Pengembangan Kawasan Agroeduwisata Cikundul Berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Air

Zidane Hakim[1*], Wahyu Gendam Prakoso[1] , Heny Purwanti[1]
[1]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Pakuan

Email: hzidane890@gmail.com*, wahyugendamprakoso@unpak.ac.id, henypurwanti@unpak.ac.id

Abstract

The Cikundul Agro-Educational Tourism Area (KAC) has renewable energy potential from the Cipelang River that has not been optimally utilized. This study aims to analyze the technical potential, economic feasibility, and environmental impact of developing a hydropower plant based on a Gravity Water Vortex Power Plant (GWVPP) in the area. The methods employed include hydrological analysis using the Gumbel distribution and F.J. Mock method, energy potential assessment, engineering economic analysis (NPV, IRR, BCR, LCOE, and Payback Period), and greenhouse gas (GHG) emission estimation. The results indicate that the dependable flow can support two turbine units with a total installed capacity of 62.08 kW and an annual energy production of 473,049.6 kWh, exceeding the area's electricity demand of 58,176 kWh/year. Economic analysis shows that the project is feasible, with an NPV of IDR 3,152,355,229, an IRR of 16.05%, a BCR of 1.13, an LCOE of IDR 235.92/kWh, and a payback period of 6 years and 1 month. The estimated GHG emissions are 14.19 tons CO_2e/year, which are significantly lower than those of coal-fired power plants. Therefore, the development of a GWVPP in KAC is technically, economically, and environmentally feasible and has the potential to support sustainable tourism area development.

Keywords: *gravity water vortex power plant, hydropower plant, renewable energy, economic feasibility, greenhouse gas emissions, agro-educational tourism.*

Abstrak

Kawasan Agroeduwisata Cikundul (KAC) memiliki potensi energi terbarukan dari Sungai Cipelang yang belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi teknis, kelayakan ekonomi, dan dampak lingkungan pengembangan pembangkit listrik tenaga air berbasis *Gravity Water Vortex Power Plant (*GWVPP) di kawasan tersebut. Metode yang digunakan meliputi analisis hidrologi dengan distribusi Gumbel dan metode F.J. Mock, perhitungan potensi energi, analisis ekonomi teknik (NPV, IRR, BCR, LCOE, dan Payback Period), serta estimasi emisi gas rumah kaca (GRK). Hasil penelitian menunjukkan bahwa debit andalan mampu mendukung dua unit turbin dengan total daya 62,08 kW dan produksi energi tahunan 473.049,6 kWh, melebihi kebutuhan listrik kawasan sebesar 58.176 kWh/tahun. Analisis ekonomi menunjukkan proyek layak dikembangkan dengan NPV Rp3.152.355.229, IRR 16,05%, BCR 1,13, LCOE Rp235,92/kWh, dan periode pengembalian investasi 6 tahun 1 bulan. Emisi GRK yang dihasilkan sebesar 14,19 ton CO_2e/tahun, lebih rendah dibandingkan pembangkit berbahan bakar batu bara. Dengan demikian, pengembangan GWVPP di KAC layak secara teknis, ekonomis, dan lingkungan serta berpotensi mendukung pengembangan kawasan wisata berkelanjutan.

Kata kunci: gravity water vortex power plant, pembangkit listrik tenaga air; energi terbarukan; kelayakan ekonomi; emisi gas rumah kaca; agroeduwisata.

1. Pendahuluan

Indonesia memiliki potensi energi air yang besar sebagai bagian dari strategi transisi energi dan pembangunan rendah karbon. Sungai Cipelang di Kota Sukabumi merupakan salah satu sumber daya air yang memiliki aliran relatif stabil dan berlokasi dekat Kawasan Agroeduwisata Cikundul (KAC). Pemanfaatan energi air skala kecil dinilai relevan untuk mendukung kebutuhan listrik kawasan berbasis edukasi, pertanian, dan pariwisata berkelanjutan. Analisis hidrologi menjadi tahap penting dalam perencanaan pemanfaatan energi air karena karakteristik debit sungai sangat menentukan potensi energi yang dapat dimanfaatkan serta desain bangunan air yang direncanakan [1].

ISSN (*Online*) 2747-0733

PLTA dikategorikan sebagai energi bersih karena tidak menghasilkan emisi langsung selama operasi [2]. Selain itu, teknologi *vortex* memungkinkan pemanfaatan head rendah dengan efisiensi yang memadai untuk skala mikrohidro.

Permasalahan penelitian ini adalah: (1) bagaimana karakteristik hidrologi Sungai Cipelang dan potensi energi yang dapat dibangkitkan? (2) apakah pembangunan PLTA berbasis vortex layak secara ekonomi? dan (3) bagaimana dampak lingkungannya dibandingkan pembangkit berbahan bakar fosil? Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi teknis, kelayakan ekonomi, dan dampak lingkungan pengembangan PLTA di KAC.

