

# Analisis Potensi Pembangkitan Listrik Tenaga Pico Hydro di Saluran Irigasi Desa Cintaraja Tasikmalaya

Mochamad Irlan Malik<sup>1</sup>, Widyantoro<sup>2</sup>, Anes Inda Rabbika<sup>3</sup>, Yanti<sup>4</sup>, Yadi<sup>5</sup>

<sup>1,4,5</sup> Teknik Mekatronika, Fakultas Teknik Universitas Mayasari Bakti

<sup>2,3</sup> Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Mayasari Bakti

Jln. Tamansari Blok Rahayu I, Kec. Tamansari, Kota Tasikmalaya, Jawa Barat 46191 INDONESIA

Email: <sup>1</sup>irlan.malik1@gmail.com

**Abstract**— The Pico Hydro Power Plant (PLTPH) is an efficient solution for providing renewable energy in areas with limited water resources. This study evaluates the performance of a 5 kW PLTPH in Cintaraja Village, focusing on measuring flow velocity, water discharge, as well as generator power and current throughout the year. The analysis shows that although the PLTPH operates with high efficiency and renewable energy penetration exceeds 100% in most months, there are significant fluctuations in power output, especially in months with low water discharge such as July and August. This decrease in power output indicates a reliance on external energy sources such as the national grid (PLN) to meet the village's electricity needs. The hydro generator's capacity factor was recorded at 126%, with an average Levelized Cost of Energy (LCOE) of 2,232 Rp/kWh, reflecting good economic efficiency. The results indicate that the potential of PLTPH to provide reliable renewable energy is very high.

**Intisari**— Pembangkit Listrik Tenaga Pico Hydro (PLTPH) merupakan solusi efisien untuk penyediaan energi terbarukan di daerah dengan sumber daya air terbatas. Penelitian ini mengevaluasi kinerja PLTPH dengan kapasitas 5 kW di Desa Cintaraja, fokus pada pengukuran kecepatan aliran, debit air, serta daya dan arus generator sepanjang tahun. Analisis menunjukkan bahwa meskipun PLTPH beroperasi dengan efisiensi tinggi dan penetrasi energi terbarukan melebihi 100% di sebagian besar bulan, terdapat fluktuasi signifikan dalam output daya, terutama pada bulan-bulan dengan debit air rendah seperti Juli dan Agustus. Penurunan output daya ini menandakan ketergantungan pada sumber energi eksternal seperti PLN untuk memenuhi kebutuhan listrik desa. Faktor kapasitas hidro generator tercatat sebesar 126%, dengan biaya pembangkitan rata-rata (LCOE) sebesar 2.232 Rp/kWh, mencerminkan efisiensi ekonomi yang baik. Dimana Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa potensi PLTPH dalam menyediakan energi terbarukan yang andal sangat tinggi.

**Kata Kunci**— PLTPH, Potensi Energi, Energi Terbarukan, Homer Pro

## I. PENDAHULUAN

Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan sumber daya alam yang melimpah, memiliki potensi besar dalam pengembangan energi terbarukan. Potensi ini meliputi berbagai bentuk energi seperti matahari, angin, biomassa, dan air. Salah satu sumber energi terbarukan yang cukup menjanjikan namun belum dimanfaatkan secara optimal adalah tenaga air. Dengan ribuan sungai dan aliran air yang mengalir sepanjang tahun, Indonesia memiliki kapasitas besar untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga mikro dan pico hydro[1]. Pemanfaatan tenaga air ini tidak hanya berkontribusi pada

penyediaan energi berkelanjutan, tetapi juga dapat membantu mengurangi dampak negatif dari penggunaan bahan bakar fosil terhadap Energi terbarukan memainkan peran penting dalam mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan dan mengurangi emisi gas rumah kaca [2]. Di Indonesia, pengembangan energi terbarukan menjadi semakin penting mengingat kebutuhan energi yang terus meningkat dan tantangan perubahan iklim global. Energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, biomassa, dan hidro tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga menawarkan sumber daya yang hampir tak terbatas. Pengembangan teknologi ini, termasuk pembangkit listrik tenaga mikro dan pico hydro, dapat memberikan solusi energi yang lebih berkelanjutan, meningkatkan ketahanan energi nasional, dan menciptakan lapangan kerja baru di sektor-sektor hijau[3][4].

Desa Cintaraja di Tasikmalaya adalah contoh ideal dari wilayah yang memiliki potensi besar untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga pico hydro. Desa ini memiliki sistem irigasi yang luas dan aliran air yang konsisten sepanjang tahun. Saluran irigasi tersebut, yang awalnya didesain untuk keperluan pertanian, kini menawarkan peluang baru sebagai sumber energi. Penggunaan saluran irigasi untuk pembangkit listrik tenaga pico hydro dapat mengubah potensi energi air yang tidak terpakai menjadi listrik yang bermanfaat bagi masyarakat setempat. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya alam tetapi juga mendukung inisiatif lokal dalam mencapai kemandirian energi.

Pico hydro, sebagai teknologi pembangkit listrik skala kecil, menawarkan beberapa keunggulan, antara lain dampak lingkungan yang minimal, biaya operasional yang rendah, dan kemampuan untuk beroperasi di saluran irigasi dengan aliran air yang relatif kecil. Desa Cintaraja memiliki saluran irigasi yang mengalir sepanjang tahun, menjadikannya lokasi yang potensial untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga nano hydro.

