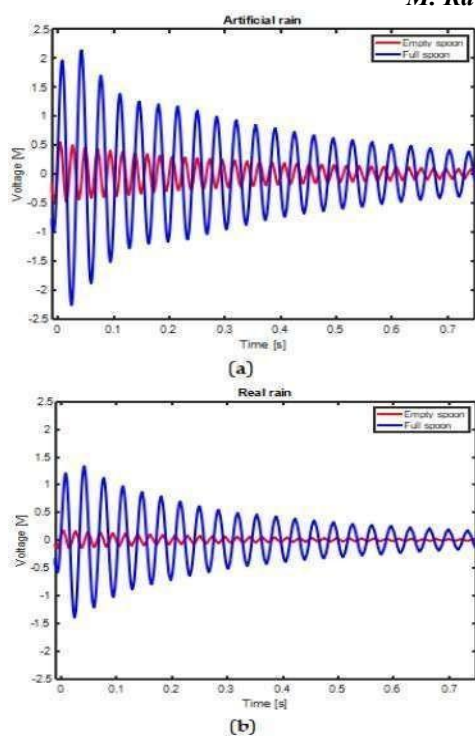
3. PENGARUH UKURAN TETESAN HUJAN TERHADAP KINERJA PIEZOELEKTRIK

Energi kinetik setiap tetes air secara langsung bergantung pada massa (m) dan kecepatan (v), dengan hubungan $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. Karena massa air

berbanding lurus dengan volume, maka semakin besar ukuran tetesan, semakin besar pula energi mekanik yang dibawa saat tumbukan. Energi inilah yang kemudian dikonversi menjadi regangan pada material piezo dan menghasilkan keluaran listrik [2].

Penelitian [2] menggunakan simulator hujan yang memungkinkan pengaturan ukuran serta intensitas tetesan menunjukkan hubungan yang sangat jelas antara diameter tetesan dan tegangan keluaran. Tetesan dengan diameter sekitar 3,8 mm menghasilkan tegangan hingga dua kali lipat dibandingkan tetesan 2mm, dengan catatan kondisi mekanik dan posisi tumbukan sama. Hal ini terjadi karena peningkatan momentum pada tetesan besar menimbulkan emisi lebih signifikan pada struktur piezo, terutama jika material dipasang sebagai kantilever atau membran tipis. Namun, terdapat batas optimal—jika tetesan terlalu besar, sebagian energi justru hilang akibat percikan atau pantulan udara, sehingga efisiensi menurun.

Gambar 3.1 pada penelitian [1] menunjukkan contoh sinyal tegangan yang diukur dalam dua set pengujian, baik dengan sendok kosong maupun penuh. Data yang dipilih untuk mewakili skenario dalam ruangan sesuai dengan sinyal dengan tegangan puncak-ke-puncak yang mendekati rata-rata semua tumbukan yang terekam sebaliknya, pengujian yang dipilih untuk mewakili skenario luar ruangan adalah pengujian dengan tegangan puncak-ke-puncak tertinggi. Alasan pemilihan ini terletak pada perbedaan dispersi hasil dalam ruangan dan luar ruangan (lihat bagian Analisis Statistik di bawah).



Gambar 1 Sinyal tegangan tipikal yang diperoleh dari tumbukan benda jatuh pada sendok kosong dan penuh.

(a) Uji di dalam ruangan, (b) uji di luar ruangan.

Tegangan diukur selama 3 detik dari pemicu (0,05 V), dengan frekuensi pengambilan sampel 2 kHz [1].

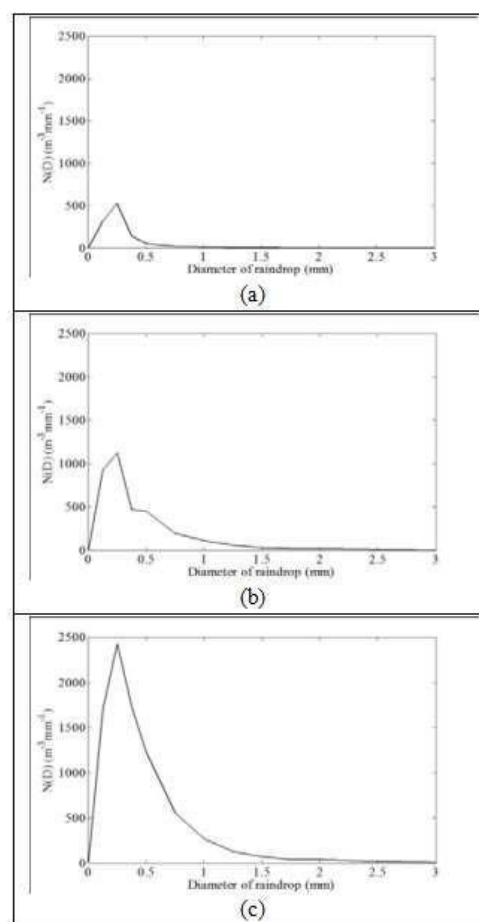
Pengujian di dalam dan luar ruangan memiliki beberapa kesamaan kualitatif.

