



Rancang bangun pemanfaatan aliran air hujan sebagai pembangkit listrik energi tambahan pada sistem PLTS

Faisal Firmansah¹ & Trinil Muktiningrum²

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kahuripan Kediri, Kediri, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received: August 31, 2026

Revised: September 06, 2026

Accepted: September 08, 2026

Available online: September 08, 2026

Kata Kunci:

PLTS, air hujan, generator DC, sistem hybrid, energi terbarukan, turbin air.

Keywords:

Solar Power Plant, rainwater energy, DC generator, hybrid system, renewable energy, water turbine.



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2026 by Author. Published by Pintarologi Media.

ABSTRAK

Pembangkit listrik tenaga surya memiliki keluaran yang sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya, sehingga kinerjanya menurun saat mendung dan hujan. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji pemanfaatan aliran air hujan sebagai sumber energi listrik tambahan yang terintegrasi dengan sistem tenaga surya. Metode eksperimen kuantitatif digunakan melalui perancangan prototipe, pengujian variasi debit, dan analisis tegangan, arus, serta daya. Sistem terdiri atas panel surya, turbin air, generator arus searah, konverter penaik tegangan, pengontrol pengisian, dan baterai 12 volt. Generator diuji pada debit 4, 6, 7, 9, dan 11 liter per menit. Pada debit tertinggi diperoleh 14,5 volt, 1 ampere, dan 14,5 watt. Pada kondisi gelap dengan hujan lebat, generator menghasilkan 15,18 watt ketika panel surya tidak menghasilkan daya. Hasil menunjukkan bahwa pemanfaatan aliran air hujan berpotensi membantu menjaga kontinuitas pengisian baterai ketika keluaran tenaga surya menurun.

ABSTRACT

Solar power generation is strongly affected by irradiance, causing its output to decrease during cloudy and rainy conditions. This study designed and evaluated a rainwater-flow energy conversion system as an auxiliary electrical source integrated with a solar power system. A quantitative experimental method was applied through prototype design, flow-rate testing, and analysis of voltage, current, and power.

The system consisted of a solar panel, water turbine, direct-current generator, step-up converter, charging controller, and 12-volt battery. The generator was tested at flow rates of 4, 6, 7, 9, and 11 liters per minute. At the highest flow rate, the generator produced 14.5 volts, 1 ampere, and 14.5 watts. Under dark and heavy-rain conditions, the rainwater generator supplied 15.18 watts while the solar panel produced no power. The findings showed that rainwater flow could provide complementary energy and support battery-charging continuity when solar output decreased. Prototype performance remained dependent on rainfall flow and requires further testing at larger scale and over longer periods.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang terus berkembang mendorong pemanfaatan sumber energi yang dapat diperbarui dan digunakan secara berkelanjutan. Pengembangan energi terbarukan juga penting karena sumber energi fosil memiliki keterbatasan serta menimbulkan dampak lingkungan selama proses pemanfaatannya. Indonesia memiliki potensi energi baru dan terbarukan yang besar karena kondisi geografis dan sumber daya alamnya beragam, sehingga pemanfaatan energi surya dan energi air menjadi dua pendekatan yang relevan untuk dikembangkan pada berbagai skala (Sianipar, 2024). Dalam konteks penyediaan energi listrik skala rumah tangga, teknologi yang sederhana, mudah dirakit, dan mampu memanfaatkan sumber energi yang tersedia di lingkungan sekitar menjadi penting karena dapat memperluas pemanfaatan energi terbarukan tanpa selalu bergantung pada sistem pembangkit berkapasitas besar.

Pembangkit listrik tenaga surya memanfaatkan sel fotovoltaik untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik arus searah. Sistem ini banyak diterapkan karena panel surya dapat dipasang secara modular dan diintegrasikan dengan perangkat penyimpanan energi. Meskipun demikian, kinerja panel

*Corresponding author

E-mail addresses: faisal.f@students.kahuripan.ac.id

surya tidak konstan karena keluaran listriknya sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari. Pada kondisi mendung dan hujan, penurunan intensitas cahaya menyebabkan tegangan, arus, dan terutama daya keluaran panel berkurang. Penelitian Gunoto dan Sofyan (2020) menunjukkan penerapan panel surya 100 Wp untuk kebutuhan penerangan, sedangkan kajian Muslim, Khotimah, dan Azhiimah (2020) menempatkan sistem fotovoltaik sebagai salah satu alternatif energi masa depan. Kedua rujukan tersebut menunjukkan potensi teknologi surya, tetapi karakter intermiten sumber cahaya tetap menjadi aspek yang perlu dikelola ketika sistem digunakan sebagai sumber energi utama.

Kondisi hujan menarik untuk dikaji karena pada saat keluaran panel surya berkurang, terdapat sumber energi lain yang justru meningkat, yaitu aliran air. Air hujan yang jatuh pada atap bangunan kemudian dialirkan melalui talang dan pipa pembuangan memiliki energi potensial dan kinetik yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan putaran mekanik. Anisa dan Erwanto (2024) membahas potensi pembangkit listrik tenaga air hujan untuk perangkat elektronik rumah tangga, sedangkan Kharisna, Fajri, dan Sugiono (2017) mengembangkan konsep Power Plant Microhydro at Home yang memanfaatkan atap rumah sebagai area tangkapan air sebelum air dialirkan menuju sistem pembangkit. Kedua konsep tersebut menunjukkan bahwa air hujan tidak hanya dapat dipandang sebagai limpasan yang harus dibuang, tetapi juga sebagai sumber energi berintensitas kecil yang dapat dimanfaatkan selama tersedia debit dan perbedaan ketinggian yang memadai.

Prinsip konversi energi air pada skala kecil telah banyak diterapkan melalui pembangkit mikrohidro dan pikohidro. Allkadri (2023) merancang miniatur pembangkit tenaga air untuk rumah tangga dan menunjukkan bahwa energi aliran dapat diubah menjadi energi mekanik melalui turbin, kemudian dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Anwar, Tamam, dan Kurniawan (2021) mengembangkan sistem hydrocat dengan turbin undershot dan generator arus searah yang dapat menyalakan beban lampu di bawah aliran air yang relatif stabil. Sementara itu, Astara, Setiawan, dan Dirgantara (2025) menggunakan generator arus searah 24 volt pada model pembangkit listrik tenaga air skala kecil dan melaporkan bahwa perubahan debit memengaruhi tegangan serta arus keluaran. Hasil-hasil tersebut menegaskan hubungan antara karakter aliran air, putaran turbin, dan keluaran listrik generator.