Penelitian ini penting karena hingga saat ini belum terdapat kajian komprehensif mengenai pemanfaatan Sungai Cipelang sebagai sumber energi terbarukan untuk kawasan agroeduwisata. Studi sebelumnya lebih banyak membahas aspek teknis PLTA secara umum [3][4], sementara integrasi antara analisis hidrologi, ekonomi teknik, dan emisi karbon dalam konteks kawasan wisata masih terbatas. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan model energi terbarukan skala kawasan berbasis pendekatan teknis–ekonomi–lingkungan yang terintegrasi untuk mendukung pembangunan berkelanjutan [5].

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode studi perencanaan teknis. Analisis hidrologi dilakukan untuk menentukan debit andalan Sungai Cipelang menggunakan data curah hujan selama 10 tahun. Distribusi curah hujan dianalisis dengan metode Gumbel, sedangkan debit andalan dihitung menggunakan metode F.J. Mock dengan probabilitas keandalan 80%. Analisis hidrologi merupakan tahapan penting dalam perencanaan bangunan air karena karakteristik debit sungai sangat menentukan potensi energi air yang dapat dimanfaatkan serta kapasitas sistem pembangkit yang dirancang [1].

Objek penelitian adalah Sungai Cipelang di Kecamatan Lembursitu, Kota Sukabumi, yang berada di sekitar Kawasan Agroeduwisata Cikundul. Data yang digunakan merupakan data sekunder berupa curah hujan harian, data klimatologi, luas daerah tangkapan air, serta data kebutuhan listrik kawasan. Pemilihan lokasi didasarkan pada potensi aliran stabil dan kedekatan dengan pusat beban listrik kawasan.. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Gambar 1 Lokasi Sungai Cipelang dan Kawasan Agroeduwisata Cikundul Kota Sukabumi
***Sumber: Google Earth,* 2024**

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui studi dokumentasi dengan meminta data curah hujan dan data hidrologi kepada UPTD PSDA Cisadea-Cibareno serta instansi terkait lainnya serta survei lapangan. Analisis data meliputi perhitungan potensi daya dan energi tahunan berdasarkan *head* efektif dan debit turbin, perencanaan komponen vortex, serta analisis kelayakan ekonomi menggunakan indikator NPV, IRR, BCR, LCOE, dan *Payback Period* dengan umur proyek 25 tahun dan *discount rate* 14%. Analisis dampak lingkungan dilakukan melalui perbandingan estimasi emisi GRK antara PLTA dan pembangkit batu bara.

3. Hasil dan Pembahasan

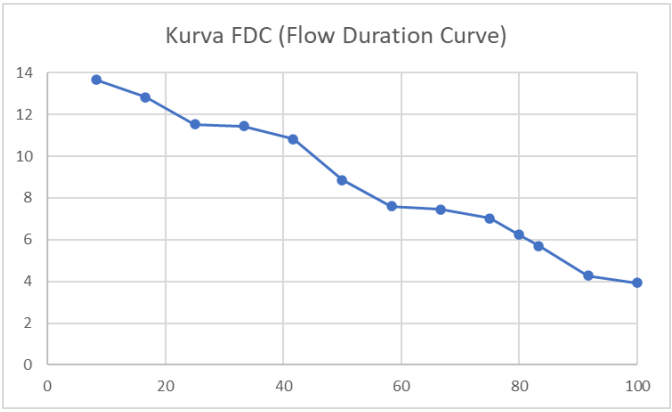
3.1 Analisis Potensi Hidrologi dan Debit Andalan

Analisis hidrologi dilakukan untuk menentukan debit andalan Sungai Cipelang sebagai dasar perencanaan *Gravity Water Vortex Power Plant* (GWVPP). Perhitungan debit dilakukan menggunakan metode F.J. Mock berdasarkan data curah hujan selama periode 2014–2023. Metode ini mempertimbangkan komponen neraca air berupa curah hujan, evapotranspirasi, infiltrasi, penyimpanan air tanah (groundwater storage), base flow, dan direct runoff sehingga diperoleh debit bulanan sungai. Hasil simulasi menunjukkan bahwa debit Sungai Cipelang berkisar antara 3,93 m³/s hingga 13,65 m³/s. Debit tertinggi terjadi pada bulan November sebesar 13,65 m³/s, sedangkan debit terendah terjadi pada bulan Agustus sebesar 3,93 m³/s. Variasi debit tersebut dipengaruhi oleh pola curah hujan musiman yang terjadi di wilayah penelitian.

