

## ***Smart Low Head Picohydro System with QHBM Optimization for Rural Electrification and Innovation***

**Article History:**

Received

25 September 2025

Revised

8 October 2025

Accepted

19 November 2025

**ARIPRIHARTA<sup>1\*</sup>, MOKH. SHLIHUL HADI<sup>1</sup>, NANDANG MUFTI<sup>2</sup>, SATIA NUR MAHARANI<sup>3</sup>, MUHAMMAD CAHYO BAGASKORO<sup>1</sup>, SASMITA BAGUS SANG KESUMA ANANTA<sup>1</sup>, PRIA EKA RESWANA<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering and Informatics, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia

<sup>2</sup>Department of Physics, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia

<sup>3</sup>Department of Accounting, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia

Email: \*[aripriharta.ft@um.ac.id](mailto:aripriharta.ft@um.ac.id)

### **ABSTRAK**

*Studi ini mengembangkan sistem picohydro cerdas bertekanan rendah untuk elektifikasi pedesaan, dioptimalkan menggunakan algoritma Queen Honey Bee Migration (QHBM). Sistem mencakup turbin propeller, generator axial, pengontrol pengisian, inverter, dan baterai. QHBM mengoptimalkan parameter multiobjektif seperti debit air, tinggi jatuh (head), efisiensi sistem, daya keluaran, dan biaya energi untuk memperoleh performa teknis dan ekonomis terbaik. Sebagai pembanding digunakan Particle Swarm Optimization (PSO) yang dikenal cepat namun rentan terhadap solusi lokal. Hasil optimasi menunjukkan pada head 0,65 m, QHBM menghasilkan daya 546,68 W, lebih tinggi dari PSO (546,48 W) dan perhitungan manual (530 W), dengan konvergensi 50% lebih cepat. Sistem ini mendukung akses energi berkelanjutan dan terjangkau di wilayah off-grid serta berpotensi dikembangkan menjadi startup energi terbarukan.*

**Kata kunci:** Smart Picohydro, Ketinggian Rendah, QHBM, Optimasi Energi, Elektrifikasi Pedesaan

### **ABSTRACT**

*This study develops a low-head smart picohydro system for rural electrification optimized using the Queen Honey Bee Migration (QHBM) algorithm. The system includes a propeller turbine, axial generator, charge controller, inverter, and battery. QHBM optimizes flow rate, head, system efficiency, output power, and energy cost to achieve the best technical and economic performance. For comparison, Particle Swarm Optimization (PSO) is used, known for its fast convergence but prone to local optima. Results show that at a 0.65 m head, QHBM produces 546.68 W, higher than PSO (546.48 W) and manual calculation (530 W), with 50% faster convergence. The proposed system supports sustainable and affordable energy access for off-grid communities and offers potential for renewable energy startup innovation.*

**Keywords:** Smart Picohydro, Low Head, QHBM, PSO, Multi-objective Optimization, Rural Electrification

## 1. PENDAHULUAN

Mencapai emisi karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) nol bersih secara global merupakan hal yang esensial untuk memenuhi target suhu Perjanjian Paris, yang memerlukan inovasi teknologi dan reformasi struktural di sektor-sektor utama yang menghasilkan emisi (**Kaya, dkk, 2019**). Ada konsensus yang semakin kuat bahwa tindakan mendesak diperlukan untuk membatasi pemanasan global di bawah  $2^\circ\text{C}$  (**Qian, dkk, 2022**). Sebagai respons, Kontribusi Nasional yang Ditentukan (NDC) Indonesia menargetkan pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) sebesar 29% pada tahun 2030 dibandingkan dengan skenario *Business as Usual* (BAU) (**Austin, dkk, 2018**). Target ini sebagian besar bergantung pada strategi mitigasi berbasis penggunaan lahan dan kehutanan (**Malahayati, dkk, 2021**). Namun, pencapaian target tersebut membutuhkan percepatan pemanfaatan energi terbarukan yang layak secara ekonomi, sehingga tidak hanya mendukung keberlanjutan lingkungan tetapi juga mampu membuka peluang bisnis baru di sektor energi bersih. Tantangan terbesar muncul di wilayah pedesaan dan terpencil, di mana keterbatasan akses listrik membuat masyarakat masih bergantung pada generator diesel yang mahal dan tidak ramah lingkungan (**MEMR, 2017**). Oleh karena itu, pengembangan sistem energi terbarukan yang efisien dan bernilai bisnis menjadi kebutuhan mendesak.

Beberapa negara telah membuktikan bahwa sistem pembangkit listrik tenaga air skala kecil mampu memberikan keuntungan teknis sekaligus ekonomi. Di Spanyol, penerapan pembangkit listrik *vortex* berbasis gravitasi terbukti mampu meningkatkan efisiensi konversi energi tekanan rendah dan memberikan potensi investasi lokal (**Ayala-Chauvin, dkk, 2022**). Di Laos, pembangunan pembangkit listrik tenaga air menjadi pendorong ekonomi, tetapi tetap memerlukan kajian biaya dan manfaat yang matang agar layak secara finansial (**Coskun, dkk, 2023**). Di Lithuania, pengoperasian pembangkit tenaga air kecil menghasilkan energi terbarukan yang bernilai pasar tinggi namun tetap memerlukan pengelolaan ekosistem sungai yang baik (**Cesoniene, dkk, 2021**). Sementara itu, di Filipina, pengembangan pembangkit air kecil dilakukan dengan mempertimbangkan aspek bisnis, lingkungan, dan keberlanjutan lanskap (**Torrefranca, dkk, 2022**).

Indonesia telah mengalami peningkatan kapasitas energi terbarukan dengan total 17,22 MW tenaga surya (**Paundra, dkk, 2022**). Selain itu, terdapat potensi energi geothermal sebesar 2.130,7 MW, biomassa sebesar 2.200 MW, dan tenaga air sebesar 6.283,3 MW (**Aripriharta, dkk, 2024**). Namun, pada praktiknya banyak usaha kecil dan menengah (UMKM) di Indonesia masih bergantung pada generator diesel karena harga dan ketersediaannya yang dianggap stabil (**Irwansyah, dkk, 2020**). Kondisi ini menimbulkan peluang bisnis besar bagi teknologi alternatif seperti sistem picohydro bertekanan rendah yang mampu menyediakan listrik dengan biaya operasional jauh lebih rendah. Dengan potensi sumber air melimpah dan curah hujan tinggi di sebagian besar wilayah, sistem picohydro tidak hanya berperan sebagai solusi energi tetapi juga memiliki prospek pasar yang luas untuk pengembangan model bisnis berbasis komunitas atau *startup* energi hijau (**Aripriharta, dkk, 2023**).

Strategi pengembangan sistem ini diarahkan untuk mengoptimalkan berbagai parameter seperti laju aliran, daya keluaran, biaya sistem, dan pengurangan karbon agar dapat menghasilkan kinerja terbaik dengan nilai keekonomian tinggi (**Aripriharta, dkk, 2023**). Sistem yang diusulkan tidak hanya mendukung pembangkitan energi bersih yang terdesentralisasi tetapi juga membuka peluang bisnis baru, terutama di sektor elektrifikasi pedesaan dan industri *startup* energi terbarukan. Dalam konteks bisnis, biaya investasi yang rendah, komponen yang dapat diproduksi lokal, serta biaya operasi minimal menjadikan sistem ini menarik untuk dikembangkan sebagai produk komersial berkelanjutan.

Di negara-negara berkembang, penerapan teknologi picohydro juga menawarkan potensi ekonomi yang menjanjikan, terutama untuk daerah dengan debit air rendah dan ketinggian air terbatas. Teknologi ini dinilai sederhana, mudah di replikasi, dan memiliki nilai keekonomian tinggi karena mampu beroperasi dengan biaya pemeliharaan yang rendah (**Gallego, dkk, 2021**). Kesederhanaan dan skalabilitasnya membuat sistem ini cocok untuk dijadikan model bisnis lokal berbasis energi berkelanjutan, terutama bagi masyarakat pedesaan yang belum terjangkau jaringan listrik. Dalam konteks tersebut, pemilihan turbin menjadi faktor penting untuk menyesuaikan karakteristik aliran air dan efisiensi konversi energi (**Date, dkk, 2013**). Desain turbin tipe *Darrieus* dan *propeller* yang disederhanakan juga telah diteliti untuk pemanfaatan energi pada *head* rendah dengan efisiensi tinggi (**Shimokawa, dkk, 2012**). Selain itu, pengembangan turbin impuls modern menunjukkan adanya peluang baru dalam efisiensi konversi energi dan penerapan pada sistem berkapasitas kecil (**Zidonis, dkk, 2015**).

Untuk meningkatkan kinerja sistem, penelitian ini mengadopsi algoritma Queen Honey Bee Migration (QHBM), metode optimasi berbasis perilaku koloni lebah yang mampu menyesuaikan parameter sistem secara dinamis terhadap kondisi aliran air (**Aripriharta, dkk, 2020**). Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan daya maksimum dengan biaya energi rendah, sehingga sistem menjadi kompetitif secara ekonomi dan layak dikomersialisasikan. Selain memberikan manfaat teknis, QHBM juga meningkatkan kelayakan investasi proyek karena menghasilkan sistem yang efisien, stabil, dan mampu menekan biaya operasi jangka panjang (**Aripriharta, dkk, 2023**).