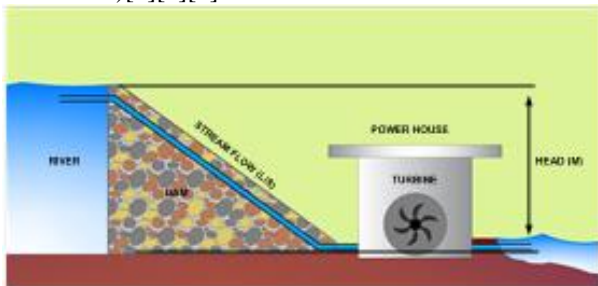
Untuk mengoptimalkan potensi tersebut, diperlukan analisis mendalam mengenai aspek teknis dan ekonomis dari pembangunan pembangkit listrik tenaga pico hydro. HOMER Pro, sebagai perangkat lunak simulasi dan optimasi untuk sistem energi hybrid, menjadi alat yang sangat berguna dalam melakukan analisis ini. Dengan menggunakan HOMER Pro, kita dapat mengevaluasi berbagai parameter, seperti ketersediaan aliran air, kapasitas pembangkit, serta biaya investasi dan operasional. Hasil dari analisis ini akan memberikan gambaran yang komprehensif mengenai kelayakan pembangunan pembangkit listrik tenaga nano hydro

di Desa Cintaraja. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi dan kelayakan pembangunan pembangkit listrik tenaga nano hydro di saluran irigasi Desa Cintaraja menggunakan HOMER Pro.

II. LANDASAN TEORI

A. Pembangkit Listrik Tenaga Pico Hydro (PLTPH)

Pembangkit listrik tenaga pico hydro merupakan sistem pembangkit listrik yang berskala kecil dengan memanfaatkan energi kinetik dan potensial dari aliran air, seperti sungai kecil atau saluran irigasi, untuk menghasilkan listrik. Energi Pico hydro mengacu pada pembangkit listrik yang sangat kecil, biasanya dengan kapasitas kurang dari 100 kW, yang sering digunakan untuk kebutuhan listrik lokal atau komunitas kecil (Lihat Tabel 1)[5][6][7].



Gambar 1. Desain PLTPH

Sistem Pembangkit ini bekerja dengan memanfaatkan perbedaan ketinggian air (head) dan debit aliran untuk menggerakkan turbin yang kemudian menggerakkan generator listrik (Lihat Gambar 1.). Karena skalanya yang kecil, pembangkit listrik tenaga pico hydro sering kali dipasang di daerah terpencil atau pedesaan yang tidak terjangkau oleh jaringan listrik utama, sehingga dapat mendukung kemandirian energi dan keberlanjutan lokal. Kategori pembangkit listrik tenaga air (hydropower) dibedakan berdasarkan kapasitas daya dan tinggi jatuh air (head). Pico Hydro memiliki kapasitas 5 kW sampai dibawah 5 kW dengan tinggi jatuh air <5 meter, cocok untuk kebutuhan listrik kecil seperti rumah tangga. Nano Hydro memiliki kapasitas 5–100 kW dan tinggi jatuh 5–15 meter, biasanya untuk komunitas kecil. Micro Hydro memiliki kapasitas >100 kW dengan tinggi jatuh >15 meter, cocok untuk desa besar atau usaha kecil. Mini Hydro, dengan kapasitas 100 kW–1 MW dan tinggi jatuh 10–100 meter, digunakan untuk komunitas besar atau integrasi ke jaringan listrik kecil (Lihat Tabel 1.) Pemilihan kategori yang tepat tidak hanya bergantung pada kapasitas dan tinggi jatuh air, tetapi juga mempertimbangkan aspek ekonomi, kemudahan instalasi, dan kebutuhan energi pengguna. Implementasi yang efisien dari setiap kategori dapat meningkatkan akses energi terbarukan dan berkontribusi pada pengurangan emisi karbon di wilayah terpencil maupun terhubung jaringan.

Tabel 1. Kapasitas Energi Hydro

Hydro Power	Kapasitas	Head
Large Hydro	> 50MW	> 300mtr
Medium Hydro	10 MW-50 MW	20-300mtr
Small Hydro	1 MW-10 MW	15-200 mtr

Mini Hydro	100 kW- 1 MW	10-100 mtr
Microhydro	>100 kW	> 15mtr
Nano Hydro	5-100 kW	5-15mtr
Pico Hydro	5-<5 kW	<5mtr

B. Energi Hydro

Energi Hydro merupakan suatu energi yang diperoleh dari pemanfaatan dari aliran air. terutama dari air terjun atau sungai yang memiliki perbedaan ketinggian (Head) dan kecepatan aliran Air. Energi ini merupakan energy yang bersih karena tidak melibatkan pembakaran bahan bakar fosil yang menyebabkan efek rumah kaca. Dimana Energi kinetik air dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin dan generator dalam pembangkit listrik tenaga air.

Energi hidro yang dihasilkan melalui proses di mana air dari sungai atau waduk disimpan dalam bendungan (Dam), kemudian dilepaskan dan dialirkan melalui pipa menuju turbin. Dorongan air tersebut memutar turbin, mengubah energi potensial atau kinetik air menjadi energi mekanik. Turbin yang berputar ini dihubungkan dengan generator, yang kemudian mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Listrik yang dihasilkan dari proses ini kemudian dialirkan ke jaringan listrik untuk didistribusikan kepada konsumen.