Selain debit, karakteristik mekanik turbin memengaruhi energi yang dapat diteruskan menuju generator. Luthfiyani, Resnaulita, Adzra, dan Kusumah (2024) menunjukkan bahwa ketinggian sumber air berkaitan dengan peningkatan tegangan dan arus pada pembangkit sederhana, sedangkan diameter kincir memengaruhi kecepatan rotasi. Dewangga, Kholis, Baskoro, dan Haryudo (2022) melaporkan bahwa jumlah sudu turbin berpengaruh terhadap kinerja generator karena konfigurasi sudu menentukan kemampuan turbin menerima momentum aliran. Pada skala yang lebih besar, Romadhon, Muljanto, dan Agustini (2024) menunjukkan bahwa kombinasi debit dan tinggi jatuh air menjadi dasar dalam menentukan potensi daya sistem pikohidro. Dengan demikian, variasi debit aliran air hujan pada penelitian ini dipilih sebagai variabel utama untuk menilai apakah perubahan kondisi aliran memberikan perubahan yang terukur pada tegangan, arus, dan daya generator.

Energi listrik dari generator air hujan tidak selalu langsung sesuai dengan kebutuhan pengisian baterai karena tegangan keluarannya berubah mengikuti kondisi aliran. Oleh sebab itu, sistem memerlukan perangkat pengondisi daya. Dewi, Almira, Syaharani, Rahmadiani, dan Radianto (2024) membahas penggunaan konverter buck-boost pada pembangkit listrik tenaga air sederhana untuk menjaga keluaran pada tingkat yang diperlukan. Pada penelitian ini digunakan modul MT3608 sebagai konverter penaik tegangan dan modul XH-M603 sebagai pengontrol pengisian baterai. Sumber data komponen yang digunakan dalam skripsi menyebutkan bahwa MT3608 merupakan konverter arus searah tipe boost dengan tegangan keluaran yang dapat disetel, sedangkan XH-M603 digunakan untuk menghubungkan atau memutus pengisian berdasarkan batas tegangan yang ditentukan (Components101, 2021; Electrobes, 2024; Xecor, 2024). Penggunaan pengontrol pengisian pada sistem energi terbarukan juga didukung oleh Dilla et al. (2022), yang menekankan fungsi pengaturan pengisian baterai pada sumber energi hybrid.

Pendekatan hybrid digunakan agar dua sumber energi dengan karakter yang berbeda dapat saling melengkapi. Ketika cuaca cerah, panel surya diharapkan menjadi sumber utama. Ketika intensitas cahaya menurun bersamaan dengan terjadinya hujan, aliran air dapat digunakan untuk menggerakkan generator sehingga tetap tersedia sumber listrik tambahan. Muslimin et al. (2021) mengembangkan sistem hybrid pembangkit listrik tenaga surya dan mikrohidro, sedangkan Kurniawan et al. (2022) membahas perencanaan pembangkit listrik hybrid mikrohidro-surya pada daerah terpencil. Penelitian tersebut menunjukkan relevansi integrasi dua sumber energi, namun penelitian ini mengambil pendekatan yang lebih sederhana dan berorientasi prototipe rumah tangga dengan memanfaatkan aliran air hujan dari talang sebagai sumber energi tambahan langsung pada saat performa panel surya menurun.

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan penelitian difokuskan pada bagaimana merancang sistem pemanfaatan aliran air hujan yang dapat diintegrasikan dengan pembangkit listrik tenaga surya, bagaimana perubahan debit memengaruhi keluaran generator arus searah, dan bagaimana kombinasi

kedua sumber bekerja pada kondisi cuaca yang berbeda. Penelitian ini bertujuan merancang dan merealisasikan prototipe sistem hybrid panel surya dan generator air hujan, mengukur hubungan debit aliran dengan tegangan, arus, dan daya generator, serta mengevaluasi kontribusi generator air hujan terhadap kontinuitas suplai energi ke baterai ketika keluaran panel surya menurun. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan sistem energi terbarukan skala kecil yang memanfaatkan dua kondisi alam yang saling melengkapi, yaitu penyinaran matahari dan hujan.

Secara konseptual, pemanfaatan sumber energi yang dapat diperbarui diarahkan untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi yang terbatas dan mendukung pembangunan yang berkelanjutan. Mawardi (2022) menjelaskan energi terbarukan sebagai energi yang bersumber dari proses alam yang tersedia secara berulang, sedangkan Lubis (2007) menempatkan pengembangan energi terbarukan sebagai bagian dari pembangunan berkelanjutan. Dalam penelitian ini, konsep tersebut diterapkan pada dua sumber yang tersedia di lingkungan bangunan, yaitu radiasi matahari dan aliran air hujan. Pemilihan keduanya didasarkan pada sifat operasinya yang saling melengkapi secara temporal: tenaga surya lebih tersedia ketika kondisi cerah, sedangkan aliran air hujan muncul ketika cuaca hujan menurunkan intensitas cahaya yang diterima panel.

2. METODE

Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Kegiatan perancangan, pembuatan prototipe, pengujian, pengolahan data, dan penyusunan laporan dilakukan pada Januari sampai Mei 2026. Lokasi pengujian berada di Desa Margahurip, Kecamatan Banjaran, Kabupaten Bandung, Jawa Barat. Prototipe ditempatkan pada teras rumah dengan area terbuka agar panel surya memperoleh paparan cahaya yang tidak terhalang. Pengambilan data utama dilakukan pada kondisi hujan aktual, sedangkan pengujian generator juga menggunakan variasi debit yang ditentukan untuk memperoleh hubungan antara besarnya aliran dan keluaran listrik. Objek penelitian bukan responden manusia, melainkan kondisi aliran air dan respons sistem pembangkit yang dirancang.