Untuk menentukan debit andalan, data debit bulanan hasil metode F.J. Mock diurutkan dari nilai terbesar hingga terkecil, kemudian dianalisis menggunakan *Flow Duration Curve* (FDC). Probabilitas keandalan dihitung menggunakan metode Weibull sebagai berikut:

$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\%$$

dengan P adalah probabilitas keandalan (%), *m* adalah nomor urut data debit, dan *n* adalah jumlah data pengamatan.



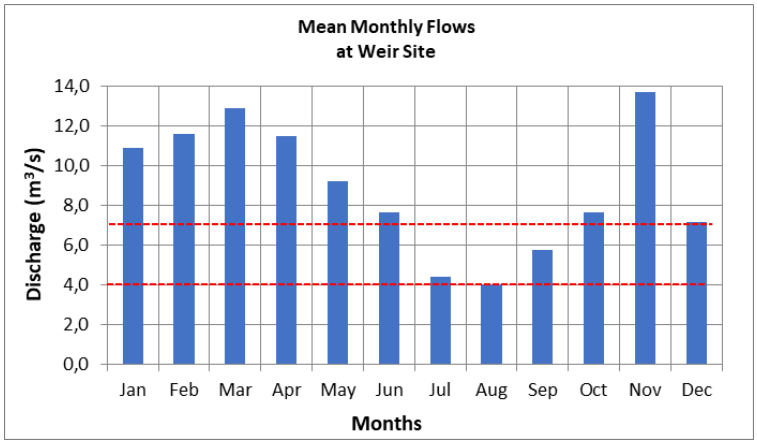
Gambar 2. Grafik *Flow Duration Curve* (FDC)

Berdasarkan Gambar 2, diperoleh debit andalan pada tingkat keandalan 80% (Q80) sebesar 6,23 m³/s. Nilai tersebut menunjukkan bahwa debit sebesar 6,23 m³/s tersedia atau dapat terlampaui selama 80% waktu pengamatan. Debit andalan Q80 dipilih sebagai debit rencana karena tingkat keandalan tersebut umum digunakan pada perencanaan pembangkit listrik tenaga air skala kecil untuk menjamin kontinuitas operasi pembangkit sepanjang tahun. Nilai Q80 sebesar 6,23 m³/s menunjukkan bahwa Sungai Cipelang memiliki ketersediaan air yang relatif stabil untuk mendukung pengoperasian dua unit turbin GWVPP. Dengan debit tersebut, masing-masing turbin direncanakan menerima debit sebesar 3,19 m³/s sehingga kapasitas pembangkit dapat dimanfaatkan secara optimal.

3.2 Variasi Debit Bulanan

Selain analisis debit andalan, karakteristik hidrologi Sungai Cipelang juga dievaluasi berdasarkan variasi debit bulanan. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui fluktuasi debit sepanjang tahun yang berpengaruh terhadap kontinuitas produksi energi listrik.

ISSN (*Online*) 2747-0733



Gambar 3. Debit Rata-rata Bulanan

Gambar 3 menunjukkan pola musiman yang cukup jelas, dengan debit tertinggi terjadi pada bulan November sebesar 13,65 m³/s dan debit terendah pada bulan Agustus sebesar 3,93 m³/s. Meskipun terjadi penurunan debit pada musim kemarau, nilai debit yang tersedia masih berada dalam rentang operasional GWVPP. Kondisi ini menunjukkan bahwa Sungai Cipelang memiliki kontinuitas aliran yang memadai untuk mendukung pembangkitan energi listrik secara berkelanjutan.

3.3 Analisis Potensi Energi dan Kebutuhan Listrik

Potensi daya listrik dihitung berdasarkan debit andalan (Q80) yang diperoleh dari analisis hidrologi dan tinggi jatuh air efektif (effective head) pada lokasi penelitian. Berdasarkan hasil survei topografi menggunakan Google Earth, diperoleh elevasi tertinggi sebesar 454 m dan elevasi terendah sebesar 452,62 m sehingga head bruto sebesar 1,38 m. Dengan asumsi kehilangan energi (head losses) sebesar 10%, diperoleh head efektif sebesar 1,24 m. Potensi daya hidraulik dihitung menggunakan persamaan:

$$P = \eta \rho g Q H$$

dengan:

P = daya listrik (W)
η = efisiensi sistem
ρ = massa jenis air (1000 kg/m³)
g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
Q = debit aliran (m³/s)
H = tinggi jatuh air efektif (m)

Selanjutnya dilakukan pemilihan jenis dan jumlah turbin yang sesuai dengan karakteristik hidrologi Sungai Cipelang yang memiliki head rendah dan debit relatif stabil. Berdasarkan karakteristik tersebut, turbin Gravity Water Vortex dipilih karena mampu beroperasi secara optimal pada kondisi head rendah, memiliki konstruksi yang sederhana, serta ramah lingkungan. Untuk meningkatkan keandalan operasi dan menjaga kontinuitas pembangkitan selama pemeliharaan maupun fluktuasi debit, sistem dirancang menggunakan dua unit turbin.