C. Debit Air

Debit air merupakan suatu ukuran volume dari air yang mengalir melalui suatu penampang tertentu pada satuan waktu. Debit air sering digunakan untuk menggambarkan seberapa banyak air yang melewati sungai, kanal, atau pipa dalam periode waktu tertentu. Satuan untuk debit air biasanya adalah meter kubik per detik [8][9][10]. Dimana sebelum menentukan debit Air didapat persamaan

$$Q = A \times v \tag{1}$$

Dimana,

- Q = Debit Pada Volume Air (m<sup>3</sup>/s)
- A = Luas Penampang Pada Aliran Air (m<sup>2</sup>)
- V = Kecepatan Aliran Air (m/s)

Untuk menentukan debit air maka kita harus mengetahui Luas penampang pada aliran dimana di dapat persamaan

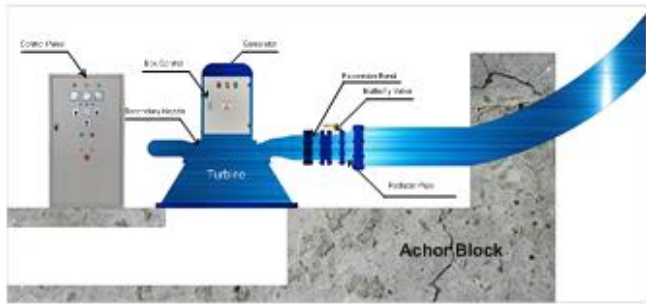
$$A = l \times w \tag{2}$$

Dimana,

- A = Luas Penampang Pada Aliran Air (m<sup>2</sup>)
- l = Kedalaman Air (m)
- w = Lebar Air (m)

D. Generator Hydro

Generator hidro merupakan suatu alat konversi energi yang dirancang untuk mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin hidro menjadi energi listrik[11]. Generator ini merupakan komponen utama dalam sistem pembangkit listrik tenaga air (PLTA), dengan memanfaatkan energi kinetik atau potensial dari aliran air untuk menghasilkan listrik secara efisien.



Gambar 2. Generator Hydro

Prinsip kerjanya adalah dengan memanfaatkan aliran air dari sungai atau waduk dialirkan melalui turbin, di mana energi dari aliran air, baik dalam bentuk energi kinetik dari arus yang bergerak maupun energi potensial dari ketinggian air digunakan untuk memutar turbin (Lihat Gambar 2.). Turbin yang berputar kemudian menggerakkan rotor di dalam generator. Dimana rotor merupakan bagian dari generator yang berputar dan berfungsi untuk menciptakan medan magnet. Generator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana ketika rotor berputar medan magnet yang dihasilkan menginduksi arus listrik dalam kumparan stator, bagian tetap dari generator yang mengandung kumparan kawat tembaga. Proses induksi ini mengubah energi mekanik yang berasal dari turbin menjadi energi listrik, yang kemudian dialirkan ke jaringan listrik untuk didistribusikan ke konsumen [12][13][14]. Untuk menentukan daya listrik yang dihasilkan oleh sebuah generator hidro, digunakan persamaan berikut:

$$P = \eta \times \rho \times Q \times g \times h \tag{3}$$

Dimana,

- P = Daya listrik yang dihasilkan (Watt)
- $\eta$  = Efisiensi Generator (0,7 hingga 0,9)
- $\rho$  = Massa jenis air ( $\text{kg/m}^3$ )
- Q = Debit aliran air ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- g = Percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )
- h = Ketinggian jatuh air atau head (m)

Sedangkan untuk mencari arus pada generator hydro didapatkan persamaan sebagai berikut

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V_{LL} \times \cos \phi} \tag{4}$$

Dimana,

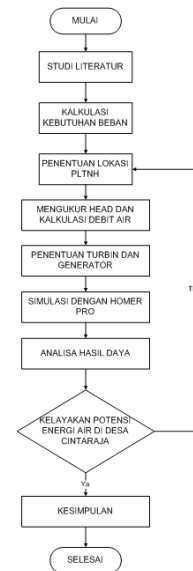
- I = Arus listrik yang dihasilkan (Ampere)
- P = Daya listrik generator (Watt)
- $V_{LL}$  = Tegangan fasa-ke-fasa (Volt)
- $\cos \phi$  = Faktor daya

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### A. Diagram Alir Penelitian

Untuk menganalisis kelayakan teknis pembangkit listrik tenaga nano hidro, penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis. Dimulai dengan studi literatur, diikuti pengumpulan data lapangan terkait debit air dan ketinggian jatuh. Data tersebut dianalisis menggunakan perangkat lunak khusus dan simulasi dengan HOMER Pro untuk mengevaluasi efisiensi turbin serta daya yang dihasilkan, yang kemudian

digunakan untuk menyusun laporan dan rekomendasi kelayakan proyek (Lihat Gambar 3.).



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

#### B. Survei Lokasi

Penelitian dilakukan di perbatasan Kecamatan Singaparna dan Kecamatan Padakembang, tepatnya di Desa Cintaraja dan Desa Cilampunghilir, pada koordinat -7.33587 lintang dan 108.12973 bujur. Saluran irigasi di wilayah ini berasal dari aliran cabang Sungai Ciwulan, dengan hulu di Gunung Galunggung. Desa Cintaraja, terletak di Kecamatan Singaparna, Kabupaten Tasikmalaya, Jawa Barat, memiliki luas sekitar 3,7598  $\text{km}^2$  yang mencakup lahan pertanian, pemukiman, dan berbagai penggunaan lahan lainnya, menjadikannya daerah dengan keragaman ekologi dan sosial-ekonomi (Lihat Gambar 4.).



Gambar 4. Lokasi Penelitian

#### C. Pengukuran Debit Air

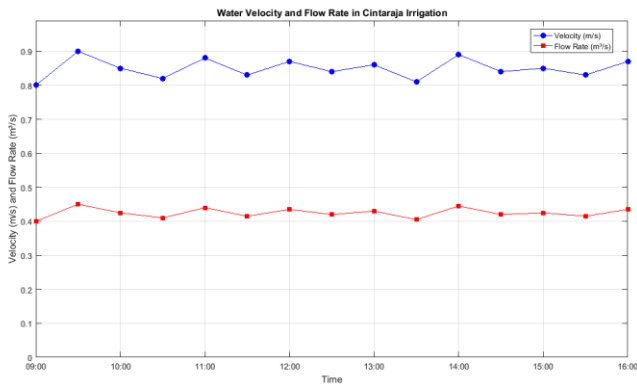
Pengukuran kecepatan aliran, debit air, lebar, dan kedalaman aliran adalah langkah penting dalam menentukan potensi energi Pembangkit Listrik Tenaga Pico Hydro (PLTPH). Kecepatan aliran yang bervariasi antara 0,8 hingga 0,89  $\text{m/s}$ , dan debit antara 0,14 hingga 0,1575  $\text{m}^3/\text{s}$  menunjukkan fluktuasi yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Data ini digunakan untuk menghitung energi potensial dan merancang sistem yang efisien, memastikan turbin dan generator beroperasi secara optimal. Pengukuran berkala dalam berbagai kondisi diperlukan untuk mengelola sumber daya air dengan baik dan memaksimalkan potensi PLTPH (Lihat Tabel 1.).