Sistem dirancang sebagai pembangkit listrik hybrid dengan panel surya sebagai sumber energi utama dan generator arus searah yang digerakkan turbin air sebagai sumber tambahan. Air hujan yang tertampung di atap dialirkan melalui talang dan pipa menuju turbin. Aliran air menghasilkan putaran mekanik pada turbin dan putaran tersebut diteruskan ke generator arus searah 24 volt. Energi listrik keluaran generator kemudian masuk ke konverter penaik tegangan MT3608. Setelah tegangan dinaikkan ke tingkat yang diperlukan, keluaran masuk ke modul XH-M603 yang berfungsi mengontrol proses pengisian baterai 12 volt. Pada jalur panel surya, energi dari panel dialirkan melalui solar charge controller sebelum masuk ke baterai yang sama. Konfigurasi keseluruhan sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Konsep rancangan sistem hybrid panel surya dan generator air hujan

Prinsip kerja sistem dibedakan menjadi jalur tenaga surya, jalur generator air hujan, dan kondisi operasi hybrid. Pada jalur tenaga surya, panel mengubah energi cahaya menjadi listrik arus searah, kemudian solar charge controller mengatur pengisian baterai. Pada jalur air hujan, aliran air memutar turbin, generator mengubah putaran menjadi listrik, tegangan dinaikkan oleh MT3608, lalu modul XH-

M603 mengatur sambungan pengisian ke baterai. Saat cuaca cerah, kontribusi utama berasal dari panel surya. Saat hujan dan intensitas cahaya menurun, generator air hujan diharapkan memberikan tambahan energi. Kedua sumber tidak dimaksudkan untuk selalu menghasilkan daya yang sama, melainkan bekerja sesuai ketersediaan sumber energi pada kondisi cuaca yang berlangsung.

Tabel 1. Parameter, satuan, dan instrumen pengukuran

Parameter	Simbol	Satuan	Instrumen/Metode
Tegangan keluaran generator	Vg	Volt (V)	Multimeter digital
Arus keluaran generator	Ig	Ampere (A)	Multimeter digital
Daya keluaran generator	Pg	Watt (W)	Perhitungan $P = V \times I$
Tegangan keluaran step-up	Vs	Volt (V)	Multimeter digital
Tegangan baterai	Vb	Volt (V)	Multimeter digital
Arus pengisian baterai	Ib	Ampere (A)	Multimeter digital
Debit aliran air	Q	L/menit	Gelas ukur dan stopwatch
Putaran turbin (opsional)	n	rpm	Tachometer
Kondisi cuaca	-	Cerah/mendung/hujan	Observasi

Instrumen utama yang digunakan meliputi multimeter digital, stopwatch, gelas ukur, panel surya 100 Wp, turbin air, generator arus searah, konverter penaik tegangan MT3608, modul XH-M603, baterai 12 volt 7 Ah, serta kabel dan konektor. Multimeter digunakan untuk mengukur tegangan dan arus, sedangkan debit ditentukan menggunakan volume air dan waktu alir. Parameter penelitian dirangkum pada Tabel 1. Daya listrik tidak diukur sebagai besaran terpisah, melainkan dihitung dari hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan Persamaan (1).

$$P = V \times I \quad (1)$$

Pada Persamaan (1), P adalah daya dalam watt, V adalah tegangan dalam volt, dan I adalah arus dalam ampere. Analisis dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan perubahan tegangan, arus, dan daya pada setiap variasi debit. Pengaruh debit tidak dinilai menggunakan uji statistik inferensial karena penelitian berfokus pada karakteristik keluaran prototipe pada skenario pengujian yang ditentukan. Data hasil pengukuran disajikan dalam tabel dan grafik untuk memperlihatkan kecenderungan perubahan keluaran generator.

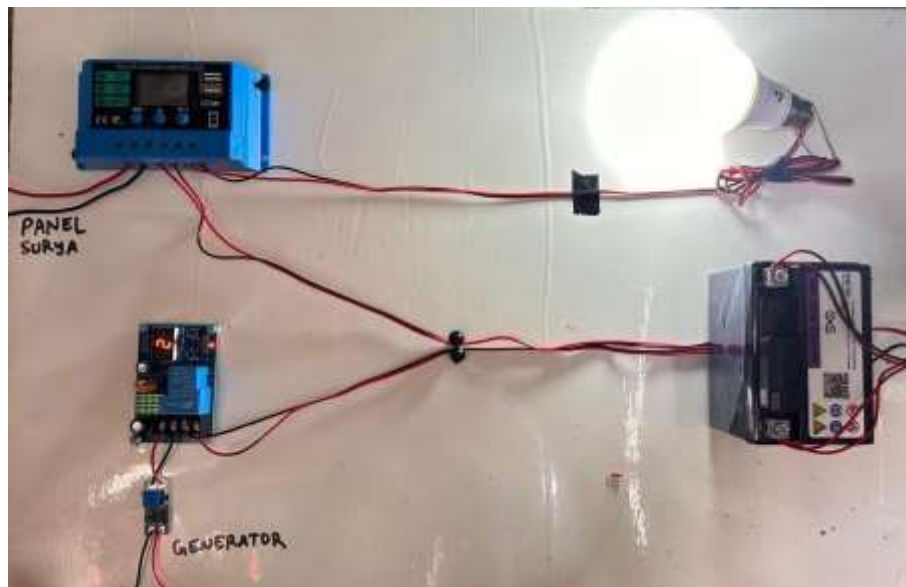
Pengujian dibagi menjadi tiga tahap. Pengujian pertama dilakukan pada panel surya dari pukul 09.00 sampai 13.00 WIB dengan interval satu jam untuk memperoleh tegangan, arus, dan daya pada kondisi pencahayaan yang diamati. Pengujian kedua dilakukan pada generator air hujan menggunakan lima variasi debit, yaitu 4, 6, 7, 9, dan 11 liter per menit. Variasi tersebut dipilih sebagai sampel purposif untuk mengetahui respons generator mulai dari debit rendah hingga debit tertinggi pada skenario prototipe. Pengujian ketiga dilakukan pada sistem hybrid ketika panel surya dan generator air hujan terhubung ke sistem penyimpanan yang sama. Empat kondisi yang diamati adalah panas tanpa hujan, panas dengan hujan ringan, mendung dengan hujan sedang, dan gelap dengan hujan lebat.

Keberhasilan prototipe tidak hanya ditentukan oleh besarnya daya, tetapi juga oleh keterhubungan fungsi antar komponen. Sistem dinilai berfungsi apabila aliran air mampu memutar turbin, generator menghasilkan listrik yang dapat diukur, konverter dapat menaikkan tegangan pada kondisi masukan yang mencukupi, modul XH-M603 dapat mengontrol jalur pengisian, dan baterai dapat menerima energi dari jalur generator. Pada tingkat sistem, indikator utama adalah kemampuan panel surya dan generator air hujan untuk memberikan kontribusi sesuai kondisi sumbernya. Kriteria tersebut digunakan sebagai dasar evaluasi fungsional karena penelitian berfokus pada pembuktian konsep dan karakteristik keluaran prototipe, bukan pada optimasi efisiensi komponen secara menyeluruh.