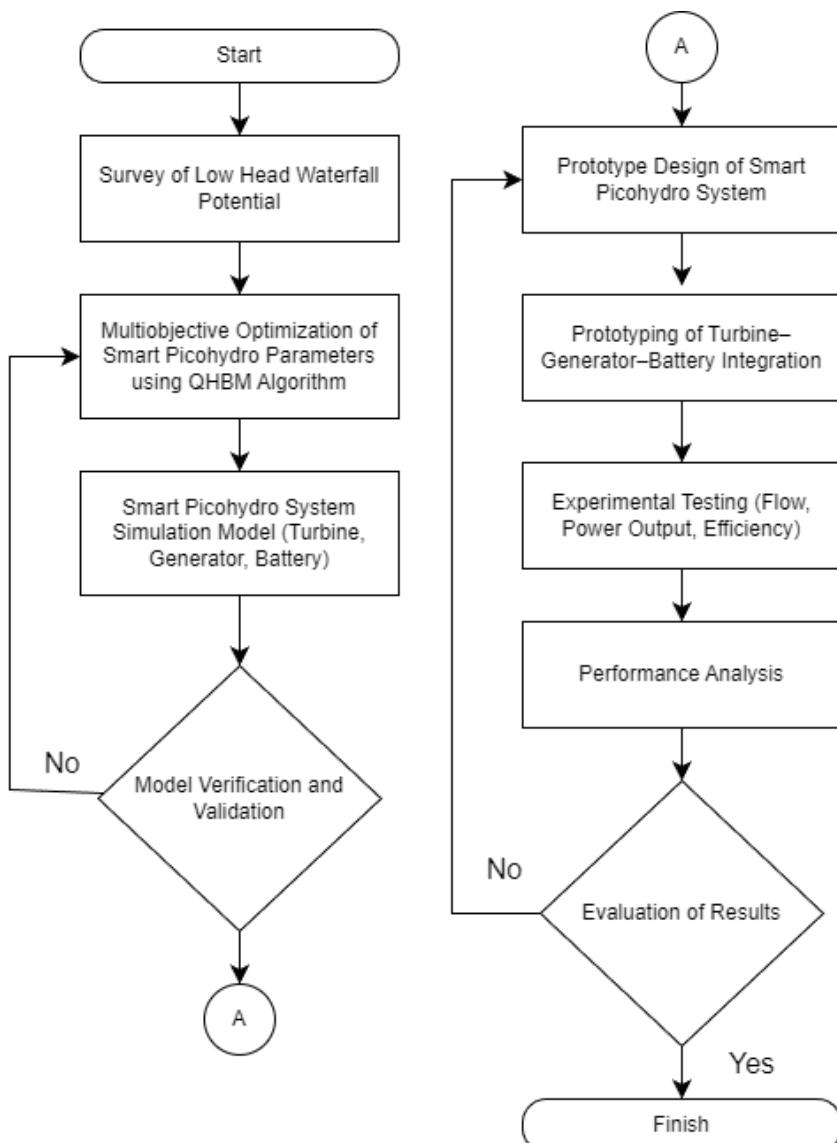
Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berfokus pada pengembangan teknologi *smart* picohydro bertekanan rendah dari sisi teknis, tetapi juga menekankan nilai bisnis yang dapat mendorong pertumbuhan *startup* energi hijau berbasis komunitas. Tujuan utama penelitian ini adalah mengoptimalkan sistem smart picohydro yang meliputi desain turbin propeller, generator aksial, dan sistem penyimpanan energi agar menghasilkan efisiensi tinggi, biaya energi rendah, serta peluang komersialisasi yang luas dalam konteks elektrifikasi pedesaan berkelanjutan di Indonesia.

## 2. METODE

Pada bagian ini, akan dijelaskan persiapan dari awal hingga akhir untuk seluruh sistem yang akan dibangun.

### 2.1 Deskripsi sistem

Metode ini menggunakan dua aplikasi, yaitu aplikasi eksperimental dan metode optimasi QHBM, yang akan dijelaskan pada Gambar 1 berikut ini.

**Gambar 1. Diagram Alir Picohydro**

Gambar 1 menunjukkan kerangka metodologi yang digunakan dalam penelitian ini, yang terbagi menjadi dua tahapan utama. Tahapan pertama meliputi survei lokasi untuk memperoleh data debit air dan tinggi jatuh (*head*), dilanjutkan dengan pemodelan daya potensial dan penyusunan fungsi objektif multi-kriteria. Parameter yang dioptimalkan mencakup debit air (*Q*), *head* (*H*), efisiensi sistem ( $\eta$ ), daya keluaran (*Pout*), serta biaya energi (COE). Selanjutnya dilakukan proses optimasi multiobjektif menggunakan algoritma QHBM. Algoritma ini meniru perilaku migrasi koloni lebah ratu dalam mencari lokasi terbaik, dengan proses iteratif yang melibatkan pencarian global dan lokal untuk menemukan kombinasi parameter paling optimal. Hasil optimasi QHBM kemudian dibandingkan dengan algoritma PSO dan perhitungan manual untuk validasi performa.

Tahap kedua adalah perancangan dan pengujian prototipe, yang mencakup pembuatan sistem fisik sesuai hasil optimasi, uji performa daya dan efisiensi, serta analisis hasil terhadap target optimasi. Metode ini menjamin keseimbangan antara hasil simulasi komputasional dan validasi eksperimental, sehingga sistem picohydro yang dihasilkan memiliki efisiensi tinggi dan dapat diterapkan secara berkelanjutan.

## 2.2 Potensi debit air sungai dengan ketinggian air rendah

Dalam pengembangan sistem pembangkit listrik picohidro ini, kami memanfaatkan bagian hilir sungai (**Leite, 2023**). Prinsip yang diterapkan dalam pengembangan sistem ini adalah bahwa semakin tinggi jatuhnya air, semakin besar energi potensial air yang dapat diubah menjadi energi listrik. Potensi pembangkitan dapat diketahui melalui Persamaan (1).

$$Q = (y \times h) \times \frac{x}{t} \quad (1)$$

Dalam Persamaan (1),  $Q$  adalah simbol untuk debit air ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Kemudian, dari Persamaan (1) di mana  $y$  adalah lebar sungai (m),  $h$  adalah kedalaman air (m),  $x$  adalah panjang aliran air (m), dan  $t$  adalah waktu (s), rumus ini berkaitan dengan teori dasar yang terkait dengan pembangkit listrik mikrohidro yang memanfaatkan energi potensial air yang jatuh (*head*) (**Triyono, dkk, 2024**).

## 2.3 Potensi Energi Air

Energi potensial air adalah pemanfaatan energi air yang jatuh dari ketinggian tertentu (**Williamson, dkk, 2014**). Potensi ini harus diperhitungkan untuk mengukur daya dan kapasitas yang dapat dihasilkan dengan debit air yang tersedia. Karena turbin tipe propeler menggunakan titik air terjun yang rendah dan dirancang pada sudut 30 derajat, debit air juga mempengaruhi tekanan di turbin tipe propeler (**Williamson, dkk, 2012**). Untuk mengetahui potensi daya yang dapat dihasilkan, dapat dihitung dengan Persamaan (2).

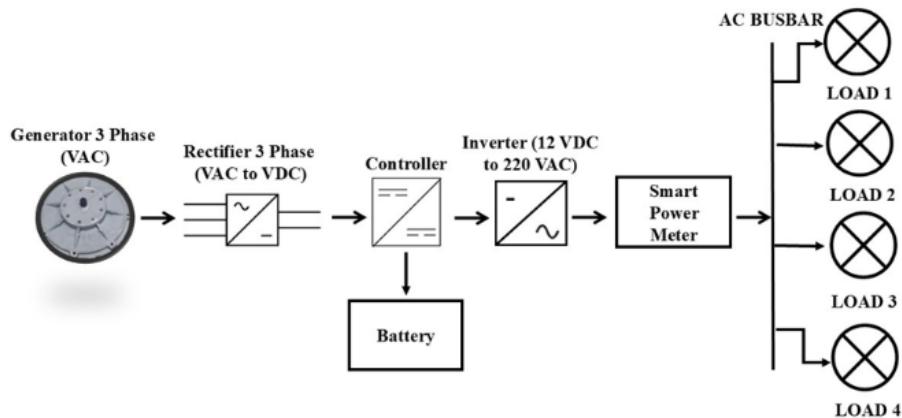
$$Pt = Q \times P_{water} \times g \times H \times \eta_T \quad (2)$$

Dalam perhitungan potensi daya pada sistem pembangkit listrik tenaga air, digunakan Persamaan (2) di mana  $Pt$  merupakan total daya yang dihasilkan dalam satuan Watt,  $Q$  adalah debit aliran air ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $P_{water}$  adalah densitas air yang umumnya bernilai  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $g$  adalah percepatan gravitasi sebesar  $9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $H$  adalah tinggi jatuh (head) air dalam meter, dan  $\eta_T$  merupakan efisiensi total dari sistem turbin dan generator. Persamaan ini menunjukkan bahwa daya keluaran sangat dipengaruhi oleh besarnya debit air, tinggi jatuh air, serta efisiensi sistem mekanik dan elektrik. Dalam konteks penelitian ini, rumus tersebut digunakan untuk memperkirakan daya yang dapat dihasilkan oleh sistem *smart* picohydro pada kondisi *low head*, yang kemudian dijadikan sebagai dasar dalam proses optimasi menggunakan algoritma Queen Honey Bee Migration (QHBM) (**Aripriharta, dkk, 2024**).

Potensi ini harus diperhitungkan untuk mengukur daya dan kapasitas yang dapat dihasilkan dengan debit air yang tersedia. Karena turbin jenis ini memanfaatkan titik air terjun dan sudut aliran udara 30 derajat, debit air juga mempengaruhi tekanan pada turbin jenis propeler.