Tabel 2. Kecepatan Aliran dan Debit

Waktu	Kecepatan (m/s)	Debit ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
9:00	0,8	0,14
9:30	0,9	0,1575

Waktu	Kecepatan (m/s)	Debit (m <sup>3</sup> /s)
10:00	0,85	0,14875
10:30	0,82	0,1435
11:00	0,88	0,154
11:30	0,83	0,14525
12:00	0,87	0,15225
12:30	0,84	0,147
13:00	0,86	0,1505
13:30	0,81	0,14175
14:00	0,89	0,15575
14:30	0,84	0,147
15:00	0,85	0,14875
15:30	0,83	0,14525
16:00	0,87	0,15225

Waktu	Daya (Watt)	Arus (Ampere)
11:30	4559,69	6.94
12:00	4779,43	7.27
12:30	4614,62	7.03
13:00	4724,5	7.19
13:30	4449,82	6.77
14:00	4889,3	7.43
14:30	4614,62	7.03
15:00	4669,56	7.10
15:30	4559,69	6.94
16:00	4779,43	7.27



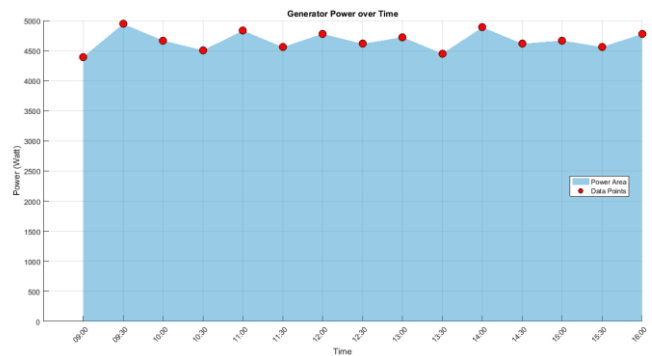
Gambar 5. Grafik Aliran dan Debit Air

D. Pengukuran Generator

Pengukuran daya dan arus pada sistem generator Pico Hydro dengan head 4 meter, efisiensi 90%, dan debit rata-rata 0,139 m<sup>3</sup>/s menunjukkan kinerja sistem yang bervariasi. Daya yang dihasilkan sebesar 5466,84 Watt dihitung menggunakan Persamaan (3), sedangkan daya aktual yang diperlukan mencapai 6833,55 Watt, menunjukkan adanya kehilangan energi. Daya yang diukur bervariasi antara 4394,88 hingga 4944,24 Watt, mencerminkan fluktuasi permintaan akibat perubahan kondisi operasi. Arus listrik yang terukur, berkisar antara 6,69 hingga 7,52 ampere, dihitung menggunakan Persamaan (4) (Lihat Tabel 2.), mencerminkan variasi beban sistem. Pengukuran ini penting untuk memastikan efisiensi dan kinerja optimal sistem serta menghindari inefisiensi energi (Lihat Gambar 6.).

Tabel 3 Daya Pada Generator

Waktu	Daya (Watt)	Arus (Ampere)
9:00	4394,88	6.69
9:30	4944,24	7.52
10:00	4669,56	7.10
10:30	4504,75	6.86
11:00	4834,37	7.35



Gambar 6. Grafik Daya (Watt)

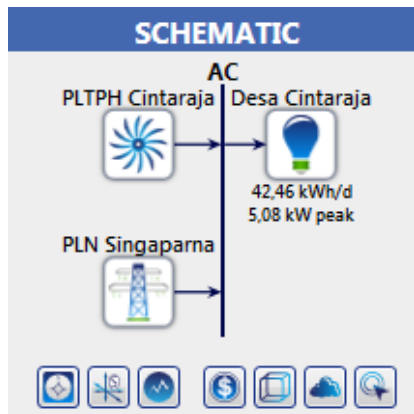
E. Diagram Skematik PLTPH

Pembangkit Listrik Tenaga Pico Hydro (PLTPH) dengan kapasitas 5 kW, yang dilengkapi dengan generator hidro dan head 4 meter serta efisiensi 90%, berfungsi untuk memenuhi kebutuhan listrik di Desa Cintaraja dan dapat menjual sisa energi ke PLN. Selama musim kemarau, debit air yang menurun dapat mengurangi output PLTPH, sehingga diperlukan untuk membeli tambahan energi dari PLN untuk memenuhi kebutuhan listrik desa. Efisiensi sistem dan head yang optimal memungkinkan PLTPH beroperasi dengan baik saat kondisi ideal, namun ketergantungan pada curah hujan menuntut integrasi yang efektif dengan jaringan PLN untuk memastikan pasokan listrik yang stabil sepanjang tahun (Lihat Gambar 7.). Sebelum melakukan simulasi sangat penting untuk memahami parameter utama yang memengaruhi kinerja sistem mikrohidro. Data seperti head 4 m, flow rate 139 L/s, dan efisiensi sistem 90% digunakan untuk menghitung potensi daya yang dapat dihasilkan, yang diproyeksikan mencapai 5,08 kW. Panjang pipa penstock 6 m dan diameternya 0,152 m memengaruhi aliran air dan kehilangan tekanan (Lihat Gambar 8.), sementara kepadatan air 1000 kg/m<sup>3</sup> dan gravitasi 9,8 m/s<sup>2</sup> menjadi dasar dalam perhitungan energi potensial. Parameter ini akan dimasukkan ke dalam perangkat lunak simulasi, seperti Homer, untuk memodelkan performa sistem secara lebih akurat (Lihat Tabel 4.).