Pengujian hybrid kemudian digunakan untuk melihat interaksi kedua sumber pada kondisi cuaca yang berbeda. Variabel bebas pada pengujian panel surya adalah intensitas cahaya yang diamati melalui kondisi cuaca, sedangkan pada pengujian generator variabel bebasnya adalah debit air. Pada pengujian hybrid, kondisi cuaca dan debit air menjadi faktor yang berubah, sementara kinerja sistem dinilai melalui keluaran panel, keluaran generator, daya total, serta kemampuan jalur pengisian bekerja menuju baterai. Matriks pengujian ini mengikuti rancangan penelitian pada skripsi, yang memisahkan evaluasi sumber surya, sumber air hujan, dan sistem gabungan agar kontribusi masing-masing sumber dapat dibaca secara lebih jelas.

Pada pengujian panel surya, kondisi pencahayaan dicatat bersamaan dengan tegangan dan arus sehingga perubahan daya dapat dikaitkan dengan kondisi cerah atau mendung pada waktu pengukuran. Pengujian generator dilakukan secara terpisah agar pengaruh debit air dapat diamati tanpa tercampur dengan kontribusi panel surya. Setiap variasi debit diarahkan menuju turbin, kemudian tegangan dan arus

keluaran generator dicatat dan digunakan untuk menghitung daya. Pendekatan ini memungkinkan respons generator diamati dari kondisi ketika putaran belum menghasilkan keluaran terukur hingga kondisi debit tertinggi dalam skenario prototipe. Dengan cara tersebut, data generator dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan kapan jalur air hujan mulai memberikan kontribusi yang berarti terhadap sistem. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi, pengukuran, dokumentasi, dan studi literatur. Observasi digunakan untuk memastikan bahwa rangkaian bekerja sesuai alur yang direncanakan, mulai dari masuknya aliran air ke turbin, terjadinya putaran mekanik, keluaran generator, proses pengondisian tegangan, hingga pengisian baterai. Pengukuran dilakukan menggunakan multimeter digital pada titik-titik yang relevan untuk memperoleh tegangan generator, arus generator, tegangan baterai, dan arus pengisian. Debit aliran ditentukan dengan bantuan gelas ukur dan stopwatch, sedangkan dokumentasi berupa foto serta catatan pengujian digunakan sebagai bukti pelaksanaan dan untuk mendukung penelusuran kembali kondisi setiap skenario. Studi literatur digunakan untuk membandingkan rancangan dan hasil pengujian dengan penelitian mengenai pembangkit air skala kecil, sistem tenaga surya, pengontrol pengisian, dan sistem hybrid.



Gambar 2. Prototipe sistem hybrid panel surya dan generator air hujan



Gambar 3. Prototipe PLTS



Gambar 4. Turbin yang di pakai

Kriteria keberhasilan sistem ditetapkan berdasarkan fungsi tiap bagian. Turbin harus dapat berputar ketika menerima aliran air, generator harus menghasilkan keluaran listrik yang dapat diukur, konverter penaik tegangan harus dapat meningkatkan tegangan pada kondisi keluaran yang mencukupi, modul XH-M603 harus dapat mengontrol pengisian, dan baterai harus dapat menerima energi dari jalur generator. Pada tingkat sistem, panel surya dan generator air hujan diharapkan dapat beroperasi sebagai sumber yang saling melengkapi. Foto prototipe pada Gambar 2 menunjukkan konfigurasi panel surya, pengontrol, jalur generator, baterai, dan beban yang digunakan selama pengujian.

Pemilihan sistem penyimpanan 12 volt mengikuti konfigurasi prototipe yang digunakan. Baterai berfungsi menyimpan energi dari panel surya maupun generator air hujan agar energi yang dihasilkan tidak harus langsung digunakan oleh beban. Berdasarkan landasan teori pada skripsi, baterai 12 volt memerlukan tegangan pengisian yang lebih tinggi daripada tegangan nominalnya, dengan kisaran pengisian 13,8-14,4 volt yang dirujuk dari Linden dan Reddy (2011). Prinsip penyimpanan energi pada sistem tenaga surya juga dibahas dalam buku Pembangkit Listrik Tenaga Surya Institut Teknologi PLN (2021). Oleh sebab itu, jalur generator dilengkapi konverter penaik tegangan dan pengontrol pengisian agar tegangan yang berubah akibat variasi debit dapat disesuaikan sebelum masuk ke baterai.

Modul XH-M603 digunakan sebagai pengontrol pengisian otomatis. Data spesifikasi yang dicantumkan dalam skripsi menunjukkan tegangan kerja 6-60 volt arus searah, rentang pengukuran 0-99,9 volt, pengendalian cut-in dan cut-off otomatis, kapasitas relay hingga 30 ampere, serta akurasi pengukuran sekitar $\pm 0,1$ volt (Components101, 2024; Electrobes, 2024). Modul MT3608 digunakan sebagai konverter boost dengan tegangan masukan 2-24 volt dan keluaran yang dapat disetel sekitar 5-28 volt, arus keluaran maksimum 2 ampere, frekuensi switching sekitar 1,2 MHz, dan efisiensi konversi yang dicantumkan hingga sekitar 93% pada sumber komponen (Components101, 2021; Xecor, 2024). Spesifikasi tersebut menjadi dasar pemilihan perangkat pada prototipe, bukan hasil pengukuran efisiensi oleh penelitian ini.

Konfigurasi dua jalur pengisian juga mengikuti gagasan pengelolaan sumber energi hybrid, yaitu mengondisikan masing-masing sumber sebelum energinya masuk ke penyimpanan yang sama. Wauran, Mamahit, dan Lisi (2020) membahas manajemen energi pada hybrid power system, sementara Universitas Siliwangi (2022) menempatkan penyimpanan energi sebagai bagian penting dari sistem hybrid panel surya. Rancang bangun kombinasi tenaga surya dan tenaga air juga tercantum pada kajian Politeknik Negeri Ujung Pandang (2023) dan Uranus Journal (2023). Pada level sistem panel surya-baterai, Azuatalam et al. (2019) menunjukkan bahwa implementasi manajemen energi perlu mempertimbangkan sumber, kebutuhan

komputasi, kualitas data, dan degradasi baterai. Penelitian ini belum mencapai tahap optimasi tersebut, tetapi menggunakan arsitektur dasar yang memisahkan pengondisian daya dari sumber surya dan generator air sebelum keduanya berkontribusi pada baterai.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian panel surya menunjukkan bahwa keluaran daya berubah mengikuti kondisi pencahayaan selama periode pengukuran. Data lengkap disajikan pada Tabel 2. Pada pukul 09.00, kondisi cerah menghasilkan tegangan 12,8 volt, arus 1,1 ampere, dan daya 14,08 watt. Ketika kondisi berubah menjadi mendung pada pukul 10.00, tegangan turun menjadi 12,3 volt dan arus menjadi 0,9 ampere sehingga daya berkurang menjadi 11,07 watt. Pada pukul 11.00 kondisi kembali cerah dan daya meningkat menjadi 13,00 watt. Nilai terendah terjadi pada pukul 12.00 ketika cuaca mendung, yaitu 11,6 volt, 0,9 ampere, dan 10,44 watt. Pengukuran pukul 13.00 pada kondisi cerah menghasilkan daya tertinggi sebesar 15,10 watt.