## 2.4 Desain potensial generator

Sistem ini berfokus pada kondisi aliran rendah, terjadi turbulensi yang menurunkan efisiensi konversi energi. Untuk mengatasi hal ini, sudut bilah turbin di optimasi agar aliran menjadi lebih terarah dan mendekati kondisi laminar sehingga kehilangan energi dapat diminimalkan. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2. Diagram sistem pembangkit listrik mikro hidro bertekanan rendah**

Gaya gerak listrik yang timbul pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik, atau berputar dengan kecepatan yang sinkron dengan kecepatan putaran rotor (**Boroomandnia, dkk, 2022**). Tegangan keluaran generator dipengaruhi oleh karakteristik desain dan kondisi operasi sistem. Untuk menghitung tegangan keluaran yang diharapkan (**Adhau, 2009**), desain generator disesuaikan dengan hasil optimasi debit dan head agar efisiensi sistem maksimum, di mana parameter desain seperti jumlah lilitan, fluks magnet, dan luas permukaan magnet dihitung menggunakan Persamaan (3)–(6).

$$E_0 = \sqrt{2\pi} \times f \times N_{turn} \times K_w \times r \times q \times \theta_m \quad (3)$$

Dalam Persamaan (3) di atas, ditemukan bahwa  $f$  adalah frekuensi (Hz),  $N_{turn}$  adalah jumlah lilitan kawat yang ditumpuk,  $K_w$  adalah faktor lilitan 1,  $r$  adalah jumlah lapisan setiap kumparan,  $q$  adalah jumlah kumparan,  $\theta_m$  dan adalah fluks magnetik (Wb). Dari rumus yang digunakan dalam perhitungan untuk desain generator radial 1 fasa. Untuk mengetahui kekuatan magnet dapat dilihat pada Persamaan (4) (**Hydro, 2022**).

$$B_{max} = \frac{(B_r + I_m)}{(I_m + \delta)} \quad (4)$$

Persamaan (4) menunjukkan bahwa  $B_{max}$  adalah fluks magnetik maksimum (T),  $B_r$  adalah densitas fluks (T),  $I_m$  adalah tinggi magnet (m),  $\delta$  dan adalah lebar celah udara (m). Untuk menentukan luas permukaan magnet dapat dilihat pada Persamaan (5) (**Gunadi, dkk, 2022**).

$$A_m = \pi(r_0^2 + r_1^2) - \tau_f(r_0 - r_1) \frac{N_w}{N_m} \quad (5)$$

Berdasarkan Persamaan (5),  $A_m$  diketahui bahwa adalah luas magnet ( $m^2$ ),  $r_0$  adalah jari-jari luar magnet (m),  $r_1$  adalah jari-jari dalam magnet (m),  $\tau_f$  adalah jarak antara magnet (m), dan  $N_w$  adalah jumlah magnet. Untuk menentukan fluks maksimum dalam magnet, dapat dihitung menggunakan Persamaan (6) (**Dametew, 2016**).

$$\theta_{max} = A_{magnet} \times B_{max} \quad (6)$$

Dalam Persamaan (6), dapat dilihat bahwa  $\theta_{max}$  adalah fluks maksimum (Wb),  $A_{magnet}$  adalah luas magnetik ( $m^2$ ), dan  $B_{max}$  adalah fluks magnetik maksimum (T).

## 2.5 Battery Charging

Baterai digunakan untuk menyimpan energi listrik hasil konversi turbin. Perhitungan kapasitas dilakukan agar sistem mampu menyuplai beban secara stabil pada kondisi *off-grid*. Dalam penelitian ini, digunakan jenis baterai *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA). Baterai ini digunakan untuk menyimpan daya yang dihasilkan oleh generator. Untuk baterai-baterai ini, terdapat perhitungan kapasitas baterai yang bertujuan untuk menentukan kapasitas dan waktu pengisian baterai. Perhitungan tersebut dapat dilihat berdasarkan Persamaan (7) (**Barsi, dkk, 2019**).

$$SoC = SoC(t - 1) + \left( \frac{i}{\mu_n} \right) \times \Delta t \times 100 \quad (7)$$

Pengisian baterai dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satu faktor yang berpengaruh adalah faktor suhu. Suhu merupakan faktor utama yang memengaruhi perkiraan SOC awal (**Vázquez-Fernández, 2002**). Dari faktor-faktor ini yang memengaruhi setiap pengisian baterai, hal ini menyebabkan perbedaan atau keterlambatan pada setiap pengisian baterai.

## 2.6 Multi-objective Function

### Cost of Energy

Untuk dukungan lainnya, terdapat kriteria yang harus dipenuhi, yaitu biaya energi atau *Cost of Energy* (COE). Biaya energi ini merupakan jumlah uang yang harus dibayarkan untuk setiap 1 kWh (**Fitriana, dkk, 2021**) Perhitungan nilai COE picohydro dapat dilakukan menggunakan Persamaan berikut. Dalam sistem energi terbarukan, baterai merupakan komponen yang penting. Dalam penelitian ini, digunakan Persamaan (8) (**Akbar, dkk, 2023; Umar, dkk, 2015**).

$$COE = \frac{C_{annual} \times CRF}{\sum_{d=1}^{365} W_s} \quad (8)$$

### Payback Period

Dalam penerapan energi terbarukan baru, terdapat biaya investasi awal (**Isa, dkk, 2021**). Di sinilah investasi dihitung agar dapat mengembalikan biaya investasinya dalam jangka waktu tertentu. Perhitungan nilai masa pengembalian investasi dapat dilihat pada Persamaan (9) berikut :

$$Payback Period = \frac{\text{Investment Cost}}{(COE \times Consumption Energy \times 365 \text{ day})} \quad (9)$$

### Carbon Emission

Emisi dasar adalah emisi GRK yang akan terjadi jika pembangkit listrik tenaga air berbasis sungai tidak dibangun dan dioperasikan. Dalam skenario tanpa pembangkit listrik tenaga air, wilayah tersebut diperkirakan akan bergantung pada listrik jaringan (**Mishra, dkk, 2015**). Oleh karena itu, emisi dasar dihitung dengan mengalikan produksi listrik bersih dari langkah-langkah mitigasi dengan Faktor Emisi GRK Sistem Listrik. Selain itu, analisis emisi dasar ini sangat penting untuk mengevaluasi efektivitas proyek EHP dalam mengurangi emisi GRK dan mendukung transisi ke energi yang lebih berkelanjutan. Hitung emisi karbon dengan Persamaan (10) :

$$EB_y = PL_y \times FEG_y \quad (10)$$

Untuk  $EB_y$  adalah emisi dasar pada periode  $y$  (ton CO<sub>2</sub>), yang merupakan total emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari sistem energi konvensional atau baseline scenario sebelum implementasi teknologi energi terbarukan atau sistem yang lebih efisien pada tahun tersebut.

$PL_y$  adalah jumlah energi listrik bersih yang disuplai oleh sistem listrik pada periode  $y$  (MWh) dan  $FEG_y$  adalah faktor emisi gas rumah kaca (GRK) dari sistem listrik pada periode  $y$  (tCO<sub>2</sub>/MWh). Kemudian, untuk menghitung pengurangan mitigasi dengan Persamaan (11) ketentuan tindakan mitigasi emisi pada periode  $y$  (ton CO<sub>2</sub>) sama dengan 0 (**Rachmawatie, 2024**):

$$PE_y = EB_y - EP_y \quad (10)$$

Kemudian  $PE_y$  adalah pengurangan emisi akibat tindakan mitigasi pada periode  $y$  (ton CO<sub>2</sub>),  $EB_y$  adalah emisi dasar, dan  $EP_y$  adalah emisi akibat tindakan mitigasi. Dengan memahami perbandingan emisi antara skenario dengan dan tanpa proyek, kita dapat mengambil keputusan yang lebih terinformasi dalam perencanaan dan pengembangan sumber energi terbarukan (**Kurnial, dkk, 2025**).

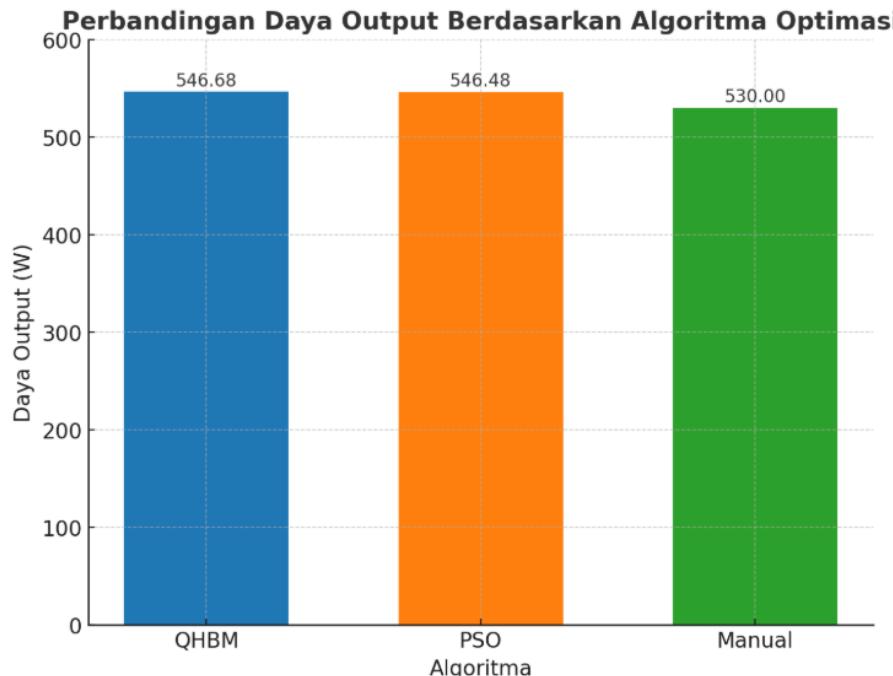
## 2.7 Multi-objective Function

Untuk membandingkan kinerja algoritma QHBM, penelitian ini juga menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) dengan parameter dan fungsi objektif yang sama. PSO bekerja dengan menginisialisasi sekumpulan partikel yang merepresentasikan solusi, memperbarui posisi dan kecepatan partikel berdasarkan pengalaman individu (pbest) dan global (gbest) (**Tyagi, dkk, 2024**). Proses iterasi dilakukan hingga kriteria konvergensi tercapai. Hasil akhir dari PSO kemudian dibandingkan dengan QHBM berdasarkan daya keluaran, efisiensi, dan kecepatan konvergensi. Pembandingan ini dilakukan untuk memastikan hasil QHBM lebih unggul dalam menemukan solusi optimal secara global dan lebih cepat dalam waktu komputasi.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Hasil Optimasi QHBM pada Sistem Smart Picohydro