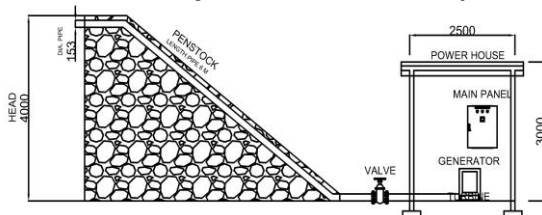
Tabel 4 Parameter Desain Pico Hydro

Parameter	Value	Unit
Head	4	m
Flow rate	139	L/S

Parameter	Value	Unit
Efficiency	90	%
Gravity	9.8	m/s <sup>2</sup>
Density of the fluid	1000	kg/m <sup>3</sup>
Peak	5.08	kW
Penstock Length	6	m
Penstock Diameter	0.152	m



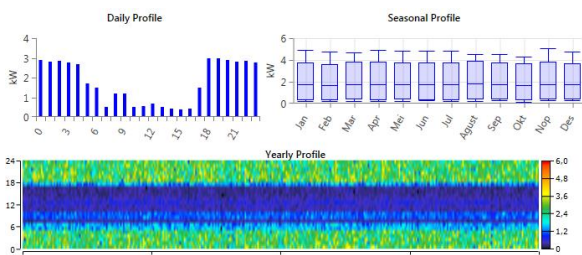
Gambar 7. Diagram Skematik PLTPH Cintaraja



Gambar 8. Tinggi Head PLTPH

**F. Profil Beban**

Profil beban listrik Desa Cintaraja menunjukkan pemakaian energi yang bervariasi antara siang dan malam hari. Pada malam hari, penggunaan beban terutama berasal dari Penerangan Jalan Umum (PJU) sebanyak 60 unit dengan masing-masing daya 50 W, menghasilkan total beban sekitar 3 kW. Pada siang hari, beban utama berasal dari aktivitas pertanian yang memerlukan daya 1,5 kW. Secara keseluruhan, desa ini memiliki rata-rata penggunaan energi sebesar 42,46 kWh per hari, dengan beban puncak mencapai 5,08 kW per hari. Pada malam hari, beban bervariasi antara 2,750 hingga 2,9 kW (Lihat Gambar 9.).



Gambar 9. Profil Beban Harian, Bulanan, dan tahunan

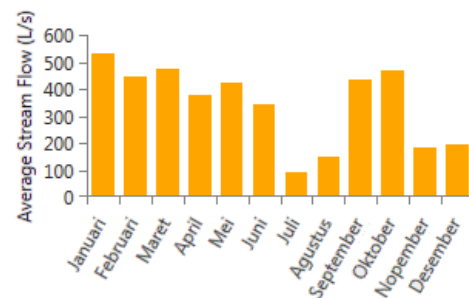
**G. Sumber Energi Hydro**

Berdasarkan data curah hujan yang bersumber dari BPS Tasikmalaya, menunjukkan hubungan erat antara curah hujan

dan debit air sepanjang tahun. Curah hujan yang lebih tinggi, seperti pada bulan Januari dengan 351 mm, menghasilkan debit air yang juga tinggi sebesar 531 L/s. Sebaliknya, bulan Juli dengan curah hujan terendah sebesar 59 mm hanya menghasilkan debit air 89 L/s (Lihat Tabel 5.). Hal ini mencerminkan ketergantungan debit air terhadap curah hujan, dengan variasi musiman yang signifikan, di mana musim hujan menghasilkan debit air yang jauh lebih besar dibandingkan dengan musim kemarau (Lihat Gambar 10.).

Tabel 5. Sumber Energi hydro

Bulan	Curah Hujan (mm)	Debit Air (L/s)
Januari	351	531
Februari	293	444
Maret	315	477
April	248	376
Mei	279	423
Juni	227	344
Juli	59	89
Agustus	98	148
September	138	209
Oktober	254	384
November	285	432
Desember	310	470



Gambar 10. Rata Rata Energi Hydro Perbulan

**H. Spesifikasi Generator**

Spesifikasi teknis generator hidro dengan kapasitas 5 kW dirancang untuk aplikasi pembangkit listrik skala kecil, dengan tegangan operasi 380 Volt pada sistem 3 fase dan frekuensi 50 Hz. Generator ini memiliki dimensi 60x50x60 cm dan berat 1000 kg, memberikan desain kompak namun robust yang cocok untuk instalasi mikrohidro. Kecepatan desainnya 750 r/min, menunjukkan bahwa generator ini dirancang untuk beroperasi pada kecepatan rendah, umumnya digunakan dengan turbin berputar lambat yang memanfaatkan aliran air dengan head rendah. Efisiensi konversi energi dari generator ini mencapai 90%. Generator ini dapat digunakan dalam sistem on-grid atau off-grid, menawarkan fleksibilitas dalam penerapannya pada berbagai lokasi pembangkit tenaga hidro (Lihat Tabel 6.).