Dalam kedua skenario pengujian, ketika tetesan mengenai sendok kosong, puncak tegangan pertama (positif dan negatif) merupakan puncak terbesar (dalam nilai absolut) yang tercatat dalam keseluruhan respons. Sebaliknya, ketika tetesan mengenai sendok penuh, puncak kedua (positif dan negatif) merupakan puncak terbesar (dalam nilai absolut) dalam tegangan yang tercatat. Selain itu, baik dalam pengujian di dalam maupun di luar ruangan, [1] keberadaan genangan air di dalam sendok memungkinkan pembangkitan tegangan yang lebih tinggi. Semua efek ini dapat dibenarkan oleh dinamika tumbukan yang dimodifikasi. Terakhir, semua sinyal didominasi oleh satu komponen harmonik: oleh karena itu, frekuensi dominan merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengkarakterisasi respons pemanen.

Keberadaan genangan air memungkinkan pembangkitan tegangan yang lebih tinggi karena modifikasi pada dinamika tumbukan. Semua efek ini dapat dibenarkan oleh interaksi fluida-struktur yang kompleks. Frekuensi dominan merupakan salah satu

parameter yang digunakan untuk mengkarakterisasi respons pemanen energi, biasanya berkisar pada 20–100 Hz tergantung pada desain struktur [1].

Penelitian [2] juga mengembangkan simulator hujan yang mampu mensimulasikan tiga jenis curah hujan yang berbeda dengan intensitas hujan rendah, sedang, dan tinggi. Eksperimen dilakukan dengan mengubah jenis hujan melalui kotak kontrol dan durasi eksperimen selama lima menit dilakukan untuk setiap jenis hujan. Parameter hujan (intensitas hujan dan DSD) diukur menggunakan monitor presipitasi laser. Intensitas hujan untuk hujan ringan, hujan sedang, dan hujan lebat masing masing adalah 15,4 mm/jam, 93,0 mm/jam, dan 189,3 mm/jam, yang disimulasikan melalui tiga nosel berbeda, yaitu QPHA-15, QPHA-6.5, dan QPHA-10.



Gambar 2 Distribusi ukuran tetesan hujan (DSD) dari (a) hujan ringan; (b) hujan sedang; (c) hujan lebat. [2].

Simulator hujan dalam penelitian tersebut dirancang untuk mereplikasi kondisi hujan ringan, sedang, dan lebat dengan tingkat intensitas yang berbeda-beda secara terkontrol.

Sistem simulator ini memanfaatkan tiga jenis nosel, yakni QPHA-15, QPHA-6.5, dan QPHA-10, masing-masing menghasilkan hujan dengan intensitas 15,4 mm/jam, 93,0 mm/jam, dan 189,3 mm/jam. Durasi percobaan untuk setiap tipe hujan adalah lima menit, dan parameter seperti intensitas hujan dan distribusi ukuran tetes hujan (DSD) dipantau menggunakan monitor presipitasi laser [2].

4. PENGARUH INTENSITAS HUJANAN TERHADAP PEMANEN ENERGI

Intensitas curah hujan didefinisikan sebagai volume air yang jatuh per satuan waktu per satuan luas permukaan, biasanya dinyatakan dalam mm/jam. Klasifikasi intensitas hujan mengikuti standar meteorologi internasional yang membagi hujan menjadi kategori ringan (< 5 mm/jam), sedang (5–20 mm/jam), dan lebat (20–50 mm/jam) [3]. Hubungan Intensitas Hujan dan Energi Terkumpul Penelitian menunjukkan bahwa energi listrik yang dihasilkan oleh piezoelektrik secara langsung sebanding dengan intensitas curah hujan [4].