Algoritma Queen Honey Bee Migration (QHBM) diterapkan untuk mengoptimalkan parameter sistem picohydro, termasuk debit air, efisiensi turbin, dan daya keluaran listrik. Berdasarkan hasil simulasi, sistem menghasilkan daya maksimum sebesar 546,68 W pada ketinggian head 0,65 m dengan debit air 0,11 m<sup>3</sup>/s. Hasil ini sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan optimasi menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) yang menghasilkan daya 546,48 W pada parameter yang sama, dan juga lebih tinggi dari hasil perhitungan manual sebesar 530 W. Keunggulan QHBM terletak pada kemampuan adaptifnya dalam memetakan sektor-sektor pencarian yang sesuai dengan dinamika aliran air, memungkinkan penyesuaian posisi scout bees terhadap arah dan kecepatan arus. Penyesuaian ini meningkatkan efisiensi konversi energi mekanik menjadi energi listrik. Perbandingan daya keluaran dari ketiga pendekatan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.

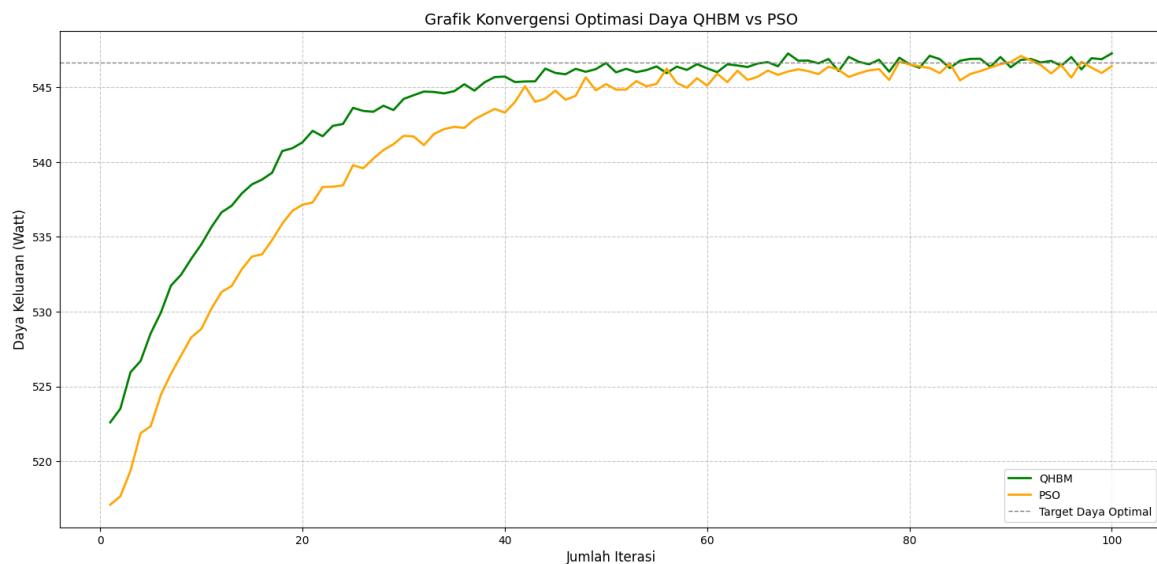
**Gambar 3. Hasil perbandingan daya keluaran QHBM vs PSO**

Hasil tersebut menunjukkan bahwa algoritma QHBM mampu memberikan performa optimasi yang lebih unggul dibandingkan dengan metode PSO dan pendekatan manual, terutama dalam konteks sistem picohydro dengan karakteristik aliran rendah. Perbedaan output daya sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3 menegaskan kapabilitas QHBM dalam mengeksplorasi ruang solusi secara adaptif dan efisien. Temuan ini memperkuat potensi QHBM sebagai pendekatan heuristik yang efektif dalam perancangan sistem energi terbarukan skala kecil, khususnya di wilayah pedesaan dengan keterbatasan infrastruktur energi konvensional.

**Tabel 1. Hasil Optimasi QHBM vs PSO**

Algoritma	Iterasi	Debit Air ( $m^3/s$ )	Head (m)	Daya Output (W)
QHBM	100	0.11	0.65	546.68
PSO	100	0.11	0.65	546.48
Manual	-	0.1076	0.65	530.00

Tabel 1 menyajikan hasil perbandingan optimasi daya keluaran sistem picohydro menggunakan algoritma QHBM, PSO, dan pendekatan manual. Pada iterasi ke-100, QHBM menghasilkan daya maksimum sebesar 546,68 W, sedikit lebih tinggi dibandingkan PSO yang menghasilkan 546,48 W pada parameter debit dan head yang sama, yaitu  $0,11\text{ m}^3/\text{s}$  dan 0,65 m. Sementara itu, pendekatan manual dengan debit aktual  $0,1076\text{ m}^3/\text{s}$  menghasilkan daya sebesar 530 W. Perbedaan hasil ini menunjukkan efektivitas algoritma QHBM dalam meningkatkan efisiensi sistem melalui mekanisme eksplorasi dan konvergensi yang adaptif.



**Gambar 4. Analisis Performa Konvergensi QHBM) dan PSO**

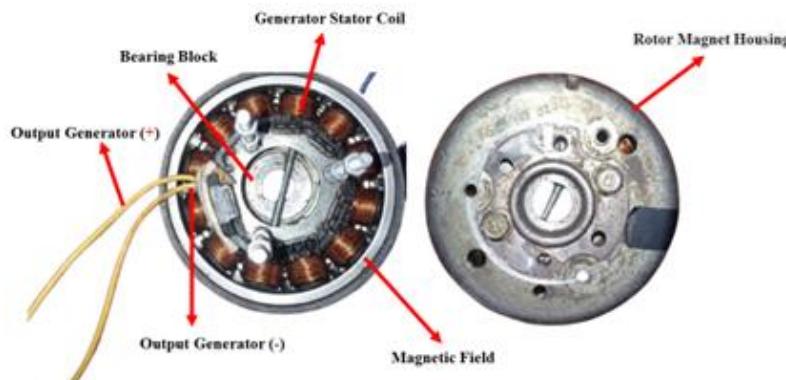
Gambar 4 menyajikan analisis performa konvergensi antara algoritma Queen Honey Bee Migration (QHBM) dan Particle Swarm Optimization (PSO) untuk optimasi daya keluaran. Hasil menunjukkan bahwa QHBM memiliki karakteristik konvergensi yang superior, dimana mencapai daya keluaran yang mendekati optimal yaitu pada iterasi 20 masih 542 W, sedangkan PSO memerlukan sekitar 40 iterasi untuk mencapai tingkat performa yang sama. Algoritma QHBM menunjukkan konvergensi awal yang cepat dari 523 W dengan gradien curam selama 15 iterasi pertama, diikuti stabilisasi bertahap menuju target optimal 547 W. Sebaliknya, PSO menunjukkan profil konvergensi yang lebih bertahap, dimulai dari 518 W dengan laju konvergensi yang lebih lambat sepanjang proses optimasi. Kedua algoritma menunjukkan stabilitas yang baik setelah iterasi ke-50 dengan osilasi minimal di sekitar nilai optimal. Analisis konvergensi mengindikasikan bahwa QHBM memberikan konvergensi sekitar 50% lebih cepat dibandingkan PSO, menunjukkan efisiensi komputasi yang superior dan kemampuan penemuan solusi yang lebih cepat untuk masalah optimasi yang diberikan.