Tabel 2. Hasil pengukuran panel surya

Waktu	Kondisi	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
09.00	Cerah	12,8	1,1	14,08
10.00	Mendung	12,3	0,9	11,07
11.00	Cerah	13,0	1,0	13,00
12.00	Mendung	11,6	0,9	10,44
13.00	Cerah	13,8	1,1	15,10

Rentang hasil pengujian panel surya memperlihatkan fungsi kondisi cuaca sebagai faktor penting dalam sistem. Penurunan dari 15,10 watt pada kondisi cerah menjadi 10,44 watt pada kondisi mendung memperlihatkan bahwa daya yang tersedia untuk pengisian baterai dapat berubah dalam periode yang relatif singkat. Temuan ini sesuai dengan karakter sistem fotovoltaiik yang bergantung pada energi cahaya. Dalam rancangan hybrid, perubahan keluaran tersebut menjadi alasan teknis untuk menambahkan sumber energi yang tersedia saat kondisi hujan. Tujuannya bukan menggantikan panel surya, tetapi mengurangi kondisi ketika suplai energi hanya bergantung pada satu sumber yang sedang mengalami penurunan.

Hasil pengujian generator menunjukkan kecenderungan yang lebih jelas karena debit air sengaja divariasikan. Pada debit 4 liter per menit, generator belum menghasilkan tegangan dan arus yang terukur. Keluaran mulai muncul pada debit 6 liter per menit dengan tegangan 1,9 volt dan arus 0,1 ampere sehingga daya tercatat 0,19 watt. Pada debit 7 liter per menit, tegangan meningkat menjadi 7,05 volt, arus 0,5 ampere, dan daya 3,55 watt. Peningkatan debit menjadi 9 liter per menit menghasilkan 12,1 volt, 0,8 ampere, dan 9,68 watt. Nilai tertinggi diperoleh pada debit 11 liter per menit dengan 14,5 volt, 1 ampere, dan 14,5 watt. Data tersebut dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengukuran generator arus searah pada variasi debit

Debit (L/menit)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
4	0	0	0
6	1,9	0,1	0,19
7	7,05	0,5	3,55
9	12,1	0,8	9,68
11	14,5	1,0	14,50

Dari perspektif integrasi dengan baterai, keluaran pada debit rendah juga menunjukkan alasan penggunaan pengondisi tegangan. Tegangan 1,9 volt pada debit 6 liter per menit dan 7,05 volt pada debit 7 liter per menit masih berada jauh di bawah tegangan pengisian baterai 12 volt yang digunakan pada sistem. Pada debit yang lebih tinggi, keluaran generator menjadi lebih dekat dengan kebutuhan jalur pengisian, tetapi tetap berubah mengikuti kondisi aliran. Oleh karena itu, fungsi konverter penaik tegangan dan pengontrol pengisian bukan untuk menambah energi yang tidak tersedia, melainkan untuk menyesuaikan tegangan keluaran generator agar dapat digunakan oleh rangkaian pengisian ketika kondisi masukan telah mencukupi. Evaluasi efisiensi konverter tidak dilakukan dalam penelitian ini sehingga pembahasan dibatasi pada fungsi pengondisian yang teramati pada prototipe.

Nilai nol pada debit 4 liter per menit menjadi temuan penting bagi operasi prototipe. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberadaan aliran belum otomatis menghasilkan keluaran listrik yang dapat diukur; aliran harus mampu menghasilkan putaran mekanik yang memadai untuk menggerakkan generator. Ketika debit meningkat, kemampuan sistem melewati kondisi awal tersebut juga meningkat. Karena penelitian tidak mencatat putaran turbin pada setiap variasi debit, batas minimum operasi belum dapat dinyatakan dalam satuan kecepatan rotasi atau torsi. Pengukuran putaran pada penelitian selanjutnya akan membantu

menjelaskan titik mulai generator menghasilkan tegangan, sekaligus membedakan pengaruh turbin, sambungan mekanik, dan karakter generator terhadap keluaran listrik.

Perubahan keluaran antar variasi debit menunjukkan bahwa peningkatan performa generator tidak terjadi dalam besaran yang sama pada setiap tahap. Setelah keluaran mulai terukur pada debit 6 liter per menit, kenaikan debit menjadi 7 liter per menit diikuti peningkatan tegangan dari 1,9 menjadi 7,05 volt dan daya dari 0,19 menjadi 3,55 watt. Pada debit 9 liter per menit, tegangan mencapai 12,1 volt dan daya 9,68 watt, sedangkan debit 11 liter per menit menghasilkan 14,5 volt dan 14,5 watt. Pola tersebut memperlihatkan peningkatan monoton pada rentang pengujian, tetapi data yang tersedia belum cukup untuk menyimpulkan bentuk hubungan matematis tertentu karena hanya terdapat lima titik debit dan tidak dilakukan pengulangan statistik pada setiap kondisi.



Gambar 5. Hubungan debit aliran terhadap tegangan, arus, dan daya generator

Gambar 3 memperlihatkan bahwa ketiga parameter keluaran meningkat ketika debit diperbesar. Hubungan tersebut dapat dijelaskan melalui bertambahnya energi aliran yang diterima turbin. Semakin besar debit, semakin besar kemampuan aliran menghasilkan putaran mekanik pada kondisi prototipe, sehingga generator dapat menghasilkan tegangan dan arus yang lebih tinggi. Keluaran nol pada debit 4 liter per menit juga menunjukkan bahwa terdapat kondisi minimum pada sistem mekanik sebelum putaran yang terjadi cukup untuk menghasilkan listrik yang terukur. Penelitian ini tidak mengukur torsi awal, kecepatan putaran pada setiap debit, maupun efisiensi turbin, sehingga nilai ambang tersebut belum dapat dijelaskan secara kuantitatif. Namun, pola data memberikan jindikasi bahwa performa generator sangat sensitif terhadap ketersediaan aliran.