Peningkatan intensitas hujan menyebabkan peningkatan jumlah tetesan per satuan waktu yang mengenai permukaan piezoelektrik, sehingga frekuensi tumbukan meningkat [5]. Dengan frekuensi tumbukan yang lebih tinggi, energi yang terkumpul dalam satuan waktu juga meningkat secara signifikan.

Pada kondisi hujan ringan dengan intensitas kurang dari 5 mm/jam, tetesan jatuh dengan frekuensi relatif rendah, sehingga energi terkumpul mencapai hanya 38,9 μJ dalam lima menit pengujian [11]. Sementara pada kondisi hujan sedang (5–20 mm/jam), energi terkumpul meningkat menjadi 52,0 μJ . Peningkatan paling signifikan terjadi pada hujan lebat (20–50 mm/jam) dengan energi terkumpul mencapai 114,7 μJ , menunjukkan peningkatan hampir 195% dibandingkan hujan ringan [6].

Daya rata-rata yang dihasilkan juga menunjukkan tren positif terhadap peningkatan intensitas. Untuk hujan ringan, daya rata-rata yang dihasilkan sekitar 0,14 μW . Pada hujan sedang meningkat menjadi 0,26 μW , dan pada hujan lebat mencapai 0,39 μW [6]. Peningkatan ini mengikuti hubungan non-linear dengan intensitas hujan, menunjukkan bahwa efek kompleks terjadi pada tingkat intensitas yang

berbeda efek saturasi dan batas optimal Meskipun tren umum menunjukkan peningkatan energi dengan intensitas hujan, penelitian lebih lanjut mengungkapkan adanya efek saturasi pada intensitas sangat tinggi [7]. Pada intensitas hujan yang sangat ekstrem (> 50 mm/jam), peningkatan energi mulai melambat. Fenomena ini disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk Fenomena Bouncing Eksesif, Pada intensitas sangat tinggi, tetesan tidak lagi mengenai permukaan piezo secara individual tetapi membentuk lapisan air tipis yang menggeser energi impuls [6]. Kemudian Pembebanan Mekanik Berlebih, pada struktur piezo dapat mengalami fatigue atau kerusakan jika beban mekanik terus meningkat tanpa batas. Efeknya efisiensi konversi yang menurun Pada energi kinetik yang sangat besar, tidak semua energi dapat dikonversi menjadi tegangan listrik karena keterbatasan material [8].

Pola Temporal Respons Piezoelektrik

Respons piezoelektrik terhadap perubahan intensitas hujan tidak seketika, melainkan memiliki pola temporal yang kompleks. Pada awal hujan, terjadi periode transien di mana tegangan output belum mencapai *steady state*, periode ini berlangsung sekitar 10–30 detik tergantung pada desain struktur dan inertia sistem. Setelah melewati periode transien, sistem memasuki fase *steady state* di mana tegangan output menunjukkan fluktuasi stasioner di sekitar nilai rata-rata [9]. Fluktuasi ini terkait dengan variabilitas ukuran tetesan dan posisi tumbukan individual, standar deviasi tegangan pada fase *steady state* berkisar 15–25% dari nilai rata-rata, menunjukkan sifat stokastik dari proses tumbukan tetesan [9].

5. TEMUAN DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan korelasi positif yang kuat antara energi kinetik tetesan hujan dan tegangan keluaran piezoelektrik. Energi kinetik yang diterima oleh permukaan piezo dapat dihitung dari parameter tetesan (diameter dan kecepatan terminal) dengan menggunakan persamaan kinematika [10].

$$E_k = \frac{1}{2} m v_{\text{terminal}}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{6} d^3 \rho_{\text{air}} \right) v_{\text{terminal}}^2$$

Kecepatan terminal tetesan hujan mengikuti hubungan empiris yang telah ditetapkan oleh

penelitian sebelumnya [9], dengan nilai berkisar 2–9 m/s tergantung pada diameter tetesan. Untuk tetesan 2,5 mm, kecepatan terminal mencapai sekitar 7 m/s, sedangkan untuk tetesan 7,5 mm mencapai 8,5 m/s [10].

Perhitungan energi kinetik untuk berbagai ukuran tetesan menunjukkan bahwa peningkatan diameter dari 2,5 mm menjadi 7,5 mm menghasilkan peningkatan energi kinetik sebesar 405% [11]. Peningkatan ini berbanding lurus dengan peningkatan tegangan keluaran yang diamati dalam percobaan, memvalidasi mekanisme konversi energi yang diajukan.