### 3.2 Evaluasi Efisiensi Turbin dan Desain Generator

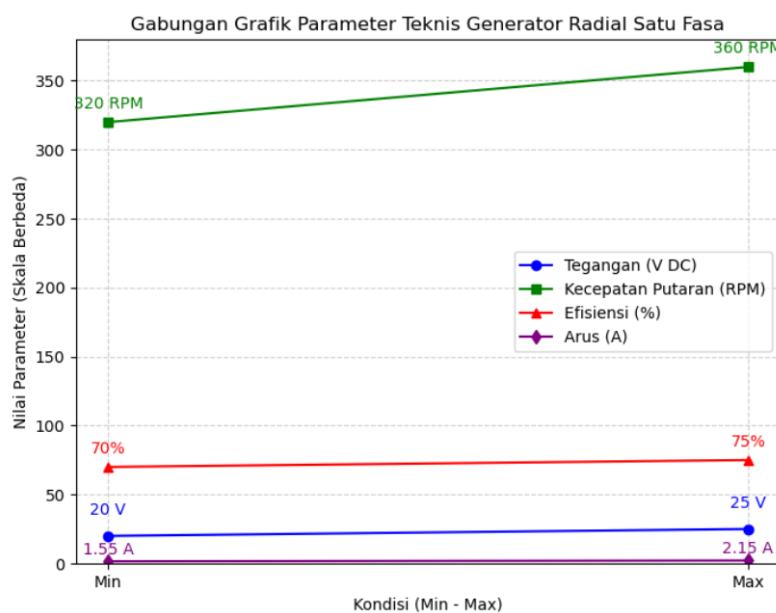
Turbin propeler yang dirancang dengan kemiringan sudut bilah sebesar  $30^\circ$  menunjukkan performa hidrolik yang cukup andal dalam menghadapi tekanan air yang relatif rendah, sesuai dengan karakteristik sistem picohydro tipe *low head*. Desain ini memungkinkan aliran air diarahkan secara efisien ke sudut serang bilah turbin, sehingga mampu memaksimalkan momen puntir yang diteruskan ke poros generator. Hasil pengujian menunjukkan bahwa efisiensi gabungan antara turbin dan generator mencapai 67%, yang termasuk kategori tinggi dalam konteks pemanfaatan energi terbarukan berskala kecil di daerah dengan ketinggian jatuh air terbatas. Dalam aspek konversi energi listrik, generator radial satu fasa yang digunakan mampu menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dalam rentang 19 hingga 22 volt DC, dengan kecepatan rotasi yang berkisar antara 320 hingga 360 RPM. Karakteristik performa ini mengindikasikan bahwa desain generator telah mampu mengikuti perubahan beban dan debit air secara responsif, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 2.

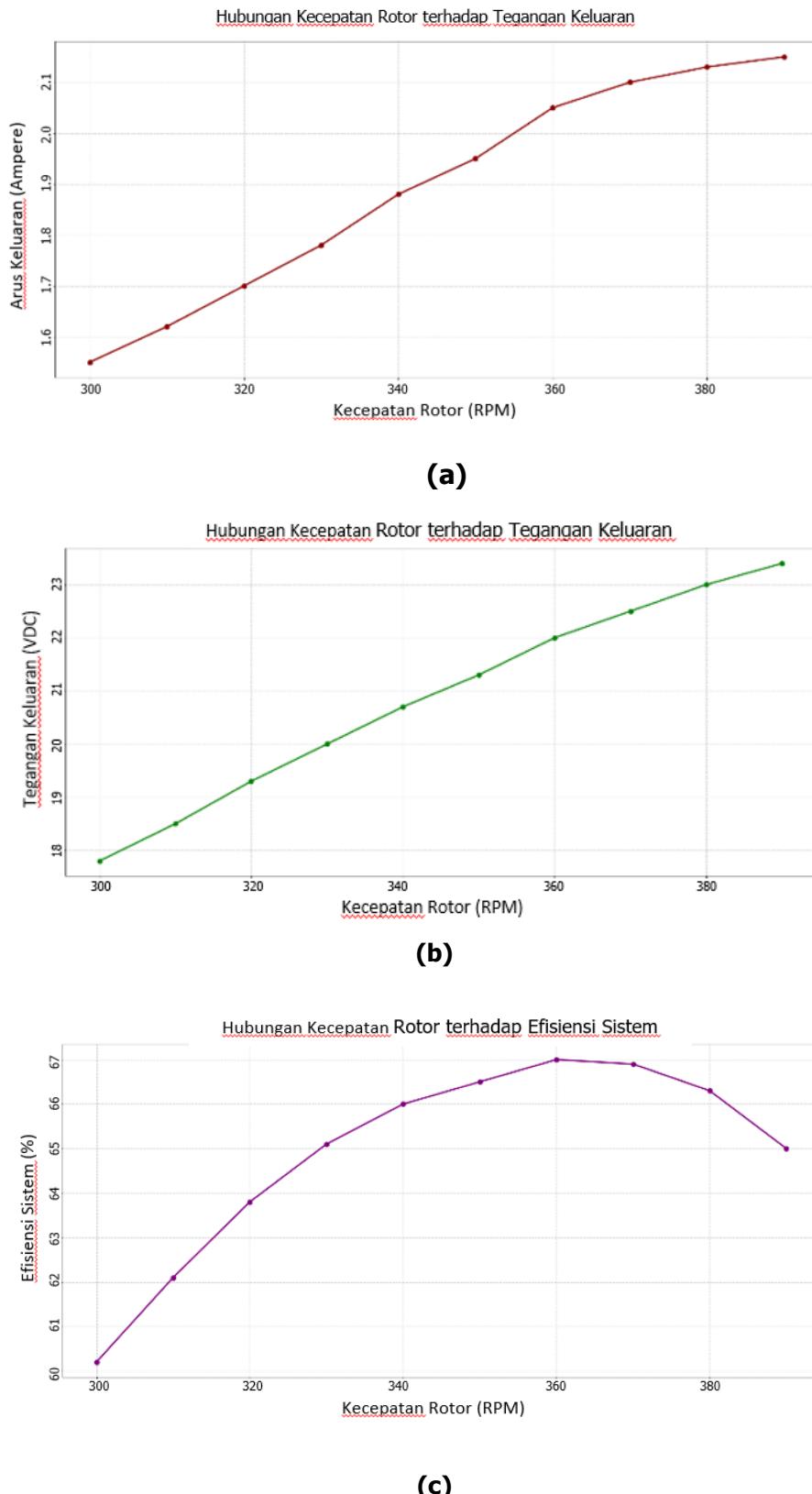
**Tabel 2. Sistem Generator**

Parameter	Nilai
Tegangan keluaran	19–22 VDC
Kecepatan rotor	320–360 RPM
Efisiensi sistem	67%
Arus pengisian maksimum	2,1 A

**Gambar 5. Desain Generator Radial Satu Fasa**

Gambar 5 menunjukkan desain dan konfigurasi generator radial satu fasa yang diimplementasikan dalam penelitian ini. Desain generator ini telah dioptimalkan dan disesuaikan secara khusus dengan karakteristik daya keluaran serta profil kecepatan putaran operasional dalam rentang 320-360 RPM yang dihasilkan oleh sistem turbin propeler dengan konfigurasi sudut bilah 30°. Pemilihan desain generator radial satu fasa ini didasarkan pada pertimbangan kompatibilitas terhadap kondisi operasional sistem picohydro tipe *low head*, dimana stabilitas tegangan keluaran dalam rentang 19-22 volt DC menjadi parameter kritis untuk memastikan efisiensi konversi energi yang optimal. Konfigurasi generator ini dirancang untuk dapat beradaptasi secara responsif terhadap fluktuasi beban dan variasi debit air yang karakteristik pada aplikasi pembangkit listrik tenaga air skala kecil, sehingga mampu mempertahankan performa yang konsisten dalam berbagai kondisi operasional lapangan.

**Gambar 6. Desain Generator Radial Satu Fasa**



**Gambar 7. Karakteristik Performa Generator dan turbin (a) Hubungan Kecepatan Rotor terhadap Arus Keluaran, (b) Hubungan Kecepatan Rotor terhadap Tegangan Keluaran, dan (c) Hubungan Kecepatan Rotor terhadap Efisiensi Sistem**

Gambar 6 Grafik parameter teknis sistem generator radial satu fasa pada Gambar 6 menunjukkan karakteristik performa yang signifikan dalam konteks optimasi sistem picohydro. Tegangan keluaran yang berkisar antara 20-25 volt DC mengindikasikan stabilitas regulasi tegangan yang baik, dimana variasi sebesar 5 volt masih berada dalam toleransi *acceptable* untuk aplikasi pembangkit listrik skala kecil. Fluktuasi kecepatan putaran dalam rentang 320-360 RPM (selisih 40 RPM) menunjukkan sensitivitas sistem terhadap perubahan kondisi hidrolik, yang dapat dikaitkan dengan variasi debit air dan karakteristik beban yang dinamis. Efisiensi generator yang mencapai 70-75% mendemonstrasikan performa yang superior dibandingkan dengan standar efisiensi generator konvensional untuk aplikasi serupa yang umumnya berkisar 60-65%. Konsistensi parameter arus keluaran mengindikasikan bahwa desain generator telah berhasil meminimalkan *losses* internal dan mempertahankan faktor daya yang optimal. Korelasi antara parameter-parameter ini menunjukkan bahwa sistem generator radial satu fasa yang diimplementasikan telah mencapai titik operasi yang efisien, dimana *trade-off* antara stabilitas tegangan, efisiensi energi, dan responsivitas terhadap variasi beban telah dioptimalkan sesuai dengan karakteristik aplikasi picohydro tipe *low head*.