Kecenderungan hasil tersebut sejalan dengan Astara, Setiawan, dan Dirgantara (2025), yang menunjukkan bahwa perubahan debit pada model pembangkit air dengan generator arus searah 24 volt memengaruhi tegangan dan arus keluaran. Luthfiyani et al. (2024) juga melaporkan keterkaitan karakter aliran dan ketinggian sumber dengan keluaran pembangkit sederhana. Sementara itu, Dewangga et al. (2022) menekankan bahwa konfigurasi sudu memengaruhi kecepatan putaran dan keluaran generator. Dibandingkan penelitian-penelitian tersebut, prototipe ini secara khusus menempatkan aliran air hujan dari bangunan sebagai sumber mekanik dan mengintegrasikannya dengan panel surya. Dengan demikian, hasil pengujian tidak hanya menunjukkan kemampuan pembangkit air skala kecil, tetapi juga menunjukkan relevansi sumber tersebut sebagai pasangan operasi bagi sistem surya pada saat hujan.

Pada debit tertinggi, keluaran 14,5 volt dari generator berada pada tingkat yang lebih mendekati kebutuhan jalur pengisian baterai 12 volt dibandingkan keluaran pada debit rendah. Meskipun demikian, sistem tetap menggunakan konverter penaik tegangan karena keluaran generator berubah mengikuti aliran. Konverter berfungsi menyesuaikan tegangan sebelum masuk ke modul pengontrol pengisian. Pada pengujian sistem hybrid, penggunaan step-up terlihat terutama pada kondisi hujan sedang dan hujan lebat. Pengondisian tersebut penting karena sumber mekanik dari air hujan bersifat tidak stabil dan dapat berubah seiring perubahan intensitas hujan. Dewi et al. (2024) menunjukkan fungsi konverter pada pembangkit air sederhana, sedangkan Dilla et al. (2022) menekankan pentingnya pengendalian pengisian pada sistem sumber energi hybrid.

Hasil pengujian sistem hybrid disajikan pada Tabel 4. Pada kondisi panas tanpa hujan, generator tidak menghasilkan daya dan seluruh keluaran berasal dari panel surya sebesar 15,4 watt. Ketika terjadi

hujan ringan pada kondisi masih panas, daya panel surya turun menjadi 11,34 watt. Generator menghasilkan tegangan 4,4 volt dengan arus 0,1 ampere dan daya 0,5 watt; pada kondisi ini keluaran generator belum dapat dinaikkan melalui step-up sesuai catatan pengujian. Daya total yang tercatat menjadi 11,84 watt. Pada kondisi mendung dengan hujan sedang, daya panel surya turun lebih jauh menjadi 6,3 watt, sedangkan tegangan generator 8,51 volt dinaikkan menjadi 13,8 volt melalui step-up. Arus generator tercatat 0,5 ampere dan daya generator 6,9 watt, sehingga daya total sistem menjadi 13,2 watt.

Tabel 4. Hasil pengukuran sistem hybrid pada kondisi cuaca berbeda

Kondisi	Daya panel surya (W)	Tegangan generator (V)	Arus generator (A)	Daya generator (W)	Daya total (W)
Panas, tidak hujan	15,4	0	0	0	15,4
Panas, hujan ringan	11,34	4,4 (belum dapat di-step-up)	0,1	0,5	11,84
Mendung, hujan sedang	6,3	8,51; setelah step-up 13,8	0,5	6,9	13,2
Gelap, hujan lebat	0	12,5; setelah step-up 13,8	1,1	15,18	15,18

Pada kondisi gelap dengan hujan lebat, panel surya tidak menghasilkan daya, tetapi generator air hujan menghasilkan tegangan 12,5 volt yang dinaikkan menjadi 13,8 volt setelah melewati step-up. Arus yang tercatat sebesar 1,1 ampere dengan daya 15,18 watt. Daya total sistem pada kondisi ini sama dengan daya generator karena kontribusi panel surya bernilai nol. Pola perubahan pada empat kondisi tersebut memperlihatkan karakter sumber yang saling melengkapi: ketika intensitas cahaya berkurang, daya panel cenderung turun, sedangkan peningkatan intensitas hujan menyediakan debit yang lebih besar bagi turbin. Pada kondisi paling gelap, seluruh suplai yang terukur berasal dari jalur air hujan. Hasil ini merupakan bukti fungsi konsep hybrid pada prototipe, meskipun nilai keluaran masih bergantung pada kondisi sesaat selama pengujian.

Jika dibandingkan dengan pengujian panel surya saja, data hybrid menunjukkan bahwa tambahan generator menjadi paling relevan pada kondisi ketika keluaran panel berkurang secara signifikan. Pada hujan ringan, kontribusi generator masih kecil karena debit belum menghasilkan keluaran yang memadai. Pada hujan sedang, kontribusi generator meningkat dan dapat mengompensasi sebagian penurunan panel. Pada hujan lebat dan kondisi gelap, generator menjadi satu-satunya sumber yang menghasilkan daya. Kondisi ini menjawab tujuan utama integrasi, yaitu menjaga adanya jalur suplai energi ketika kinerja sumber surya menurun. Konsep tersebut konsisten dengan pendekatan hybrid surya-mikrohidro yang dikembangkan oleh Muslimin et al. (2021) dan Kurniawan et al. (2022), walaupun skala dan sumber air pada penelitian ini lebih sederhana karena menggunakan aliran air hujan dari pembuangan rumah.

Dari sisi rancangan listrik, penggunaan baterai yang sama memungkinkan kedua sumber berkontribusi terhadap penyimpanan energi pada waktu yang berbeda. Saat panel surya aktif, energi melewati solar charge controller; saat generator air hujan aktif, energi melewati konverter penaik tegangan dan modul XH-M603. Susunan tersebut memisahkan jalur pengondisian sesuai karakter sumber sebelum energi masuk ke media penyimpanan. Penggunaan pengontrol pengisian diperlukan untuk mencegah proses pengisian berlangsung tanpa batas tegangan. Penelitian ini belum melakukan analisis degradasi baterai, efisiensi konverter, atau optimasi manajemen energi, sehingga hasil hanya menunjukkan fungsi dasar integrasi. Kajian Azuatalam et al. (2019) menunjukkan bahwa pengelolaan sistem panel surya-baterai perlu mempertimbangkan implementasi praktis, kebutuhan komputasi, kualitas data masukan, dan degradasi baterai, sehingga pengembangan berikutnya perlu memasukkan kondisi penyimpanan sebagai bagian dari evaluasi sistem secara keseluruhan.