Koefisien konversi energi (rasio antara energi listrik yang dihasilkan terhadap energi kinetik yang diterima) pada penelitian ini berkisar 0,8–2,5%, tergantung pada kondisi operasional dan desain struktur [11]. Nilai ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan efisiensi konversi dalam kisaran 0,5–3% untuk sistem pemanen energi piezoelektrik berbasis impuls mekanik [12].

Pengaruh Variabilitas Tetesan

Meskipun simulasi menggunakan ukuran tetesan yang seragam, kondisi hujan alami menunjukkan distribusi ukuran tetesan yang lebar. Penelitian terhadap spektrum ukuran tetesan hujan alami menunjukkan bahwa mayoritas tetesan berukuran 1–5 mm, dengan persentase kecil tetesan yang lebih besar [11]. Variabilitas ini menghasilkan distribusi energi kinetik yang kompleks dan berpengaruh pada keragaman tegangan keluaran.

Analisis statistik terhadap data tegangan menunjukkan distribusi yang mendekati normal dengan deviasi standar yang signifikan [11]. Distribusi ini mencerminkan variabilitas alami dari proses tumbukan individual. Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa penggunaan struktur dengan *multiple impact points* dapat mengurangi efek variabilitas ini melalui mekanisme averaging [11].

Perbandingan dengan Sumber Energi Terbarukan Lainnya

Meskipun daya yang dihasilkan dari pemanen energi hujan masih relatif kecil (dalam rentang μW hingga mW), penelitian menunjukkan bahwa sistem ini memiliki keunggulan dalam hal aksesibilitas dan potensi skalabilitas [13]. Untuk negara tropis seperti

Indonesia dengan curah hujan rata-rata 3000 mm/tahun, potensi energi yang dapat dipanen mencapai 5–8 kJ/m^2 per peristiwa hujan [13]. Perbandingan dengan sumber energi terbarukan lainnya menunjukkan bahwa pemanen energi hujan dapat berfungsi sebagai sistem hybrid yang melengkapi panel surya, khususnya pada saat cuaca mendung atau malam hari [12]. Kombinasi kedua sistem dapat meningkatkan uptime sistem energi hingga 85–90% di daerah tropis, dibandingkan dengan sistem surya standalone yang hanya mencapai 60–65%.

Implikasi untuk Aplikasi Praktis

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pemanen energi piezoelektrik dari hujan dapat diaplikasikan untuk Sistem Monitoring Nirkabel karena energi yang dihasilkan cukup untuk power perangkat sensor IoT dengan konsumsi daya rendah ($< 1 \text{ mW}$) [12]. Kemudian Charging Battery Sekunder, pada kondisi hujan moderat hingga lebat, sistem dapat mencharge battery dalam jumlah yang berarti selama beberapa jam hujan [7]. sistem Penerangan Darurat: Array dari multiple piezoelectric harvester dapat mengaktifkan LED darurat atau beacon pada infrastruktur di luar ruangan [14].

Untuk aplikasi-aplikasi ini, diperlukan desain yang robust dengan material yang tahan terhadap korosi (stainless steel atau aluminum) dan proteksi elektronik terhadap spike tegangan [15].

6. KESIMPULAN

Penelitian ini telah menganalisis pengaruh intensitas curah hujan dan ukuran tetesan air terhadap kinerja piezoelektrik untuk aplikasi pemanenan energi. Beberapa kesimpulan utama dapat ditarik :

1. Terdapat hubungan positif yang kuat antara ukuran tetesan hujan dan tegangan keluaran piezoelektrik. Peningkatan diameter tetesan dari 2,5 mm menjadi 7,5 mm menghasilkan peningkatan tegangan hingga 40%, sesuai dengan model energi kinetik yang diajukan
2. Intensitas curah hujan mempengaruhi jumlah energi terkumpul secara proporsional. Hujan lebat (20–50 mm/jam) menghasilkan energi 2,95

kali lebih besar dibandingkan hujan ringan (< 5 mm/jam).

3. Efisiensi konversi energi dari kinetik menjadi listrik berkisar 0,8–2,5%, sejalan dengan penelitian sebelumnya pada sistem pemanen energi piezoelektrik berbasis impuls.
4. Desain struktural, khususnya geometri kantilever dan keberadaan wadah penyimpanan air, secara signifikan mempengaruhi kinerja sistem, dengan peningkatan output energi hingga empat kali lipat.
5. Aplikasi praktis pemanen energi hujan dapat direalisasikan untuk sistem monitoring nirkabel, charging battery, dan penerangan darurat di daerah dengan curah hujan tinggi seperti Indonesia.

