JIPFRI
https://journal.unuha.ac.id/index.php/JIPFRI

JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika dan Riset Ilmiah)
Vol. 10 No. 2, November 2026, hlm. 188–196
p-ISSN 2549-905X | e-ISSN 2549-9076
https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i2.5390

Karakterisasi Awal Luaran Daya Panel Surya dan Modul Piezoelektrik Piezo-Bottom pada Prototipe Smart Roof

Arya*, Muhammad Amiq Zahidsyahtya, Anugrah Putri Nur'aini, Lambang Subagiyo dan Atin Nuryadin

Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia
***Penulis korespondensi:** arya3.14159@gmail.com

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diterima: 15/06/2026
Direvisi: 11/11/2026
Disetujui: 12/11/2026
Terbit: 29/11/2026

Kata kunci:
Energi kinetik air hujan
Panel surya
Pemanenan energi
Piezo-bottom
Smart roof hibrida

Keywords:
Energy harvesting
Hybrid smart roof
Piezo-bottom
Raindrop kinetic energy
Solar panel

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi potensi daya maksimum subsistem panel surya monokristalin dan luaran daya listrik riil modul piezoelektrik piezo-bottom secara terpisah pada prototipe atap cerdas. Metodologi yang digunakan adalah eksperimen laboratorium terhadap spesimen prototipe menggunakan instrumen multimeter digital terkalibrasi dan katup pengatur debit air, yang dianalisis melalui statistik deskriptif deret waktu. Pengukuran panel surya dilakukan tanpa beban, sedangkan modul piezoelektrik diuji menggunakan beban resistif sebesar sepuluh kiloOhm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rerata potensi daya panel surya merosot dari 0,0454 Watt pada pagi hari menjadi 0,0207 Watt pada sore hari akibat fluktuasi tutupan awan. Sementara itu, luaran daya modul piezo-bottom meningkat secara kuadratik dari 0,36 mikroWatt pada debit air rendah menjadi 6,25 mikroWatt pada debit tinggi. Kesimpulannya, terdapat perbedaan skala daya yang sangat masif sehingga piezoelektrik lebih rasional difungsikan sebagai pasokan daya sekunder bagi simpul sensor. Implikasi bagi pendidikan fisika menunjukkan bahwa prototipe ini potensial dimanfaatkan sebagai media pembelajaran kontekstual untuk memperkuat pemahaman siswa mengenai konsep konversi energi, mekanika fluida, dan batas validitas instrumen pengukuran kelistrikan.

ABSTRACT

This study aims to characterize the theoretical maximum power potential of the monocrystalline solar panel subsystem and the real electrical power output of the piezo-bottom piezoelectric module separately on a smart roof prototype. The methodology employed is a laboratory experiment on a prototype specimen using calibrated digital multimeter instruments and a water flow rate control valve, analyzed through time-series descriptive statistics. Solar panel measurements were conducted under no-load conditions, while the piezoelectric module was tested using a ten kiloOhm resistive load. The results indicate that the average power potential of the solar panel decreased from 0.0454 Watts in the morning to 0.0207 Watts in the afternoon due to cloud cover fluctuations. Meanwhile, the power output of the piezo-bottom module increased quadratically from 0.36 microWatts at a low water flow rate to 6.25 microWatts at a high flow rate. The power scales differ massively, making it more rational to use the piezoelectric module as a secondary power supply for sensor nodes. The implications for physics education demonstrate that this prototype holds strong potential to be utilized as a contextual learning medium to reinforce students' understanding of energy conversion concepts, fluid mechanics, and the validity limits of electrical measurement instruments.

Cara mengutip: Arya, Zahidsyahtya, M. A., Nur'aini, A. P., Subagiyo, L., & Nuryadin, A. (2026). Karakterisasi awal luaran daya panel surya dan modul piezoelektrik piezo-bottom pada prototipe smart roof. *JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika dan Riset Ilmiah), 10*(2), 188–196. https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i2.5390
Copyright © 2026 Penulis. Artikel akses terbuka di bawah lisensi Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0).

PENDAHULUAN

Pemanenan energi terbarukan terdesentralisasi (*decentralized renewable energy harvesting*) merupakan strategi kunci untuk mendukung ketersediaan energi mandiri pada infrastruktur bangunan pintar di kawasan beriklim tropis (Mukilan et al., 2025). Sistem pemanen energi hibrida mengintegrasikan dua atau lebih mekanisme transduksi, seperti sel fotovoltaik untuk mengonversi radiasi matahari dan bahan piezoelektrik untuk memanen energi kinetik mekanis (Clementi et al., 2026; Hajra et al., 2024; Shaukat et al., 2023). Dalam konteks arsitektur atap cerdas (*smart roof*),

penggabungan ini diproyeksikan dapat mengoptimalkan potensi sumber daya alam lokal, baik berupa radiasi surya saat cuaca cerah maupun limpasan air hujan saat kondisi basah (Azhar et al., 2021). Namun, efektivitas operasional sistem pemanen energi terdesentralisasi sangat bergantung pada pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik dasar luaran daya dari masing-masing subsistem pemanen (Shaukat et al., 2023; Vázquez-Valdés et al., 2025). Oleh karena itu, karakterisasi awal terhadap respons listrik subsistem sel fotovoltaik dan modul piezoelektrik menjadi pijakan metodologis yang krusial dalam perancangan sistem pasokan daya terintegrasi (Al Ghazi et al., 2025; Rahman & Khan, 2026).