Tabel 6. Spesifikasi Generator

Parameter	Value	Unit
Power	5	kW
Voltage	380	Volt
Phase	3	P

Parameter	Value	Unit
Frequency	50	Hz
Dimension	60X50X60	cm
Weight	1000	kg
Design Speed	750	r/min

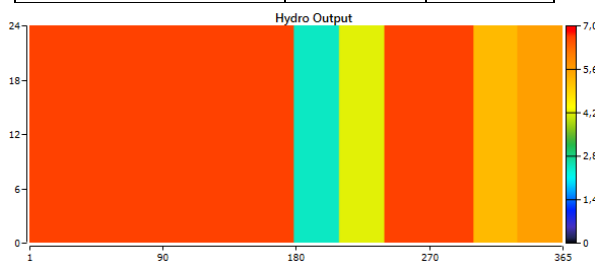
IV. HASIL SIMULASI

A. Evaluasi Kinerja dan Efisiensi Ekonomi Hydro Generator

Hasil analisis menunjukkan bahwa hidro generator dengan kapasitas nominal 4,91 kW menghasilkan daya rata-rata sebesar 6,16 kW, yang merefleksikan faktor kapasitas sebesar 126%. Peningkatan ini mengindikasikan performa operasi yang melebihi ekspektasi desain, kemungkinan besar akibat kondisi hidrologi yang optimal. Total produksi tahunan mencapai 54.003 kWh, dengan penetrasi hidro sebesar 348%, yang menunjukkan kapasitas surplus energi yang signifikan. Dengan biaya pembangkitan rata-rata (LCOE) sebesar 2.232 Rp/kWh, generator hydro ini terbukti efisien secara ekonomi dan mampu memenuhi kebutuhan energi secara berkelanjutan (Lihat Tabel 7.).

Tabel 7. Keluaran Generator

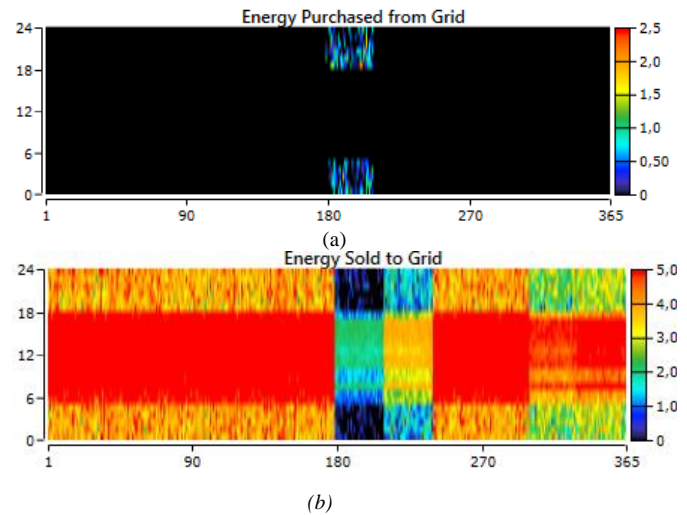
Quantity	Value	Unit
Nominal Capacity	4,91	kW
Mean output	6,16	kW
Capacity factor	126	%
Total Production	54.003	kWh/yr
Minimum output	2,68	kW
Maximum output	6,96	kW
Hydro penetration	348	%
Hours of operation	8.760	hrs/yr
Levelized Cost	2.232	Rp/kWh



Gambar 11. Keluaran Generator 5 kW

B. Kinerja Tahunan Generator Hydro

Penelitian ini menunjukkan bahwa hidro generator mampu menghasilkan total energi tahunan sebesar 34.979 kWh, dengan puncak penjualan energi terjadi pada bulan Mei sebesar 3.425 kWh. Pembelian energi dari sumber eksternal hanya diperlukan pada bulan Juli (114 kWh) dan Agustus (0,0649 kWh), yang menunjukkan bahwa hidro generator hampir sepenuhnya mandiri dalam memenuhi kebutuhan energi. Temuan ini mengkonfirmasi kinerja hidro generator yang efisien dan andal dalam menyediakan energi berkelanjutan dengan ketergantungan minimal pada sumber eksternal (Lihat Gambar 12.).



Gambar 12. (a) Pembelian Energi ke PLN (b) Penjualan Energi ke PLN

C. Analisis Potensi Energi Hydro

Analisis Potensi Energi Hidro ini menggunakan perangkat lunak HOMER Pro untuk mengevaluasi kapasitas pembangkit listrik tenaga air berdasarkan aliran sungai (L/S) dan output daya hidro (kW). Analisis ini mencakup penilaian kemampuan sistem dalam memenuhi beban primer AC, total beban listrik, serta penetrasi energi terbarukan dan output daya terbarukan. Kapasitas operasi AC yang diperlukan juga dianalisis untuk memastikan stabilitas sistem. Hasil analisis ini memberikan wawasan mendalam tentang efisiensi dan kelayakan teknis sistem hidro, dengan fokus khusus pada Pembangkit Listrik Tenaga Pico Hidro (PLTPH) untuk irigasi di Desa Cintaraja.

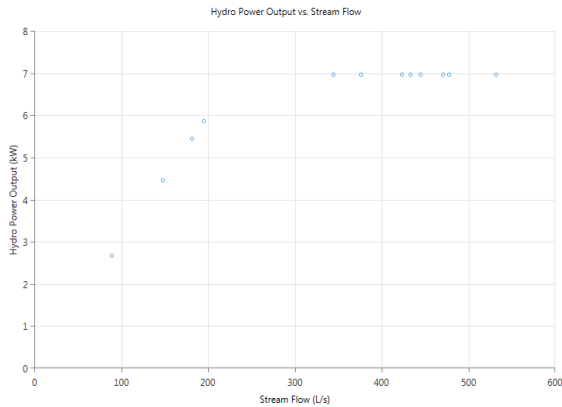
1) Analisis Debit Aliran dan Output Daya Hidro

Data bulanan menunjukkan adanya fluktuasi yang signifikan dalam debit aliran sungai (Stream Flow) dan output daya hidro (Hydro Power Output). Pada bulan Januari, debit aliran mencapai puncaknya di 532,14 L/S, menghasilkan output daya maksimum sebesar 6,96 kW, yang mencerminkan konversi energi yang sangat efisien selama periode ini. Sebaliknya, bulan Juli mencatat debit aliran terendah, yaitu 89,53 L/S, dengan output daya menurun menjadi 2,68 kW (Lihat Tabel 5.), menunjukkan penurunan efisiensi dan kapasitas pembangkit selama periode kekeringan. Selain itu, bulan-bulan transisi seperti Agustus dan November menunjukkan variasi dalam output daya, terkait dengan perubahan debit aliran (Lihat Gambar 13.).