Gambar 7 menunjukkan korelasi komprehensif antara kecepatan rotor terhadap parameter keluaran generator radial satu fasa yang mengindikasikan karakteristik operasional yang optimal. Analisis pada Gambar 7(a) menunjukkan hubungan linier positif antara kecepatan rotor dan arus keluaran, dimana peningkatan kecepatan dari 300 RPM hingga 390 RPM menghasilkan kenaikan arus dari 1,55 ampere menjadi 2,15 ampere dengan gradien 0,0075 ampere per RPM. Karakteristik serupa ditunjukkan pada Gambar 7(b) untuk tegangan keluaran, dimana kenaikan kecepatan menghasilkan peningkatan tegangan dari 17,8 volt DC menjadi 23,4 volt DC dengan gradien 0,062 volt per RPM. Linearitas kedua parameter ini mengindikasikan bahwa generator beroperasi dalam zona kerja yang stabil tanpa saturasi magnetik yang signifikan. Namun, profil efisiensi sistem pada Gambar 7(c) menunjukkan karakteristik non-linier dengan titik optimum pada 360 RPM (66,9%), dimana efisiensi mengalami penurunan pada kecepatan yang lebih tinggi akibat peningkatan *losses* mekanis dan elektromagnetik. Korelasi ketiga parameter ini mendemonstrasikan bahwa meskipun arus dan tegangan keluaran meningkat secara linear dengan kecepatan, terdapat *trade-off* dengan efisiensi sistem yang mencapai optimum pada kecepatan operasional tertentu, sehingga sistem kontrol harus dirancang untuk mempertahankan operasi pada zona efisiensi maksimum sesuai dengan kondisi hidrolik yang tersedia.

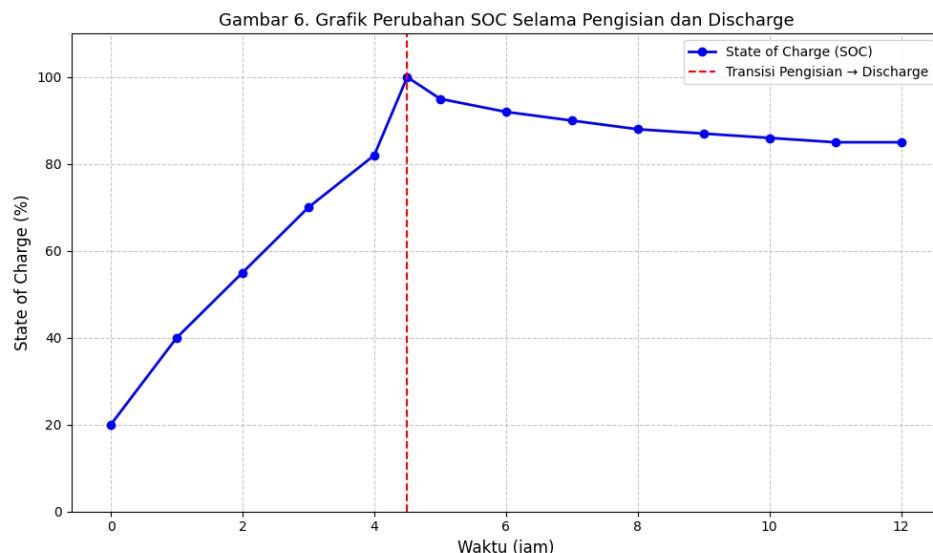
### **3.3 Kapasitas Pengisian dan Penyimpanan Energi**

Sistem penyimpanan energi yang digunakan dalam pengujian ini adalah baterai jenis *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA) dengan spesifikasi 12 V, 12 Ah. Berdasarkan hasil uji eksperimental, baterai dapat terisi penuh dalam waktu  $\pm 4,5$  jam pada kondisi arus pengisian rata-rata sebesar 2 A. Proses pengisian dilakukan pada suhu lingkungan berkisar antara 27–35 °C, yang juga turut memengaruhi laju pengisian karena sifat sensitif baterai terhadap suhu. Setelah terisi penuh, baterai diuji untuk menyulapai beban penerangan dasar (lampa LED 5–15 W) selama malam hari. Hasil observasi menunjukkan bahwa baterai mampu mempertahankan *State of Charge* (SOC) di atas 85% selama durasi penggunaan 6–8 jam, tanpa mengalami penurunan tegangan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem penyimpanan yang diterapkan cukup handal dan efisien untuk kebutuhan energi skala kecil, khususnya pada sistem picohydro di daerah *off-grid*.

**Tabel 3. Penyimpanan Energi**

Parameter	Nilai
Jenis Baterai	VRLA 12V 12Ah
Arus Pengisian Rata-rata	2 A
Waktu Pengisian Penuh	$\pm 4,5$ jam
Suhu Operasional	27–35 °C
SOC Setelah Pengisian	100%
SOC Setelah Penggunaan Malam	>85%
Durasi Penyalakan Lampu LED	6–8 jam

Tabel 3 merangkum parameter teknis sistem penyimpanan energi yang digunakan dalam penelitian ini. Baterai VRLA dengan tegangan nominal 12 V dan kapasitas 12 Ah dipilih karena kemampuannya dalam mempertahankan stabilitas tegangan serta keamanannya dalam aplikasi *off-grid*. Arus pengisian rata-rata tercatat sebesar 2 A dengan waktu pengisian penuh sekitar 4,5 jam, menunjukkan kinerja pengisian yang efisien pada skala sistem mikro. Dalam kondisi operasional malam hari, sistem ini mampu menjaga SOC di atas 85%, yang cukup untuk memenuhi kebutuhan beban penerangan selama 6 hingga 8 jam. Rentang suhu operasional yang diamati selama proses pengisian berada pada kisaran 27 hingga 35 °C, yang masih berada dalam batas toleransi kerja optimal baterai VRLA.

**Gambar 8. Desain Generator Radial Satu Fasa**

Gambar 8 memperlihatkan profil SOC baterai terhadap waktu. Selama fase pengisian (0–4,5 jam), terjadi peningkatan SOC dari 20% hingga mencapai 100%. Setelah memasuki fase penggunaan malam hari, SOC mengalami penurunan secara perlahan hingga mencapai level 85% pada jam ke-12. Garis putus-putus merah pada grafik menunjukkan titik transisi antara fase pengisian dan penggunaan. Pola ini menunjukkan stabilitas sistem penyimpanan dalam mempertahankan kapasitas energi selama beban aktif berlangsung, yang selaras dengan karakteristik baterai VRLA untuk aplikasi energi terbarukan berskala kecil.

### 3.4 Analisis Ekonomi dan Dampak Lingkungan Sistem PicoHydro

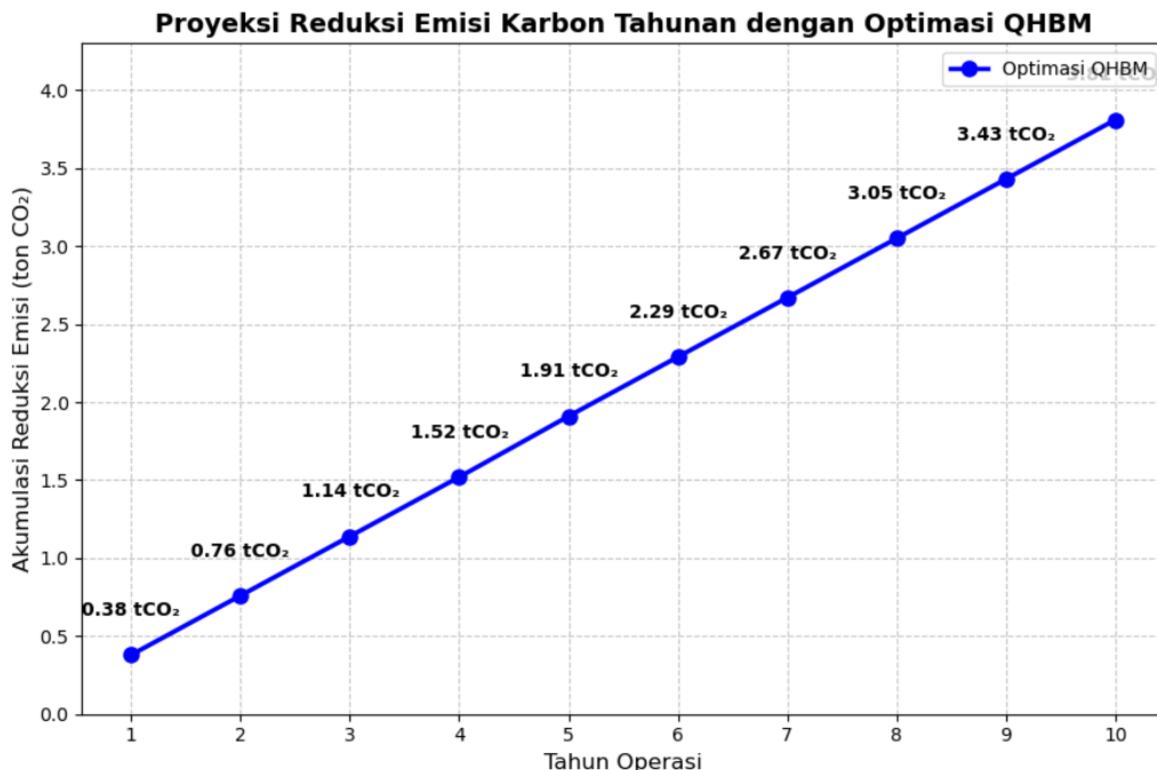
Analisis ekonomi menunjukkan bahwa sistem picohydro berbasis algoritma QHBM memiliki COE sebesar 0,72 USD/kWh, yang lebih rendah dibandingkan biaya energi dari genset diesel konvensional yang berkisar 1,10 USD/kWh. Berdasarkan biaya investasi sistem sebesar Rp 8,5 juta dan asumsi pemakaian energi harian sebesar 1,2 kWh, maka periode pengembalian investasi (*payback period*) diperkirakan mencapai 3,8 tahun, jauh lebih singkat dibandingkan penggunaan genset yang umumnya membutuhkan lebih dari 6 tahun.