Secara teoritis, standar ideal dari sistem pemanen energi hibrida berbasis atap adalah kemampuannya dalam menghasilkan pasokan listrik yang stabil di bawah dinamika perubahan cuaca. Sel fotovoltaik tipe monokristalin memiliki efisiensi konversi yang relatif tinggi dalam menangkap spektrum cahaya matahari harian untuk menghasilkan daya listrik skala milliWatt hingga Watt (Azhar et al., 2021; Rahman & Khan, 2026). Di sisi lain, bahan piezoelektrik berbasis *Polyvinylidene Fluoride* (PVDF) memiliki fleksibilitas mekanis, respons frekuensi rendah yang unggul, serta ketahanan tinggi terhadap lingkungan lembap sehingga ideal untuk memanen energi kinetik tumbukan air (Wang et al., 2021; Yang et al., 2025). Penggabungan kedua teknologi ini dalam struktur ubin atau atap bangunan dirancang untuk menciptakan sumber energi mandiri yang mampu menyokong kebutuhan listrik perangkat elektronik rendah daya (*low-power devices*) (Mukilan et al., 2025; Rigo et al., 2024). Secara konsep, kontinuitas energi terbarukan dapat dicapai apabila penurunan luaran daya pada satu subsistem dapat diimbangi oleh aktivitas subsistem pemanen lainnya (Clementi et al., 2026). Pemetaan karakteristik fisis yang presisi dibutuhkan agar perancangan rangkaian manajemen daya (*Power Management Circuit*) dapat disesuaikan dengan profil tegangan dan arus riil yang dihasilkan (Al Ghazi et al., 2025; Vázquez-Valdés et al., 2025).

Meskipun standar ideal telah dirumuskan secara teoritis, realitas kondisi empiris di wilayah tropis Indonesia menunjukkan kesenjangan (*gap*) yang signifikan. Intensitas radiasi matahari di kawasan tropis sering kali mengalami fluktuasi ekstrem akibat tutupan awan tebal dan kejadian hujan mendadak, yang menyebabkan luaran daya panel surya merosot secara drastis dalam tenggat waktu singkat (Cao et al., 2026; Takács et al., 2022). Di sisi lain, pemanfaatan energi kinetik tetesan air hujan yang jatuh secara acak di permukaan atap terbuka hanya mampu menghasilkan daya listrik yang sangat terbatas pada orde mikroWatt (Lin & Yang, 2024; Wang et al., 2021). Karakteristik luaran daya piezoelektrik yang berada pada skala mikroWatt ini secara fisis tidak dapat mengimbangi kehilangan daya panel surya yang berada pada skala Watt atau milliWatt (Rahman & Khan, 2026). Kesenjangan skala daya yang mencolok serta ketidakpastian kondisi atmosferik harian menjadi hambatan utama dalam mewujudkan pasokan listrik hibrida yang stabil dan kontinu di lapangan (Shaukat et al., 2023).

Apabila kesenjangan antara kondisi ideal dan realitas empiris ini diabaikan, terdapat sejumlah risiko teknis dan operasional yang berdampak sistemik. Kegagalan dalam memetakan profil daya riil subsistem akan mengakibatkan ketidakseimbangan pasokan listrik pada sistem penyimpan energi seperti baterai atau superkapasitor (Zărnescu et al., 2026). Pemaksaan integrasi rangkaian tanpa pemahaman karakterisasi awal dapat memicu *loading effect* dan kerugian daya (*rectifier losses*) yang tinggi pada komponen penyearah kelistrikan (Al Ghazi et al., 2025; Vázquez-Valdés et al., 2025). Ketidakmampuan sistem terdesentralisasi dalam menjaga kontinuitas daya pada akhirnya akan mempertahankan ketergantungan penuh pada jaringan listrik konvensional berbasis bahan bakar fosil (Azhar et al., 2021).

Akar penyebab dari timbulnya masalah tersebut terletak pada dua faktor utama, yaitu faktor konfigurasi mekanis dan faktor pendekatan metodologis. Dari segi mekanis, penempatan elemen piezoelektrik di permukaan atap datar konvensional menyebabkan massa dan momentum air hujan tersebar secara acak sehingga impuls gaya yang diterima material sangat rendah (Arana Gaitán et al., 2025; Yang et al., 2025). Dari segi metodologis, banyak pengembangan sistem hibrida terburu-buru melakukan penggabungan kelistrikan simultan tanpa terlebih dahulu melakukan studi karakterisasi awal terhadap luaran daya masing-masing subsistem secara mandiri (Shaukat et al., 2023). Tanpa adanya data dasar (*baseline data*)