Dari sisi pemanfaatan sumber air, hasil penelitian menunjukkan adanya peluang sekaligus batasan. Peluang utama adalah penggunaan aliran yang sudah tersedia pada sistem talang tanpa memerlukan sumber air permanen. Sistem dapat bekerja pada saat hujan, yaitu kondisi yang secara bersamaan menurunkan keluaran panel surya. Akan tetapi, kontinuitas generator bergantung sepenuhnya pada kejadian hujan dan debit aktual. Jika hujan tidak terjadi atau debit terlalu kecil, turbin tidak memberikan keluaran yang berarti. Hal tersebut berbeda dengan mikrohidro pada sungai atau saluran irigasi yang dapat memiliki aliran lebih stabil. Karena itu, generator air hujan pada rancangan ini lebih tepat diposisikan sebagai sumber tambahan, bukan sebagai sumber utama.

Skala prototipe juga membatasi interpretasi terhadap potensi energi pada bangunan nyata. Penelitian belum menghitung luas atap, intensitas curah hujan, tinggi jatuh efektif, rugi-rugi aliran pada pipa, efisiensi turbin, efisiensi generator, maupun efisiensi konverter secara menyeluruh. Pengambilan data

utama dilakukan dalam periode pengujian yang terbatas dan belum mencakup variasi musim. Karena parameter tersebut belum tersedia, hasil daya prototipe tidak dapat langsung diekstrapolasi menjadi produksi energi tahunan atau nilai keekonomian pada rumah tinggal. Namun, pengujian memberikan dasar eksperimental bahwa aliran air hujan dapat menghasilkan keluaran listrik terukur dan dapat diintegrasikan dengan jalur pengisian baterai pada sistem tenaga surya.

Perbaikan desain dapat diarahkan pada sisi hidrolik, mekanik, dan listrik. Pada sisi hidrolik, pengujian pada variasi tinggi jatuh dan debit yang lebih luas diperlukan untuk menentukan kondisi operasi efektif. Pada sisi mekanik, bentuk serta jumlah sudu turbin dapat dioptimalkan sesuai temuan Dewangga et al. (2022), sedangkan pengukuran putaran dan torsi akan membantu menghitung efisiensi konversi. Pada sisi listrik, generator dengan efisiensi lebih tinggi, pengondisi daya yang sesuai dengan rentang tegangan rendah, dan sistem manajemen energi berbasis mikrokontroler dapat digunakan untuk memantau tegangan, arus, daya, dan kondisi baterai secara waktu nyata. Pengujian jangka panjang pada rumah, sekolah, atau fasilitas umum yang memiliki area tangkapan hujan memadai juga diperlukan untuk menilai manfaat sistem pada kondisi operasional sesungguhnya.

Karakter keluaran generator pada penelitian ini juga dapat dipahami dari prinsip generator arus searah. Martua (2021) membahas karakteristik luar dan efisiensi generator arus searah, sedangkan Junaidi (2020) menjelaskan perancangan generator arus searah dengan penggerak mekanik. Pada sistem air, Maulana, Ramdani, dan Ekaputri (2017) menunjukkan bahwa pengaturan aliran berpengaruh terhadap kestabilan keluaran mikrohidro. Temuan-temuan tersebut mendukung interpretasi bahwa perubahan debit pada prototipe tidak hanya mengubah energi air yang masuk, tetapi pada akhirnya menentukan kondisi putaran generator dan keluaran listrik yang dapat diukur. Penelitian lanjutan perlu menambahkan pengukuran putaran turbin dan generator agar hubungan debit, kecepatan rotasi, dan daya dapat dianalisis secara lebih kuantitatif.

Dari sisi sumber utama, panel surya yang digunakan tetap berperan penting karena sistem air hujan hanya dapat bekerja ketika tersedia aliran. Prinsip kerja panel surya dan konfigurasi pembangkit tenaga surya dijelaskan dalam sumber Institut Teknologi PLN (2021) dan UKI Toraja (2022), sedangkan Universitas Ekasakti (2022) membahas posisi energi matahari sebagai sumber energi masa depan. Karena itu, nilai tambah prototipe bukan terletak pada penggantian sistem tenaga surya, tetapi pada pemanfaatan kondisi hujan sebagai kesempatan untuk menghasilkan energi tambahan. Pendekatan ini sejalan dengan tujuan sistem hybrid, yaitu meningkatkan pemanfaatan sumber daya yang tersedia pada kondisi operasi yang berbeda tanpa mengubah panel surya sebagai sumber utama prototipe.

4. SIMPULAN

Penelitian berhasil merancang dan merealisasikan prototipe pemanfaatan aliran air hujan sebagai sumber energi listrik tambahan pada sistem tenaga surya dengan menggunakan turbin air, generator arus searah 24 volt, konverter penaik tegangan MT3608, modul pengontrol pengisian XH-M603, baterai 12 volt, dan panel surya. Pengujian generator menunjukkan bahwa peningkatan debit dari 4 hingga 11 liter per menit diikuti peningkatan tegangan, arus, dan daya; nilai tertinggi pada skenario pengujian diperoleh pada debit 11 liter per menit sebesar 14,5 volt, 1 ampere, dan 14,5 watt. Pengujian hybrid menunjukkan bahwa ketika kondisi berubah dari panas tanpa hujan menuju hujan yang lebih intens, kontribusi panel surya menurun sedangkan kontribusi generator air hujan meningkat. Pada kondisi gelap dengan hujan lebat, panel surya tidak menghasilkan daya dan generator menyediakan 15,18 watt. Hasil tersebut menunjukkan bahwa aliran air hujan dapat berfungsi sebagai sumber energi pelengkap untuk membantu menjaga kontinuitas suplai ke baterai ketika keluaran panel surya menurun. Penerapan hasil penelitian masih dibatasi oleh skala prototipe, ketergantungan pada debit hujan, pengujian yang belum dilakukan dalam jangka panjang, serta belum adanya analisis efisiensi menyeluruh. Pengembangan selanjutnya disarankan mencakup optimasi turbin dan generator, pengujian variasi tinggi jatuh dan curah hujan yang lebih beragam, pemantauan berbasis mikrokontroler, serta evaluasi energi dan efisiensi sistem pada bangunan nyata.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kahuripan Kediri, dosen pembimbing, serta pihak-pihak yang telah memberikan dukungan selama perancangan, pembuatan prototipe, pengujian, dan penyusunan penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

Allkadri, S. I. (2023). Rancang bangun miniatur pembangkit listrik tenaga air untuk rumah tangga. *Journal of Electrical Network Systems and Sources (ENTRIES)*, 2(1), 8-14.