Tabel 7. Analisis Aliran dan Daya Hydro

Bulan	Stream Flow (L/S)	Hydro Power Output (kW)
Januari	532,14	6,96
Februari	445,08	6,96
Maret	477,98	6,96
April	376,95	6,96
Mei	423,84	6,96
Juni	344,85	6,96
Juli	89,53	2,68
Agustus	148,24	4,45
September	432,53	6,96
Oktober	470,96	6,96
November	181,79	5,45

Bulan	Stream Flow (L/S)	Hydro Power Output (kW)
Desember	195,00	5,85



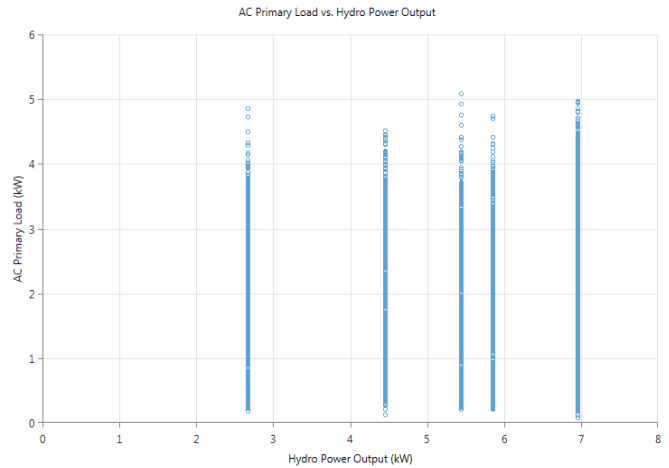
. Gambar 13. Grafik Aliran dan Daya Hydro

2) Analisis Daya Output dan Beban

Output energi dari sistem Pico Hydro menunjukkan fluktuasi sepanjang tahun, terutama pada bulan Juli dengan penurunan signifikan hingga 2,68 kW, yang kemungkinan dipengaruhi oleh variasi curah hujan dan aliran air. Sementara itu, beban AC tetap stabil antara 1,72 hingga 1,82 kW sepanjang tahun (Lihat Tabel 8.), mencerminkan ketergantungan pada pasokan listrik yang konstan. Fluktuasi output ini menekankan pentingnya manajemen energi yang efisien untuk memastikan bahwa pasokan listrik dari Pico Hydro dapat memenuhi kebutuhan beban secara konsisten, terutama saat output hidro berada pada titik terendah (Lihat Gambar 14.).

Tabel 8. Analisis Daya Output dan Beban

Bulan	Hydro Power Output (kW)	AC Primary Load (kW)
Januari	6,96	1,77
Februari	6,96	1,72
Maret	6,96	1,81
April	6,96	1,78
Mei	6,96	1,73
Juni	6,96	1,79
Juli	2,68	1,75
Agustus	4,45	1,82
September	6,96	1,78
Oktober	6,96	1,75
November	5,45	1,74
Desember	5,85	1,77



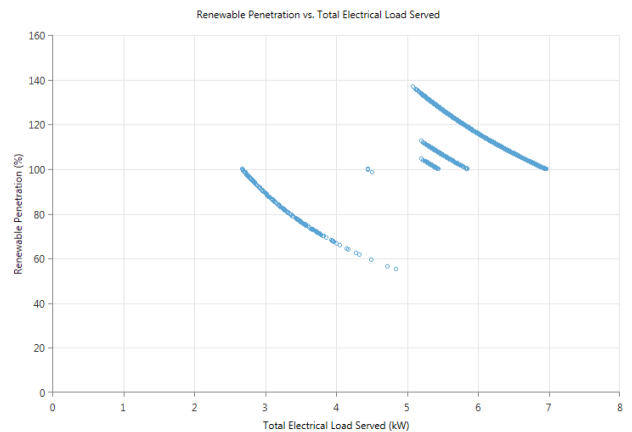
. Gambar 14. Grafik Daya Output dan Beban

3) Analisis Beban Listrik dan Penetrasi Energi Terbarukan

Data menunjukkan stabilitas beban listrik total yang dilayani oleh Pico Hydro sepanjang tahun, kecuali pada bulan Juli dan Agustus, ketika beban menurun dan penetrasi energi terbarukan turun dari 110% menjadi 95,66% (Lihat Tabel 9.). Fluktuasi ini mencerminkan ketidakseimbangan antara output energi Pico Hydro dan kebutuhan beban, dimana terjadi akibat variasi kondisi hidrologi. Meskipun demikian, penetrasi energi terbarukan tetap di atas 100% pada sebagian besar bulan, menunjukkan bahwa sistem ini mampu memenuhi kebutuhan energi dengan andal, bahkan dalam kondisi fluktuasi hidrologi (lihat Gambar 15.).