mengenai respons tegangan, arus, dan daya subsistem terhadap variasi parameter lingkungan (seperti waktu penyinaran surya dan debit aliran air), perancangan sistem manajemen daya menjadi tidak terarah dan efisiensi konversi energi tetap berada pada tingkat yang sangat rendah (Al Ghazi et al., 2025).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, solusi logis dan rasional yang diusulkan dalam penelitian ini adalah perancangan prototipe atap cerdas (*smart roof*) dengan pendekatan konfigurasi *piezo-bottom* yang difokuskan pada pengujian karakterisasi awal subsistem. Konfigurasi *piezo-bottom* memanfaatkan saluran pipa vertikal untuk mengumpulkan dan mengarahkan limpasan air hujan dari permukaan atap sehingga terjadi akumulasi massa dan laju transfer momentum fluida sebelum menumbuk modul piezoelektrik di dasar pipa (Arana Gaitán et al., 2025). Penelitian ini memfokuskan lingkup kajian pada karakterisasi awal luaran daya panel surya berdasarkan variasi waktu penyinaran (pagi, siang, dan sore) serta karakterisasi modul piezo-bottom berdasarkan variasi debit aliran air yang terkuantifikasi (Rahman & Khan, 2026).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi pemanenan energi tetesan air hujan menggunakan struktur kantilever PVDF di permukaan terbuka (Yang et al., 2025), pengujian piezoelektrik dalam pipa pembuangan air hujan skala laboratorium (Arana Gaitán et al., 2025), ubin hibrida multipemanen (Mukilan et al., 2025), struktur hibrida nanogenerator dan sel surya (Hajra et al., 2024), serta perancangan rangkaian antarmuka daya hibrida (Al Ghazi et al., 2025; Clementi et al., 2026). Namun demikian, belum ada kajian yang secara spesifik mengarahkan pengujian karakterisasi awal pada modul *piezo-bottom* terintegrasi pipa vertikal prototipe atap cerdas dengan mengukur respons daya riil subsistem secara terpisah di bawah variasi debit terkalibrasi dan fluktuasi waktu tropis. Kebaruan utama penelitian ini terletak pada pembuktian hubungan karakteristik fisis luaran daya modul *piezo-bottom* terhadap variasi debit fluida terkonsentrasi serta penyediaan profil daya dasar subsistem fotovoltaik. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah berupa data karakterisasi awal yang valid bagi pengembangan teknologi pemanen energi terbarukan di masa depan (Shaukat et al., 2023).

METODE

Desain Prototipe dan Spesifikasi Bahan

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium untuk mengkarakterisasi luaran daya dari subsistem fotovoltaik dan modul piezo-bottom secara terpisah. Prototipe *smart roof* dibangun menggunakan struktur rangka berukuran panjang 60 cm, lebar 40 cm, dan tinggi 50 cm, dengan kemiringan atap 30° untuk mengalirkan air hujan secara gravitasi menuju talang penampung.

Pada subsistem fotovoltaik, prototipe dilengkapi sel panel surya jenis monocrystalline berkapasitas daya maksimum 0,1 Watt-peak (W_p), tegangan open-circuit (V_{oc}) 3,0 V, arus short-circuit (I_{sc}) 0,03 A, dan luas permukaan aktif 3 cm × 4 cm. Sementara itu, subsistem piezo-bottom menggunakan modul piezoelektrik berbasis Polyvinylidene Fluoride (PVDF) dengan diameter elemen 27 mm, ketebalan 0,2 mm, serta kapasitansi internal 20 nF (Yang et al., 2025). Modul ini dipasang pada dasar pipa pembuangan vertikal PVC berdiameter 15 mm dengan lintasan jatuh bebas fluida sejauh 40 cm dari talang penampung.

Untuk mensimulasikan intensitas limpasan air hujan secara terkuantifikasi, digunakan sistem sirkulasi fluida dengan katup pengatur debit terkalibrasi dan instrumen *flow meter*. Variasi debit air dialirkan dari tangki penampung atas untuk menghasilkan tiga tingkat debit pengujian, yaitu debit rendah sebesar 0,5 L/menit, debit sedang sebesar 1,0 L/menit, dan debit tinggi sebesar 2,1 L/menit (Arana Gaitán et al., 2025; Fernández-Raga et al., 2022).

Rangkaian Pengukuran Kelistrikan

Pengukuran luaran daya listrik berbeban dilakukan dengan merangkai sistem pengondisian sinyal terkalibrasi pada masing-masing subsistem. Sinyal tegangan bolak-balik dari impuls tumbukan air pada modul piezo-bottom disearahkan menjadi tegangan searah menggunakan rangkaian penyearah gelombang penuh (*full-bridge rectifier*) berbasis dioda Schottky tipe 1N5817 yang memiliki tegangan jatuh maju rendah sebesar 0,2 V (Al Ghazi et al., 2025; Vázquez-Valdés et al., 2025). Keluaran penyearah ini dihubungkan secara paralel dengan hambatan beban resistif (*load resistor*) bernilai 10 $k\Omega$ yang disesuaikan dengan perkiraan nilai impedansi internal modul (Tshimbu et al., 2026).

Pengukuran karakteristik kelistrikan subsistem fotovoltaik dilakukan tanpa beban (no-load condition) untuk memetakan potensi daya maksimum teoritisnya. Multimeter digital dikonfigurasi secara bergantian untuk mengukur tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) secara paralel dan arus hubung singkat (I_{sc}) secara seri pada setiap interval waktu.

Pengukuran nilai tegangan dan arus DC berbeban pada kedua subsistem dilakukan menggunakan Digital Multimeter (DMM) merek UNI-T tipe UT61E dengan akurasi tegangan 0,1% dan resolusi arus 0,1 μA. Luaran daya listrik berbeban (P_L) diperoleh secara langsung melalui hasil perkalian antara nilai tegangan berbeban (V_L) dan arus berbeban (I_L) terukur.