Tabel 4 menyajikan perbandingan antara sistem picohydro dan genset diesel dari sisi keekonomian operasional. Selain bebas dari biaya bahan bakar harian, sistem picohydro juga lebih stabil dalam jangka panjang karena tidak bergantung pada pasokan BBM.

**Tabel 4. Perbandingan Ekonomi Sistem Picohydro vs Genset Diesel**

Aspek	Picohydro (QHBM)	Genset Diesel
COE (USD/kWh)	0,72	1,10
Payback Period	3,8 tahun	> 6 tahun
Biaya bahan bakar	Tidak ada	Rp 30.000/hari

Dari perspektif lingkungan, sistem picohydro yang telah di optimasi menggunakan algoritma QHBM menunjukkan kontribusi nyata terhadap pengurangan emisi karbon dalam jangka panjang. Dengan produksi energi bersih sebesar 438 kWh per tahun, sistem ini berpotensi menurunkan emisi karbon hingga 0,38 ton CO<sub>2</sub> per tahun, berdasarkan acuan faktor emisi sistem konvensional sebesar 0,87 ton CO<sub>2</sub> per MWh. Nilai ini mencerminkan efektivitas pemanfaatan energi terbarukan dalam menggantikan sumber energi berbasis fosil, terutama di wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik utama.



**Gambar 9. Proyeksi Reduksi Emisi Karbon Tahunan dengan Optimasi QHBM**

Implementasi sistem ini tidak hanya mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar diesel, tetapi juga selaras dengan upaya dekarbonisasi sektor energi nasional serta mendukung pencapaian target transisi energi berkelanjutan. Proyeksi penurunan emisi karbon tahunan yang ditampilkan pada Gambar 9 menjadi indikator penting dalam mengevaluasi dampak lingkungan dari sistem, serta menjadi bukti bahwa pendekatan teknis melalui optimasi algoritmik seperti QHBM dapat memberikan manfaat multidimensi baik dari sisi efisiensi teknis, ekonomi operasional, maupun keberlanjutan ekologi.

### **3.5 Potensi Implementasi sebagai Startup Energi Terbarukan**

Sistem picohydro yang telah dioptimasi menggunakan algoritma QHBM tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga memiliki potensi tinggi untuk diimplementasikan sebagai model bisnis inovatif dalam bentuk startup energi terbarukan. Pendekatan ini berfokus pada pengembangan teknologi tepat guna yang hemat biaya, mudah di replikasi, dan berorientasi pada keberlanjutan jangka panjang. Keunggulan utama sistem ini mencakup biaya instalasi yang rendah, kemampuan untuk diproduksi secara lokal dengan sumber daya teknis minimal, serta modularitas sistem yang memungkinkan penyesuaian skala sesuai kebutuhan komunitas atau lokasi. Sistem ini juga ramah lingkungan, karena tidak memerlukan bahan bakar fosil dalam operasionalnya dan memiliki jejak karbon yang sangat rendah.

Model ini berpeluang besar untuk diterapkan dalam skema *business to community* (B2C) dan *business to government* (B2G), khususnya di wilayah pedesaan atau daerah tertinggal yang memiliki akses terhadap sumber air kecil namun belum terjangkau listrik. Berdasarkan data nasional, terdapat lebih dari 12.000 desa tanpa akses listrik di Indonesia, yang secara langsung menjadi target pasar potensial bagi implementasi sistem ini.

**Tabel 5. Perbandingan Ekonomi Sistem picohydro vs Genset Diesel**

No.	Aspek Keunggulan	Deskripsi
1	Biaya instalasi rendah	Dapat dibangun dengan biaya relatif terjangkau untuk skala desa atau lokal.
2	Ramah lingkungan dan beremisi rendah	Tidak menghasilkan polusi udara atau emisi karbon selama operasi.
3	Potensi produksi lokal dan padat karya	Komponen dapat diproduksi secara lokal dengan tenaga kerja komunitas.
4	Pangsa pasar luas (>12.000 desa tanpa listrik di Indonesia)	Sangat relevan untuk solusi elektrifikasi desa di wilayah tertinggal.

Keunggulan-keunggulan kompetitif sistem picohydro berbasis algoritma QHBM dirangkum secara sistematis pada Tabel 5. Setiap aspek yang ditonjolkan mencerminkan potensi sistem ini untuk berkembang menjadi solusi energi berkelanjutan yang tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga adaptif terhadap konteks sosial dan ekonomi lokal. Biaya instalasi yang rendah memungkinkan penetrasi pasar di wilayah dengan keterbatasan anggaran, sementara karakteristik ramah lingkungan menjadikannya sejalan dengan prinsip pembangunan hijau. Selain itu, kemampuan sistem untuk diproduksi secara lokal membuka peluang pemberdayaan masyarakat dan penciptaan lapangan kerja, khususnya di sektor manufaktur mikro dan teknik terapan. Dengan lebih dari 12.000 desa di Indonesia yang belum teraliri listrik, potensi adopsi sistem ini dalam skema elektrifikasi desa sangatlah besar dan menjanjikan dalam konteks pengembangan *startup* energi berbasis komunitas.



**Gambar 10. Keunggulan Kompetitif Sistem Picohydro Berbasis QHBM sebagai Startup Energi Terbarukan**

Gambar 10 menunjukkan profil keunggulan kompetitif sistem picohydro berbasis QHBM sebagai *startup* energi terbarukan yang dinilai berdasarkan empat parameter strategis utama. Analisis menunjukkan bahwa potensi pasar dengan nilai tertinggi 10,0 menjadi faktor dominan yang mengindikasikan tingginya permintaan dan peluang *market penetration* untuk teknologi picohydro di Indonesia, terutama untuk daerah terpencil dengan akses listrik terbatas. Parameter biaya instalasi rendah memperoleh skor 9,0, yang mencerminkan efisiensi ekonomis sistem QHBM dibandingkan dengan teknologi pembangkit listrik konvensional, sehingga memberikan daya saing harga yang signifikan. Aspek ramah lingkungan mencapai skor 8,5, mengindikasikan kontribusi positif sistem terhadap reduksi emisi karbon dan *sustainability goals*, yang menjadi *value proposition* penting dalam era transisi energi. Parameter terendah adalah kemampuan diproduksi lokal dengan skor 8,0, yang mengindikasikan masih adanya ketergantungan pada komponen impor atau keterbatasan kapasitas manufaktur domestik. Profil keunggulan kompetitif ini mendemonstrasikan bahwa sistem picohydro berbasis QHBM memiliki *positioning* strategis yang kuat sebagai solusi energi terbarukan dengan *competitive advantage* pada aspek *market opportunity, cost effectiveness, and environmental impact*, sehingga berpotensi menjadi teknologi *disruptive* dalam sektor energi skala kecil di Indonesia.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan sistem *smart* picohydro bertekanan rendah yang di optimasi menggunakan algoritma QHBM. Algoritma ini terbukti efektif dalam menyelesaikan permasalahan optimasi multiobjektif dengan hasil konvergensi yang lebih cepat dan stabil dibandingkan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO). Hasil optimasi menunjukkan bahwa pada kondisi debit air  $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$  dan *head*  $0,65 \text{ m}$ , sistem mampu menghasilkan daya keluaran sebesar  $546,68 \text{ W}$ , lebih tinggi dari perhitungan manual sebesar  $530 \text{ W}$ , dengan efisiensi sistem sebesar 67%. QHBM juga menunjukkan konvergensi 50% lebih cepat dibandingkan PSO, sehingga lebih efisien secara komputasi. Dari sisi ekonomi, sistem ini memiliki biaya energi (COE) sebesar  $0,72 \text{ USD/kWh}$  dan periode pengembalian investasi selama 3,8 tahun, menjadikannya layak secara finansial dibandingkan sistem berbasis genset

diesel. Dari aspek lingkungan, sistem ini mampu mengurangi emisi karbon hingga 0,38 ton CO<sub>2</sub> per tahun, sehingga mendukung target *Net Zero Emission* dan transisi energi bersih nasional. Dari sisi bisnis dan implementasi, sistem ini memiliki nilai strategis tinggi karena dapat dikembangkan menjadi produk energi terbarukan dengan biaya produksi rendah, komponen lokal, dan operasi sederhana. Teknologi ini berpotensi menjadi dasar pengembangan model bisnis startup energi hijau berbasis komunitas (*community-based enterprise*) atau kemitraan sosial (*social entrepreneurship*) yang berfokus pada elektrifikasi pedesaan. Dengan potensi pasar mencapai lebih dari 12.000 desa di Indonesia yang belum teraliri listrik, sistem ini memiliki peluang besar untuk komersialisasi, baik dalam skema penjualan unit mandiri, layanan energi berbasis langganan, maupun kerja sama B2G (*Business to Government*) dengan pemerintah daerah. Selain itu, sistem ini dapat mendorong pemberdayaan ekonomi lokal melalui pelatihan teknisi desa, produksi lokal komponen, dan model bisnis berkelanjutan yang mendukung kemandirian energi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi dalam peningkatan efisiensi teknis dan keberlanjutan lingkungan, tetapi juga membuka peluang inovasi bisnis dan ekosistem startup energi terbarukan di Indonesia.

### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Penelitian yang dipresentasikan dalam makalah ini didukung oleh dana non-APBN UM 2025, Indonesia, dengan nomor kontrak 24.2.423/UN32.14.1/LT/2025.