Tabel 9. Analisis Beban dan Penetrasi Energi Terbarukan

Bulan	Total Electrical Load Served (kW)	Renewable Penetration (%)
Januari	6,34	111,02
Februari	6,34	111,14
Maret	6,36	110,63
April	6,35	110,83
Mei	6,34	111,09
Juni	6,36	110,73
Juli	2,84	95,66
Agustus	4,45	99,97
September	6,36	110,60
Oktober	6,35	110,91
November	5,44	100,19
Desember	5,74	102,16



Gambar 15. Grafik Beban dan Penetrasi Energi

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data operasional Pembangkit Listrik Tenaga Pico Hydro (PLTPH) di Desa Cintaraja, beberapa kesimpulan dapat ditarik sebagai berikut:

1. PLTPH menunjukkan efisiensi operasional yang tinggi dengan kapasitas yang memadai untuk memenuhi kebutuhan energi desa sepanjang tahun, terutama selama musim hujan dengan debit air yang melimpah. Sistem ini mampu beroperasi di atas kapasitas nominal dalam kondisi hidrologi yang optimal.
2. Adanya penurunan signifikan dalam output daya pada bulan-bulan dengan debit air rendah, seperti Juli dan Agustus, yang berdampak pada ketergantungan sementara terhadap sumber energi eksternal, khususnya PLN. Penurunan ini menyoroti tantangan dalam mempertahankan pasokan energi yang stabil selama musim kemarau.
3. Penetrasi energi terbarukan pada PLTPH tetap di atas 100% pada sebagian besar bulan, menunjukkan bahwa sistem ini mampu menyediakan kebutuhan energi dengan andal. Meskipun ada fluktuasi dalam kondisi hidrologi, sistem ini tetap dapat memenuhi permintaan energi secara konsisten.

## REFERENSI

- [1] N. Gilmore, etc, "Continental-scale assessment of micro-pumped hydro energy storage using agricultural reservoirs", *Applied Energy*, Vol. 349 No. 1, 2023, doi : 10.1016/j.apenergy.2023.121715
- [2] R. Fang, etc, "Efficient harvesting of renewable evaporative energy from atmospheric air through hierarchical nano/microscale shaping of air-water interface", *Applied Energy*, Vol. 358 No. 15, 2023, doi : 10.1016/j.apenergy.2024.122655
- [3] D.A. Barkas, etc, "Sustainable Energy Harvesting through Triboelectric Nano – Generators: A Review of current status and applicationsm", *Energy Procedia* , Vol. 157 PP. 999-1010, 2019, doi : 10.1016/j.egypro.2018.11.267
- [4] H. Su, etc, "Harnessing the power of water: A review of hydroelectric nanogenerators", *Nano Energy* , Vol. 116, 2023, doi : 10.1016/j.nanoen.2023.108819
- [5] A. D. Palintin, E. A. Patandianan, and E. K. Bawan, "Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Kabupaten Pegunungan Arfak", *Igya Ser Hanjop: Jurnal Pembangunan Berkelanjutan*, Vol. 2 No.2, 2020, doi: 10.47039/ish.2.2020.11-24
- [6] M. Sofyan, and I. Sudana, "Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Berdasarkan Debit Air dan Kebutuhan Energi Listrik", *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan (JuLIET)*, Vol. 3, No. 2, 2022, doi : 10.22146/juliet.v3i2.64410
- [7] W. E. Putra, etc, "Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Sungai Yeh Dikis Banjar Lebah Kabupaten Tabanan", *Jurnal SPEKTRUM*, Vol. 10, No. 2, 2023, doi : 10.24843/SPEKTRUM.2023.v10.i02.p3
- [8] Fitri, etc, "Pengaruh Sudut Propeller Jenis Pelton terhadap Performa Pembangkit Listrik Nano Hidro Portabel dalam Kegiatan Luar Ruangan", *Jurnal Elkolind* , Vol. 10 No. 2, 2023, doi : 10.33795/elkolind.v10i2.3061
- [9] M. I. Malik, A. Adriansyah, and A. U. Shamsudin, "Techno-Economic Analysis Utilization of On-Grid Solar Photovoltaic Systems in Improving Energy Efficiency in Manufacturing Industries", *Journal of Integrated and Advanced Engineering (JIAE)*, Vol. 3, No. 2, Pp101-110, 2023, doi : 10.51662/jiae.v3i2.96
- [10] L. Lindawati, E. K. Sari, and Y. Ermawati, "Potensi Energi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Niagara Desa Rantau Nipis Kecamatan Banding Agung Kabupaten Ogan Komering Ulu Selatan", *Jurnal Deformasi*, Vol. 6 No. 2, Pp71-79, 2021, doi :10.31851/deformasi.v6i2.6472
- [11] P. Hartanto, "Sumberdaya Air Bagi Pemenuhan Masyarakat di Kabupaten Tasikmalaya Jawa Barat", *Riset Geologi dan Pertambangan*, Vol. 22, No. 2, pp. 143-155, 2012, doi: 10.14203/risetgeotam2012.v22.64.
- [12] R. Rendi, J. Arifin, M. Mujiburrahman, I.Trianiza, "Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air Mikrohidro di Sungai Pintab dan Sungai Amandit Kalimantan Selatan", *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, Vol. 4, No. 2, pp46-52, 2020, doi: 10.30588/jeemm.v4i2.733
- [13] Y. Nakanishi, etc. "Development of a Simple Impulse Turbine for Nano Hydropower", *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 4, No. 3, Pp567-577, 2009, doi: 10.1299/jfst.4.567
- [14] M. I. Malik, E. Ihsanto, "Design and Simulation High Pass Filter Second Order and C-Type Filter for Reducing Harmonics as Power Quality Repair Effort in the Automotive Industry," *Journal of Integrated and Advanced Engineering (JIAE)*, Vol. 3, No. 1, pp. 23-36, 2023, doi: 10.51662/jiae.v3i1.79.
- [15] A. Asriningati, A. Suryanto, "Desain Pemanfaatan Sistem Pembangkit Hybrid Diesel Generator-PV Interaktif Grid," *JTE UNIBA*, Vol. 6, No. 2, pp. 241-246, 2022, doi: 10.36277/jteuniba.v6i2.160
- [16] I. Imron, "Studi Penetrasi Distributed Generation Pada Sistem Distribusi Bantul Feeder Bantul 07," *JTE UNIBA*, Vol. 6, No. 1, pp. 169-174, 2021, doi: 10.36277/jteuniba.v6i1.110