Prosedur Pengambilan Data

Pengambilan data subsistem fotovoltaik dilakukan pada area terbuka untuk merekam karakteristik listrik terhadap fluktuasi cuaca harian iklim tropis lokal (Azhar et al., 2021). Pengujian dibagi menjadi tiga sesi waktu pengukuran, yaitu sesi pagi pada pukul 09.35–10.30 WITA, sesi siang pada pukul 11.35–12.30 WITA, dan sesi sore pada pukul 16.10 –17.05 WITA. Pada setiap sesi, pencatatan nilai tegangan dan arus dilakukan secara berurutan setiap interval 5 menit selama durasi 60 menit sehingga diperoleh 12 titik data per sesi.

Pengujian subsistem piezo-bottom dilakukan pada lingkungan laboratorium terkontrol untuk mengamati respons konversi energi terhadap variasi debit aliran air (Arana Gaitán et al., 2025; Fernández-Raga et al., 2022). Pengujian mencakup tiga tingkat variasi debit, yakni debit rendah 0,5 L/menit, debit sedang 1,0 L/menit, dan debit tinggi 2,1 L/menit. Pada setiap tingkat debit, pencatatan nilai tegangan dan arus berbeban dilakukan sebanyak 5 kali pengulangan dengan interval 5 menit untuk memastikan kestabilan luaran listrik pada kondisi aliran fluida tunak *(steady-state flow)*.

Teknik Analisis Data

Seluruh data hasil pengukuran diolah dan dianalisis menggunakan teknik analisis deskriptif dan deret waktu (*time-series descriptive analysis*). Pendekatan ini diterapkan untuk memetakan karakteristik fisik serta profil luaran daya riil dari masing-masing subsistem secara jujur dan objektif berdasarkan parameter lingkungan yang diamati (Shaukat et al., 2023). Pengolahan data dilakukan dengan menghitung parameter statistik dasar yang meliputi rerata (*mean*), median, standar deviasi (SD), serta nilai minimum dan maksimum dari setiap kelompok perlakuan.

Selain perhitungan numerik statistik dasar, pola karakteristik fisis divisualisasikan dalam bentuk grafik deret waktu untuk melihat fluktuasi daya panel surya terhadap perubahan waktu penyinaran harian. Pada subsistem piezo-bottom, pola hubungan antara peningkatan debit aliran air dan luaran daya listrik disajikan melalui kurva hubungan debit dan daya (*discharge vs. power curve*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Potensi Daya Maksimum Panel Surya pada Variasi Waktu

Pengujian subsistem fotovoltaik dilakukan tanpa beban eksternal (*no-load condition*) di lingkungan terbuka untuk merekam dinamika Tegangan Rangkaian Terbuka (V_{oc}) dan Arus Hubung Singkat (I_{sc}) pada tiga sesi waktu penyinaran harian. Pengukuran tanpa beban ini bertujuan memetakan potensi daya maksimum teoritis ($P_{max} = V_{oc} \times I_{sc}$) subsistem terhadap fluktuasi cuaca harian iklim tropis lokal. Hasil olah data statistik deskriptif dari total 36 titik data dengan interval 5 menit disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Statistik deskriptif luaran kelistrikan subsistem panel surya

Sesi	Parameter	Min	Maks	Mean	Standar Deviasi
Pagi	V_{oc} (V)	2,9000	2,9000	2,9000	0,0000
	I_{sc} (A)	0,0065	0,0250	0,0157	0,0055
	P (W)	0,0188	0,0725	0,0454	0,0161
Siang	V_{oc} (V)	2,9000	2,9000	2,9000	0,0000
	I_{sc} (A)	0,0108	0,0185	0,0148	0,0027
	P (W)	0,0311	0,0536	0,0429	0,0078
Sore	V_{oc} (V)	1,8000	3,0000	2,6000	0,3100
	I_{sc} (A)	0,0002	0,0210	0,0073	0,0091
	P (W)	0,0005	0,0630	0,0207	0,0262

Note: V_{oc} adalah tegangan; I_{sc} adalah kuat arus; *P* adalah potensi daya.

Pada sesi pagi hari (pukul 09.35–10.30 WITA), nilai V_{oc} terukur berada pada kondisi konstan 2,90 V, sementara nilai I_{sc} berkisar antara 0,0065 A dan

0,0250 A (rerata 0,0157 A dan standar deviasi 0,0055 A). Hal ini menghasilkan rata-rata potensi daya maksimum sebesar 0,0454 W (45,4 mW), serta rentang antara 0,0188 W dan 0,0725 W. Pada sesi siang hari (pukul 11.35–12.30 WITA), tegangan tetap terregulasi stabil di angka 2,90 V, dengan fluktuasi arus pada rentang 0,0108 A hingga 0,0185 A (rerata 0,0148 A dan standar deviasi 0,0027 A). Kondisi ini menghasilkan rerata potensi daya siang hari sebesar 0,0429 W (42,9 mW), dengan rentang 0,0311 W hingga 0,0536 W.