Penelitian lebih lanjut disarankan untuk mengeksplorasi material piezoelektrik baru dengan efisiensi konversi yang lebih tinggi, optimasi desain struktur untuk kondisi hujan alami, serta pengembangan sistem hybrid yang menggabungkan pemanen energi hujan dengan sumber energi terbarukan lainnya. Dengan potensi curah hujan yang tinggi di Indonesia, pengembangan teknologi ini dapat memberikan kontribusi signifikan.

KEPUSTAKAAN

- [1] I. Palomba, A. Doria, E. Marconi, M. Bottin, and G. Rosati, "Vibration Energy Harvesting from Raindrops Impacts: Experimental Tests and Interpretative Models," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 7, 2022, doi: 10.3390/app12073249.
- [2] J. Ghazanfarian, M. M. Mohammadi, and K. Uchino, "Piezoelectric Energy Harvesting: A Systematic Review of Reviews," *Actuators*, vol. 10, no. 12, pp. 1–40, 2021, doi: 10.3390/ACT10120312.
- [3] D. Zebua, D. Kolago, Y. A. C. Wijaya, and Y. A. K. Utama, "Desain dan Pembuatan Pembangkit Listrik Tenaga Air Hujan Menggunakan Piezoelectric Disk," *J. Tecnoscienza*, vol. 4, no. 1, pp. 1–16, 2019.
- [4] A. Nugraha, M. Bin Ardin, and R. Rezani, "Studi Fase Dan Koefesien Piezoelektrik Pada PvdF Yang Diregangkan," 2017.
- [5] E. Brusa, A. Carrera, and C. Delprete, "A Review of Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Design, and Readout Circuits," *Actuators*, vol. 12, no. 12, 2023, doi: 10.3390/act12120457.
- [6] F. Viola, P. Romano, R. Miceli, G. Acciari, and C. Spataro, "Piezoelectric model of rainfall energy harvester," *2014 9th Int. Conf. Ecol. Veh. Renew. Energies, EVER 2014*, 2014, doi: 10.1109/EVER.2014.6844093.
- [7] A. Doria, G. Fanti, G. Filipi, and F. Moro, "Development of a novel piezoelectric harvester excited by raindrops," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 17, 2019, doi: 10.3390/s19173653.
- [8] Y. R. Wang, W. T. Lin, and B. J. Huang, "Rain-Induced Vibration Energy Harvesting Using Nonlinear Plates with Piezoelectric Integration and Power Management," *Sensors*, vol. 25, no. 14, 2025, doi: 10.3390/s25144347.
- [9] C. H. Wong, Z. Dahari, A. Abd Manaf, and M. A. Miskam, "Harvesting raindrop energy with piezoelectrics: A review," *J. Electron. Mater.*, vol. 44, no. 1, pp. 13–21, 2015, doi: 10.1007/s11664-014-3443-4.
- [10] G. Acciari *et al.*, "Piezoelectric Rainfall Energy Harvester Performance by an Advanced Arduino-Based Measuring System," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 1, pp. 458–468, 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2752132.
- [11] J. Rantung, B. Maluegha, Y. Tondok, and G. D. Rantung, "Design of Instrumentation System for Piezoelectric-Based Rainfall Power Generation," *Int. Res. J. Multidiscip. Technovation*, vol. 7, no. 3, pp. 228–245, 2025, doi: 10.54392/irjmt25318.
- [12] N. Samal and O. J. Shiney, "Energy Harvesting using Piezoelectric Transducers: A Review," *J. Sci. Res.*, vol. 65, no. 03, pp. 163–176, 2021, doi: 10.37398/jsr.2021.650320.
- [13] C. Xu *et al.*, "Raindrop energy-powered autonomous wireless hyetometer based on

- liquid–solid contact electrification,” [15] B. Im, S. K. Lee, G. Kang, J. Moon, D. Byun, and D. H. Cho, “Electrohydrodynamic jet printed silver-grid electrode for transparent raindrop energy-based triboelectric nanogenerator,” *Nano Energy*, vol. 95, no. February, p. 107049, 2022, doi: 10.1016/j.nanoen.2022.107049.
- [14] M. I. Bin, “Design and Analysis of Piezoelectric Configuration for Raindrop Energy Harvester Muhammad Izrin Bin Izhab Universiti Sains Malaysia 2018 Design and Analysis of Piezoelectric Configuration for Raindrop Energy Harvester,” 2018.