- Anisa, Z., & Erwanto. (2024). Potensi pembangkit listrik tenaga air hujan (PLTAH) sebagai sumber energi listrik piranti elektronik rumah tangga. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 15(2), 1053-1065.
- Anwar, S., Tamam, M. T., & Kurniawan, I. H. (2021). Rancang bangun sistem pembangkit listrik tenaga air menggunakan konsep hydrocat. *RESISTOR (Elektronika Kendali Telekomunikasi Tenaga Listrik Komputer)*, 4(1), 7-10.
- Astara, Y., Setiawan, A. B., & Dirgantara, W. (2025). Model PLTA skala kecil dengan generator DC 24 volt. *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Teknik (JURRITEK)*, 4(2), 451-463. <https://doi.org/10.55606/jurritek.v4i2.6094>
- Azuatalam, D., Paridari, K., Ma, Y., Förstl, M., Chapman, A. C., & Verbič, G. (2019). Energy management of small-scale PV-battery systems: A systematic review considering practical implementation, computational requirements, quality of input data and battery degradation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 555-570.
- Components101. (2021). *MT3608 - 2A DC-DC step up (boost) power module*. Components101.
- Components101. (2024). *XH-M603 battery charge control module*. Components101.
- Dewangga, Y. A., Kholis, N., Baskoro, F., & Haryudo, S. I. (2022). Pengaruh jumlah sudu turbin air terhadap kinerja generator pembangkit listrik tenaga air. *Jurnal Teknik Elektro*, 11(1), 71-76.
- Dewi, P. K., Almira, A. J., Syaharani, A., Rahmadiani, N. A., & Radianto, D. O. (2024). Pembahasan perhitungan matematis dan simulasi project buck-boost converter dengan penerapan pada PLTA sederhana. *KOLONI: Jurnal Multidisiplin Ilmu*, 3(2), 65-72.
- Dilla, B., Wilyanti, S., Antono, Z. M., Widi, B., Jaenul, A., & Pangestu, A. (2022). Implementasi solar charge controller untuk pengisian baterai dengan menggunakan sumber energi hybrid pada sepeda motor listrik. *Jurnal Edukasi Elektro*, 6(2), 128-135.
- Electrobes. (2024). *XH-M603 battery charge control module user guide*. Electrobes.
- Gunoto, P., & Sofyan, S. (2020). Perancangan pembangkit listrik tenaga surya 100 Wp untuk penerangan lampu di ruang selasar Fakultas Teknik Universitas Riau Kepulauan. *Sigma Teknik*, 3(2).
- Institut Teknologi PLN. (2021). *Buku pembangkit listrik tenaga surya (PLTS)*. Jakarta: Institut Teknologi PLN.
- Junaidi, M. (2020). Perancangan generator DC dengan penggerak mula motor AC sebagai free energi. *Jurnal Online Mahasiswa Bidang Teknik Elektro*.
- Kharisna, N., Fajri, A., & Sugiono, E. (2017). Power Plant Microhydro at Home (POPMIH). *Journal of Creativity Student*.
- Kurniawan, A., dkk. (2022). Perencanaan pembangkit listrik tenaga hybrid (PLTMH-PLTS) pada daerah terpencil. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*.
- Linden, D., & Reddy, T. B. (2011). *Handbook of batteries* (4th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Lubis, A. (2007). Energi terbarukan dalam pembangunan berkelanjutan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 8(2), 155-162.
- Luthfiyani, F., Resnaulita, A., Adzra, H. R., & Kusumah, F. H. (2024). Analisis pengaruh diameter kincir dan ketinggian sumber air terhadap tegangan dan arus pada PLTA sederhana. *Jurnal Penelitian Fisika dan Terapannya (Jupiter)*, 6(1), 33-37.
- Martua, M. (2021). Studi karakteristik luar dan efisiensi generator DC. *Jurnal Teknik*.
- Maulana, F. A., Ramdani, M., & Ekaputri, C. (2017). Prototipe kontrol aliran air berbasis mikrokontroler untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro. *eProceedings of Engineering*, 4(2).
- Mawardi, J. (2022). *Apa yang dimaksud energi terbarukan?* Institut Teknologi PLN. <https://infopmb.itpln.ac.id/sudah-paham-apa-yang-dimaksud-energi-terbarukan/>
- Muslim, S., Khotimah, K., & Azhiimah, A. N. (2020). Analisis kritis terhadap perencanaan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) tipe photovoltaic (PV) sebagai energi alternatif masa depan. *Rang Teknik Journal*, 3(1).
- Muslimin, M., dkk. (2021). Rancang bangun sistem hybrid pembangkit listrik tenaga surya dan mikrohidro. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (SNP2M)*.
- Politeknik Negeri Ujung Pandang. (2023). *Rancang bangun sistem hybrid pembangkit listrik tenaga surya dan pembangkit listrik tenaga air hujan*. Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Romadhon, M. I., Muljanto, W. P., & Agustini, N. P. (2024). Perancangan pembangkit listrik tenaga pikohidro di Desa Pendem, Kecamatan Junrejo, Kota Batu. *Jurnal Magnetika*, 8(2), 245-258.
- Sianipar, R. J. (2024). Analisis pemetaan potensi dan realisasi energi baru terbarukan di Indonesia. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 5(1), 1-12.
- UKI Toraja. (2022). *Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga surya dan panel surya*. Tana Toraja: Universitas Kristen Indonesia Toraja.
- Universitas Ekasakti. (2022). *Matahari sebagai energi masa depan*. Padang: Universitas Ekasakti.

- Universitas Siliwangi. (2022). *Landasan teori sistem hybrid PLTS dan penyimpanan energi*. Tasikmalaya: Universitas Siliwangi.
- Uranus Journal. (2023). Rancang bangun PLTS menggunakan sistem hybrid sebagai energi alternatif. *Uranus: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*.
- Wauran, A. M., Mamahit, D. J., & Lisi, F. (2020). Manajemen energi hybrid power system. *Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV)*.
- Xecor. (2024). *MT3608 datasheet, features, pinout, and applications*. Xecor.