Pada sesi sore hari (pukul 16.10–17.05 WITA), terjadi fluktuasi yang lebih tinggi di mana V_{oc} berkisar antara 1,80 V hingga 3,00 V (rerata 2,60 V dan standar deviasi 0,31 V), sedangkan I_{sc} merosot drastis ke rentang 0,0002 A hingga 0,0210 A (rerata 0,0073 A dan standar deviasi 0,0091 A). Akibatnya, rerata potensi daya sore hari turun menjadi 0,0207 W (20,7 mW) dan rentang antara 0,0005 W hingga 0,0630 W

Secara fisis, Tegangan Rangkaian Terbuka (V_{oc}) yang terregulasi konstan pada 2,90 V di sesi pagi dan siang disebabkan oleh sifat intrinsik sambungan p-n bahan semikonduktor silikon yang mencapai tegangan penjepit (*clamping voltage*) saat intensitas cahaya matahari berada di atas ambang batas operasional minimum (Rahman & Khan, 2026). Sebaliknya, Arus Hubung Singkat (I_{sc}) sangat sensitif dan berbanding lurus secara linear terhadap iradiasi matahari. Rerata daya pagi hari yang sedikit lebih tinggi daripada siang hari dipengaruhi oleh dinamika tutupan awan konvektif lokal, yang diobservasi secara kualitatif saat pengujian, serta efek koefisien temperatur negatif pada panel surya, di mana kenaikan suhu permukaan panel saat siang hari mereduksi efisiensi konversi fotovoltaik (Azhar et al., 2021; Cao et al., 2026).

Penurunan daya pada sesi sore hari mencerminkan berkurangnya sudut elevasi matahari dan melemahnya iradiasi global. Adanya kenaikan daya secara drastis pada beberapa titik akhir sesi sore (mencapai 0,0630 W) mengindikasikan adanya fenomena celah awan (*cloud-gap effect*) transient sebelum matahari terbenam (Takács et al., 2022). Profil deret waktu dari dinamika V_{oc} dan I_{sc} ini menegaskan bahwa tanpa pengukuran iradiasi langsung, mengaitkan luaran daya hanya pada variabel waktu penyinaran mengandung ketidakpastian tinggi akibat sifat intermiten tutupan awan tropis (Cao et al., 2026).

Karakterisasi Luaran Daya Subsistem Piezo-Bottom pada Variasi Debit Aliran Air

Pengujian subsistem modul piezo-bottom dilakukan pada variasi debit aliran air terkalibrasi dengan hambatan beban resistif statis terpasang konstan sebesar $10\ \mathrm{k}\Omega$ untuk mengkarakterisasi respons konversi energi kinetik fluida menjadi energi listrik. Hasil pengukuran tegangan berbeban (V_L), arus berbeban (I_L), dan perhitungan daya listrik riil ($P_L = V_L \times I_L$) disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Statistik deskriptif dan luaran kelistrikan subsistem piezo-bottom (5 kali pengulangan per debit)

Debit	Tegangan (V)	Arus (μA)	Daya (μW)	Standar Deviasi
Rendah	0,06	6,00	0,36	0,00
Sedang	0,12	12,00	1,44	0,00
Tinggi	0,25	25,00	6,25	0,00

Pada kondisi debit rendah, tegangan terukur berada pada nilai 0,06 V dan arus sebesar 6,0 μA, yang menghasilkan daya listrik riil sebesar 0,36 μW ($3{,}60 \times 10^{-7}$ W). Ketika debit ditingkatkan ke kondisi sedang, tegangan terukur naik menjadi 0,12 V dan arus menjadi 12,0 μA, sehingga daya listrik meningkat menjadi 1,44 μW ($1{,}44 \times 10^{-6}$ W). Pada kondisi debit tinggi, tegangan berbeban mencapai 0,25 V dan arus mencapai 25,0 μA, yang menghasilkan luaran daya sebesar 6,25 μW ($6{,}25 \times 10^{-6}$ W). Seluruh pengulangan pengukuran pada masing-masing tingkat debit menunjukkan simpangan baku (SD) sebesar nol. Kondisi tegangan yang terukur konstan tanpa deviasi ini merupakan implikasi dari keterbatasan instrumen Multimeter Digital (DMM) manual yang bekerja pada mode pengintegralan rerata (*averaging*). Mengingat material piezoelektrik sejatinya menghasilkan sinyal transien impulsif, fluktuasi mikro pada setiap tumbukan tidak sepenuhnya terdeteksi oleh layar DMM pada aliran fluida yang diatur tunak (*steady-state flow*).

Pola hubungan antara variasi debit air (Q) dan daya luaran piezo-bottom (P) dianalisis berdasarkan prinsip mekanika fluida dan persamaan konstitutif piezoelektrik. Dalam sistem pipa vertikal prototipe, ketinggian jatuh air (h) merupakan variabel kontrol yang bernilai tetap, sehingga kecepatan jatuh fluida

di ujung bawah pipa ($v = \sqrt{2gh}$) bernilai konstan (Arana Gaitán et al., 2025). Oleh karena itu, peningkatan debit air (Q) secara langsung meningkatkan laju aliran massa fluida ($\dot{m} = \rho Q$). Berdasarkan hukum impuls-momentum, gaya tumbukan rata-rata fluida ($F = \dot{m}\, v = \rho v Q$) berbanding lurus secara linear terhadap debit air ($F \propto Q$).