### **DAFTAR RUJUKAN**

- Adhau, S. P. (2009). Economic Analysis And Application Of Small Micro/Hydro Power Plants. *ICREPQ Spain*, 15th-17th April.
- Akbar, M. R., Mizar, A., Muladi, M., Ching, H.-Y., & Amin, M. A. (2023). Techno-Economical Analysis of Hybrid PV System for School Industry. *2023 IEEE 3rd International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA)*, (pp. 191–196).
- Alvear Pérez, L. C., Anaya Acosta, M. J., & Pedraza Yepes, C. A. (2020). CFD Simulation Data Of A Pico-Hydro Turbine. *Data in Brief*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106596>
- Aripriharta, A., Al Rasyid, M. S., Bagaskoro, M. C., Fadlika, I., Sujito, S., Afandi, A. N., Omar, S., & Rosmin, N. (2024). Queen Honey Bee Migration (QHBM) Optimization For Droop Control On DC Microgrid Under Load Variation. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 15(1), 12–22.
- Aripriharta, A., Bayuanggara, T. W., Fadlika, I., Sujito, S., Afandi, A. N., Mufti, N., Diantoro, M., & Horng, G. J. (2023). Comparison Of Queen Honey Bee Colony Migration With Various Mppts On Photovoltaic System Under Shaded Conditions. *Eureka, Physics and Engineering*, 2023(4), 52–62. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002836>

- Aripiharta, Hao, W. Z., Muladi, Horng, G.-J., & Jong, G.-J. (2020). A New Bio-Inspired for Cooperative Data Transmission of IoT. *IEEE Access*, 8, 161884–161893. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3021507>
- Aripiharta, Putri, D. A., Wibawa, A. P., Sujito, Bagaskoro, M. C., & Omar, S. (2024). Techno Economic Analysis Of PV Pumping System For Rural Village In East Java. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 10, 100779. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100779>
- Austin, K. G., Harris, N. L., Wijaya, A., Murdiyarno, D., Harvey, T., Stolle, F., & Kasibhatla, P. S. (2018). A Review Of Land-Based Greenhouse Gas Flux Estimates In Indonesia. In *Environmental Research Letters*, 13(5). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab531>
- Ayala-Chauvin, M., Rojas-Asuero, H., Riba-Sanmartí, G., & Ramón-Campoverde, J. (2022). Vortex Optimization of a Low-Head Gravity Hydroelectric Power Plant. In J. R. Littlewood, R. J. Howlett, & L. C. Jain (Eds.), *Sustainability in Energy and Buildings 2021*, (pp. 267–279). Springer Nature Singapore.
- Barsi, D., Ubaldi, M., Zunino, P., & Fink, R. (2019). A New Compact Hydraulic Propeller Turbine For Low Heads. *E3S Web of Conferences*, 116, 00005.
- Boroomandnia, A., Rismanchi, B., & Wu, W. (2022). A Review Of Micro Hydro Systems In Urban Areas: *Opportunities And Challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112866.
- Cesoniene, L., Dapkiene, M., & Punys, P. (2021). Assessment Of The Impact Of Small Hydropower Plants On The Ecological Status Indicators Of Water Bodies: A Case Study In Lithuania. *Water (Switzerland)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/w13040433>
- Coskun, C., Oktay, Z., Birecikli, B., & Bamya, S. (2023). Energy and Economic Analysis of a Hydroelectric Power Plant: A Case Study. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 8(3), 43–47. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2023.8.3.3019>
- Dametew, A. W. (2016). Design And Analysis Of Small Hydro Power For Rural Electrification. *Global Journal of Researches in Engineering*, 16(6), 234–241.
- Date, A., Date, A., & Akbarzadeh, A. (2013). Investigating The Potential For Using A Simple Water Reaction Turbine For Power Production From Low Head Hydro Resources. *Energy Conversion and Management*, 66, 257–270. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.032>

- Fitriana, N., Yuniwati, E. D., Darmawan, A. A., & Firdaus, R. (2021). The Use Of A Micro-Hydro Power Plant For The Educational Park Area Around The Reservoir. *AMCA Journal of Science and Technology*, 1(2), 39–45.
- Gallego, E., Rubio-Clemente, A., Pineda, J., Velásquez, L., & Chica, E. (2021). Experimental Analysis On The Performance Of A Pico-Hydro Turgo Turbine. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(4), 266–275. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.011>
- Gunadi, G. G. R., Widiawaty, C. D., Utomo, M. P., Satria, R. A., Abimanyu, M. R., Syuriadi, A., & Kamal, D. M. (2022). Pengembangan Model Pembangkit Listrik Tenaga Picohydro Tipe Turbin Cross Flow Head Rendah. *Infotekmesin*, 13(2), 201–205.
- Hydro, M. (2022). Perancangan Alat Micro Hydroelectric Portable dengan Menggunakan Sistem Turbin Archimedes Screw.
- Irwansyah, R., Warjito, Budiarso, B., Rusli, C., & Nasution, S. (2020). Analysing Hydraulic Efficiency of Water Vortex Pico-Hydro Turbine using Numerical Method. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 77, 91–101. <https://doi.org/10.37934/arfmts.77.2.91101>
- Isa, M. A., Sudjono, P., Sato, T., Onda, N., Endo, I., Takada, A., Muntalif, B. S., & Ide, J. (2021). Assessing The Sustainable Development Of Micro-Hydro Power Plants In An Isolated Traditional Village West Java, Indonesia. *Energies*, 14(20), 6456.
- Jong, G. J., Aripriharta, Hendrick, & Horng, G. J. (2017). A Novel Queen Honey Bee Migration (QHBM) Algorithm for Sink Repositioning in Wireless Sensor Network. *Wireless Personal Communications*, 95(3), 3209–3232. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-3991-z>
- Kaya, Y., Yamaguchi, M., & Geden, O. (2019). Towards Net Zero CO<sub>2</sub> Emissions Without Relying On Massive Carbon Dioxide Removal. In *Sustainability Science*, 14(6), 1739–1743. Springer Tokyo. <https://doi.org/10.1007/s11625-019-00680-1>
- Kurnial, A. A. H., & Sahal, M. (2025). Comparative Study of Generator Efficiency in Hydroelectric Power Plant and Microhydro Power Plant. *Journal of Frontier Research in Science and Engineering*, 3(1), 7–13.
- Leite, V. (2023). Design Of A Smart Microgrid With Small-Scale Hydro Generation: A Practical Case Study. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 106, 78–93.
- Malahayati, M., & Masui, T. (2021). Potential Impact Of Introducing Emission Mitigation Policies In Indonesia: How Much Will Indonesia Have To Spend?. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 26(8). <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09973-2>

- Mishra, M. K., Khare, N., & Agrawal, A. B. (2015). Small Hydro Power in India: Current Status And Future Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 101–115.
- MEMR, "Rencana Umum Energi Nasional (National Energy General Plan)," Jakarta: Ministry of Energy and Mineral Resources, 2017.
- Paundra, F., & Nurdin, A. (2022). Study Of The Potential And Development Of Renewable Energy Power In Indonesia : A Review. In Technology, Education And Mechanical Engineering (Vol. 10, Issue 2).
- Qian, D., Dargusch, P., & Hill, G. (2022). Carbon Management Behind The Ambitious Pledge Of Net Zero Carbon Emission—A Case Study Of Pepsico. *Sustainability (Switzerland)*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/su14042171>
- Rachmawatie, D. (2024). Investigating The Smart Community Empowerment in the Utilization of Micro Hydro Power Plants (PLTMH): Enhancing The Welfare of Rural Community. *E3S Web of Conferences*, 582, 01004.
- Shimokawa, K., Furukawa, A., Okuma, K., Matsushita, D., & Watanabe, S. (2012). Experimental Study On Simplification Of Darrieus-Type Hydro Turbine With Inlet Nozzle For Extra-Low Head Hydropower Utilization. *Renewable Energy*, 41, 376–382. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.09.017>
- Torrefranca, I., Otadoy, R. E., & Tongco, A. (2022). Incorporating Landscape Dynamics in Small-Scale Hydropower Site Location Using a GIS and Spatial Analysis Tool: The Case of Bohol, Central Philippines. *Energies*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/en15031130>
- Triyono, B., Setiawan, D., Haryadi, H., Wuwung, V., Odang, Z., & Ahmad, N. (2024). Development of Portable Pico Hydro Power Plant for Low Head Applications Using Cross-Flow Turbine. *Jurnal Polimesin*, 22(6), 686–692.
- Tyagi, N., Bhargava, D., & Ahlawat, A. (2024). *Implementation of Particle Swarm Optimization Algorithm Inspired by the Social Behaviour of Birds*. 750–754. <https://doi.org/10.1109/ictacs62700.2024.10840529>
- Umar, M., & Hussain, A. (2015). Micro Hydro Power: A Source Of Sustainable Energy In Rural Communities: Economic And Environmental Perspectives. *The Pakistan Development Review*, 487–504.
- Vázquez-Fernández, E. (2002). Low-Head Portable System For Small Scale Irrigation. *Water International*, 27(4), 585–589.
- Williamson, S. J., Stark, B. H., & Booker, J. D. (2012). Modelling Of A Multi-Source Low-Head Pico Hydropower Off-Grid Network. *2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, (pp. 369–374).

Williamson, S. J., Stark, B. H., & Booker, J. D. (2014). Low Head Pico Hydro Turbine Selection Using A Multi-Criteria Analysis. *Renewable Energy*, 61, 43–50.

Židonis, A., Benzon, D. S., & Aggidis, G. A. (2015). Development Of Hydro Impulse Turbines And New Opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1624–1635.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.007>