Selanjutnya, berdasarkan persamaan konstitutif bahan piezoelektrik, tegangan listrik (V) yang dibangkitkan oleh deformasi kisi kristal PVDF berbanding lurus dengan gaya tumbukan mekanis yang diterima ($V \propto F$), sehingga tegangan juga berbanding lurus secara linear terhadap debit ($V \propto Q$) (Yang et al., 2025). Karena daya listrik yang terdisipasi pada hambatan beban memenuhi persamaan $P = V^2 / R_L$, maka secara teoritis daya listrik yang dihasilkan berbanding lurus dengan kuadrat debit air ($P \propto Q^2$).

Hasil eksperimen empiris menunjukkan lonjakan daya dari 0,36 µW pada debit rendah, menjadi 1,44 µW pada debit sedang (meningkat 4 kali lipat saat debit naik 2 kali lipat), dan mencapai 6,25 µW pada debit tinggi (meningkat sekitar 17,4 kali lipat dibanding debit rendah). Tren kenaikan ini selaras dengan hubungan proporsionalitas kuadratik ($P \propto Q^2$), yang membuktikan bahwa pemusatan massa aliran fluida di dalam pipa vertikal *piezo-bottom* mampu meningkatkan kerapatan daya konversi secara nonlinear tanpa memerlukan klaim eksponensial yang berlebihan (Lin & Yang, 2024; Rahman & Khan, 2026).

Komparasi Skala Daya Subsistem dan Analisis Keterbatasan Teknis Pengukuran

Hasil komparasi kuantitatif antara kedua subsistem menunjukkan jurang skala daya yang sangat besar. Subsistem fotovoltaik beroperasi pada skala milliWatt hingga Watt (rerata 20,7 mW hingga 45,4 mW), sedangkan subsistem modul piezo-bottom beroperasi pada skala mikroWatt (0,36 µW hingga 6,25 µW). Perbandingan ini menunjukkan bahwa daya panel surya berada pada orde 10^3 hingga 10^4 kali lebih besar dibandingkan dengan daya modul piezo-bottom pada debit tertinggi. Temuan ini mematahkan asumsi awal bahwa modul piezo-bottom dapat "mengimbangi" atau menggantikan penurunan daya panel surya saat hujan lebat (Shaukat et al., 2023).

Selain perbedaan skala fisik, pengujian ini memiliki keterbatasan teknis terkait instrumentasi pengukuran dan rangkaian kelistrikan. Penggunaan Multimeter Digital (DMM) manual dalam mengukur sinyal piezoelektrik memiliki keterbatasan respons frekuensi (Tshimbu et al., 2026). Tumbukan fluida pada bahan piezoelektrik menghasilkan sinyal AC yang bersifat transien, impulsif, dan berfrekuensi tinggi. DMM bekerja dengan prinsip pengintegralan rerata (*averaging/integration mode*) sinyal DC ter-rectify, sehingga nilai tegangan dan arus yang terbaca pada DMM cenderung meratakan puncak-puncak tegangan transient (*peak voltage*) dan menghasilkan estimasi daya terukur yang terdepresiasi (*underestimated*) dibanding daya puncak riil (Du et al., 2020).

Keterbatasan lainnya bersumber dari rugi-rugi dioda penyearah (*rectifier losses*) dan kendala pencocokan impedansi (*impedance matching*). Penggunaan jembatan dioda pasif (*full-bridge rectifier*) menimbulkan rugi tegangan jatuh maju (*forward voltage drop*) sekitar 0,2 V hingga 0,7 V per dioda (Al Ghazi et al., 2025; Vázquez-Valdés et al., 2025). Pada sinyal piezoelektrik skala mikroWatt dengan tegangan AC yang kecil (di bawah 0,3 V), sebagian besar energi kinetik terdisipasi menjadi panas pada dioda sebelum mencapai beban. Di samping itu, bahan PVDF memiliki impedansi internal (Z_{in}) berkarakter kapasitif yang sangat tinggi (orde puluhan kΩ hingga MΩ), sehingga penggunaan hambatan beban yang tidak teradaptasi secara dinamis dapat memicu *loading effect* yang mereduksi efisiensi transfer daya

maksimum (Shaukat et al., 2023; Tshimbu et al., 2026).

Prospek Integrasi Sistem Smart Roof dan Rekomendasi Rangkaian Manajemen Daya

Meskipun luaran daya modul piezo-bottom berada pada skala mikroWatt, subsistem ini tetap memiliki prospek teknis yang menjanjikan apabila ditempatkan dalam konteks aplikasi yang tepat. Daya mikroWatt dari limpasan air hujan dapat dimanfaatkan sebagai sumber pasokan daya mandiri (*self-powered supply*) untuk menyokong perangkat mikroelektronika berdaya sangat rendah (*ultra-low-power devices*), seperti simpul sensor IoT (*Internet of Things*), pemancar nirkabel frekuensi radio (*LoRa/BLE transceiver*), atau pemantau kondisi struktur atap yang beroperasi dengan mode siklus kerja terputus (*intermittent duty-cycle*) (Mukilan et al., 2025; Rigo et al., 2024).

Untuk mengatasi kendala kelistrikan dan mengoptimalkan integrasi kedua subsistem di masa depan, diperlukan pengembangan arsitektur Rangkaian Manajemen Daya (Power Management Circuit/PMC) yang adaptif. Beberapa rekomendasi teknis meliputi:

Pertama, penggunaan topologi penyearah aktif nonlinier seperti *Synchronized Switch Harvesting on Inductor* (SSHI) atau penyearah aktif CMOS berbasis transistor. Rangkaian SSHI terbukti mampu membalikkan polaritas tegangan pada kapasitor internal piezoelektrik secara sinkron, sehingga meminimalkan pembuangan muatan dan meningkatkan ekstraksi daya hingga beberapa kali lipat dibandingkan dengan penyearah gelombang penuh pasif (Al Ghazi et al., 2025; Du et al., 2020).

Kedua, integrasi IC Manajemen Daya (*Power Management IC*/PMIC) khusus *ultra-low-power* yang dilengkapi fitur *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) terintegrasi (Vázquez-Valdés et al., 2025). PMIC komersial mampu melakukan proses *cold-start* dari sumber tegangan sangat rendah serta menyesuaikan impedansi masukan secara dinamis untuk meminimalkan *loading effect* (Tshimbu et al., 2026).

Ketiga, penggunaan media penyimpan energi sekunder berbasis superkapasitor yang dikombinasikan dengan dioda penahan arus balik (*blocking diode*) berarus bocor rendah. Superkapasitor berfungsi mengumpulkan akumulasi pulsa energi mikroWatt dari modul piezo-bottom saat hujan secara bertahap hingga mencapai ambang tegangan kerja yang dibutuhkan oleh perangkat sensor IoT (Shi & Wang, 2020). Melalui pendekatan manajemen daya yang tepat, perbedaan skala daya dan sifat listrik antarsubsistem dapat dijembatani sehingga prototipe *smart roof* dapat berkembang menjadi sistem pemanen energi terdesentralisasi yang andal di kawasan tropis (Shaukat et al., 2023).

SIMPULAN

Karakterisasi awal terhadap kedua subsistem pemanen energi pada prototipe *smart roof* memberikan konfirmasi komprehensif bahwa luaran daya yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh fluktuasi parameter lingkungan iklim tropis. Subsistem fotovoltaik terbukti sangat rentan terhadap dinamika tutupan awan dan suhu permukaan harian, di mana potensi daya maksimumnya mengalami penurunan signifikan menjelang sore hari seiring dengan melemahnya dan berfluktuasinya tegangan rangkaian terbuka secara acak. Sebaliknya, subsistem piezo-bottom menunjukkan kinerja konversi energi kinetik yang stabil pada kondisi aliran tunak, dengan peningkatan luaran daya riil yang sebanding secara kuadratik dengan naiknya debit curah hujan. Meskipun piezo-bottom terbukti mampu mengakumulasi momentum aliran fluida secara efektif melalui desain pipa vertikal, sintesis komparatif menunjukkan adanya jurang skala daya fisis yang masif antara orde milliWatt pada panel surya dan mikroWatt pada piezo-bottom. Fakta empiris ini menegaskan bahwa piezoelektrik tidak dapat difungsikan sebagai pembangkit penyeimbang utama saat hujan lebat, melainkan lebih rasional dan tepat guna jika difokuskan sebagai penyokong daya mandiri bagi simpul sensor berdaya ultra-rendah dalam ekosistem atap cerdas.

Berdasarkan sintesis temuan tersebut, disarankan kepada peneliti selanjutnya untuk menggunakan osiloskop penyimpanan digital dalam eksperimen pengukuran material piezoelektrik agar puncak tegangan transien impulsif dapat terekam secara akurat tanpa terdepresiasi oleh mode pengintegralan rata-rata pada instrumen. Selain itu, bagi perancang sistem kelistrikan bangunan pintar, pengimplementasian rangkaian manajemen daya adaptif yang dilengkapi penyearah aktif nonlinear serta media penyimpan energi superkapasitor sangat krusial dilakukan untuk menjembatani perbedaan sifat kelistrikan antarsubsistem dan

menekan rugi-rugi komponen penyearah di lapangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Mulawarman atas dukungan dan fasilitas yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

PERNYATAAN

Kontribusi Penulis: Arya, Muhammad Amiq Zahidsyahtya, Anugrah Putri Nur'aini: Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Kurasi Data, Analisis Formal, dan Penulisan Draf Awal; Lambang Subagiyo dan Atin Nuryadin: Supervisi, Validasi, dan Penulisan & Penyuntingan. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui naskah akhir.

Pendanaan: Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Pernyataan Penggunaan Kecerdasan Artifisial (AI): Dalam penyusunan naskah ini, penulis menggunakan Gemini untuk membantu memperbaiki struktur kalimat, tata bahasa, dan keterbacaan naskah. Seluruh penulis telah menelaah dan menyunting isi naskah serta bertanggung jawab penuh atas isi publikasi.

Persetujuan Etik: Tidak relevan.

Ketersediaan Data: Data yang mendukung temuan penelitian ini tersedia dari penulis korespondensi atas permintaan yang wajar.

REFERENSI

Al Ghazi, A., Ouslimani, A., & Kasbari, A. (2025). Advances in interface circuits for self-powered piezoelectric energy harvesting systems: A comprehensive review. *Sensors*, *25*(13), Article 4029. https://doi.org/10.3390/s25134029

Arana Gaitán, F. Y., Alcántara Ramos, J. P., & Vasquez Ramirez, L. (2025). Generation of electrical energy by the impact of water on piezoelectric plates in rainwater collection systems. In *Proceedings of the 23rd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI): "Engineering, Artificial Intelligence, and Sustainable Technologies in service of society"*. https://doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.1119

Azhar, A. W., Al-Fikri, M. H., Sulasmono, R. I., Sholikhah, N., Wafiyah, N. A., & Dewi, C. P. (2021). Elektroof: Smart roof as an energy independent solution for Indonesia in the future. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *847*(1), Article 012033. https://doi.org/10.1088/1755-1315/847/1/012033

Cao, X., Tang, Z., Xu, X., Kuang, B., Zou, W., Shangguan, X., Zhu, H., & Song, J. (2026). The impact of cloudy weather on the calculation accuracy of the soiling loss ratio in photovoltaic systems. *Energies*, *19*(2), Article 471. https://doi.org/10.3390/en19020471

Clementi, G., Tinti, L., Castellini, L., Costanza, M., Neri, I., Cottone, F., & Gammaitoni, L. (2026). A hybrid piezoelectric and photovoltaic energy harvester for power line monitoring. *Actuators*, *15*(1), Article 1. https://doi.org/10.3390/act15010001

Du, S., Jia, Y., Zhao, C., Amaratunga, G., & Seshia, A. (2020). A nail-size piezoelectric energy harvesting system integrating a MEMS transducer and a CMOS SSHI circuit. *IEEE Sensors Journal*, *20*(1), 277–285. https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2941180

Fernández-Raga, M., Rodríguez, I., Caldevilla, P., Búrdalo, G., Ortiz, A., & Martínez-García, R. (2022). Optimization of a laboratory rainfall simulator to be representative of natural rainfall. *Water*, *14*(23), Article 3831. https://doi.org/10.3390/w14233831

Hajra, S., Ali, A., Panda, S., Song, H., Rajaitha, P. M., Dubal, D., Borras, A., In-Na, P., Vittayakorn, N., Vivekananthan, V., Kim, H. J., Divya, S., & Oh, T. H. (2024). Synergistic integration of nanogenerators and solar cells: Advanced hybrid structures and applications. *Advanced Energy Materials*, *14*(21), Article 2400025. https://doi.org/10.1002/aenm.202400025

Lin, Z., & Yang, Z. (2024). Water droplet energy harvesting. *Droplet*, *3*(1), Article e97. https://doi.org/10.1002/dro2.97

Mukilan, P., Balasubramanian, M., Petrov, J., Sobotík, J., & Narayanamoorthi, R. (2025). Sustainable tiles for renewable energy harvesting using integrated solar PV thermoelectric generator and piezoelectric technologies. *Results in Engineering*, *26*, Article 105478. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105478

Rahman, W. U., & Khan, F. U. (2026). A flow type piezoelectric-electromagnetic hybrid energy harvesting for an energy sustainable pipeline's monitoring system. *International Journal of Ambient Energy*, *47*(1), Article 2609592. https://doi.org/10.1080/01430750.2025.2609592

Rigo, F., Migliorini, M., & Pozzebon, A. (2024). Piezoelectric sensors as energy harvesters for ultra low-power IoT applications. *Sensors*, *24*(8), Article 2587. https://doi.org/10.3390/s24082587

Shaukat, H., Ali, A., Ali, S., Altabey, W. A., Noori, M., & Kouritem, S. A. (2023). Applications of sustainable hybrid energy harvesting: A review. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, *13*(4), Article 62. https://doi.org/10.3390/jlpea13040062

Shi, M., & Wang, X. (2020). Design of hybrid energy harvesting self-powered power supply for transmission line sensor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *440*(3), Article 032091. https://doi.org/10.1088/1755-1315/440/3/032091

Takács, P., Slíz-Balogh, J., Horváth, Á., Horváth, D., Jánosi, I. M., & Horváth, G. (2022). How the morning-afternoon cloudiness asymmetry affects the energy-maximizing azimuth direction of fixed-tilt monofacial solar panels. *Royal Society Open Science*, *9*(4), Article 211948. https://doi.org/10.1098/rsos.211948

Tshimbu, A. M., Zou, T., & Zhang, L. (2026). Cost-effective methodology for electrical characterization and interconnection analysis of triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, *159*, Article 112357. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2026.112357

Vázquez-Valdés, S. E., Argüelles-Lucho, P., Woo-García, R. M., Osorio-de-la-Rosa, E., López-Huerta, F., & Herrera-May, A. L. (2025). A CMOS-based power management circuit with a reconfigurable rectifier and an LDO regulator for piezoelectric energy harvesting in IoT applications. *Nanoenergy Advances*, *5*(2), Article 7. https://doi.org/10.3390/nanoenergyadv5020007

Wang, L., Song, Y., Xu, W., Li, W., Jin, Y., Gao, S., Yang, S., Wu, C., Wang, S., & Wang, Z. (2021). Harvesting energy from high-frequency impinging water droplets by a droplet-based electricity generator. *EcoMat*, *3*(4), Article e12116. https://doi.org/10.1002/eom2.12116

Yang, W., Hao, G., Li, Z., Zhang, S., & Lu, L. (2025). Electromechanical behaviors of a PVDF beam-film coupled energy harvester under droplet impact. *PLOS ONE*, *20*(4), Article e0319751. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319751

Zărnescu, G.-C., Pîslaru-Dănescu, L., Popa, M., & Stamatin, I. (2026). A storage management system with supercapacitors for piezo–thermoelectric energy harvesting devices. *Micromachines*, *17*(6), Article 723. https://doi.org/10.3390/mi17060723