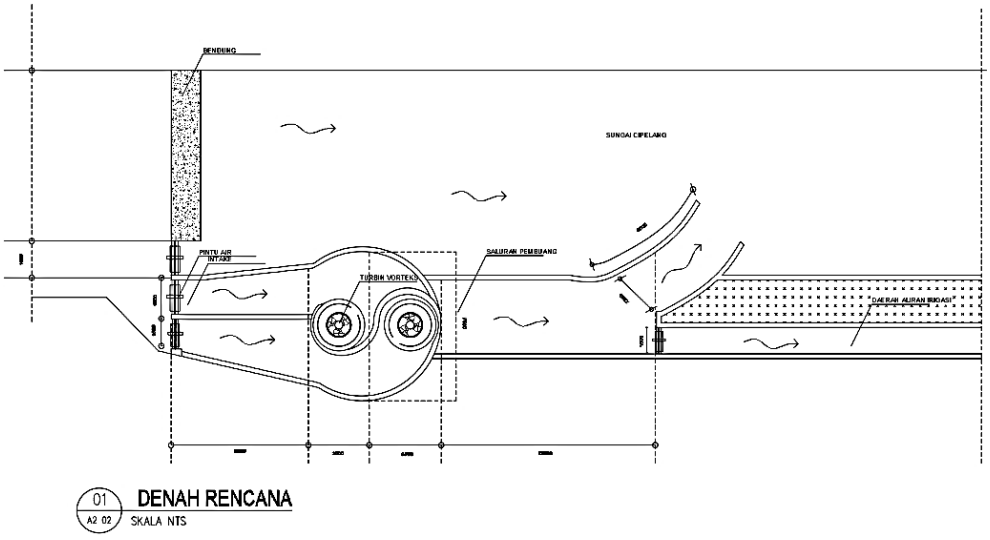
Debit andalan Q80 sebesar 6,23 m³/s didistribusikan ke dalam dua unit turbin sehingga masing-masing menerima debit sekitar 3,19 m³/s. Dengan head efektif sebesar 1,24 m dan efisiensi sistem 80%, diperoleh daya terbangkit sebesar 31,04 kW pada setiap unit turbin. Dengan demikian, total kapasitas terpasang yang dapat dihasilkan mencapai 62,08 kW. Produksi energi tahunan dihitung berdasarkan variasi debit bulanan Sungai Cipelang. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada bulan Juli, Agustus, dan September debit sungai berada di bawah kebutuhan operasi dua turbin secara bersamaan sehingga hanya satu turbin yang dapat dioperasikan. Dengan mempertimbangkan kondisi tersebut, produksi energi listrik yang dapat dihasilkan diperkirakan mencapai 473.049,6 kWh per tahun.

Tabel 1. Kebutuhan Listrik di Kawasan Agroeduwisata Cikundul

No	Area Agroeduwisata Cikundul	Daya (VA)	Waktu Operasional (Jam)	Kebutuhan Listrik per Hari (Watt-Hour)	Kebutuhan Listrik per Bulan (Watt-Hour)
1	Instalasi Screenhouse	1300	16	20800	624000
2	Laboratorium Kultur Jaringan	1300	16	20800	624000
3	Aula dan Ruang Serba Guna	1300	16	20800	624000
4	Budidaya Ikan Air Tawar	2200	16	35200	1056000
5	Rumah Jamur	1300	16	20800	624000
6	Unit Penggemukan Sapi	900	16	14400	432000
7	Wisata Bumi Perkemahan	900	16	14400	432000
8	Mushola	900	16	14400	432000
	Jumlah	10100		161600	4848000
				12 bulan	58176000

Sumber: UPTD Kawasan Agroeduwisata Cikundul, 2024

Berdasarkan Tabel 1, kebutuhan listrik Kawasan Agroeduwisata Cikundul sebesar 58.176 kWh/tahun. Sementara itu, sistem GWVPP yang direncanakan mampu menghasilkan energi sebesar 473.049,6 kWh/tahun. Dengan demikian, energi yang dihasilkan sekitar 8,1 kali lebih besar dibandingkan kebutuhan listrik kawasan. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem GWVPP tidak hanya mampu memenuhi kebutuhan energi eksisting, tetapi juga menyediakan surplus energi yang dapat dimanfaatkan untuk pengembangan fasilitas kawasan pada masa mendatang.

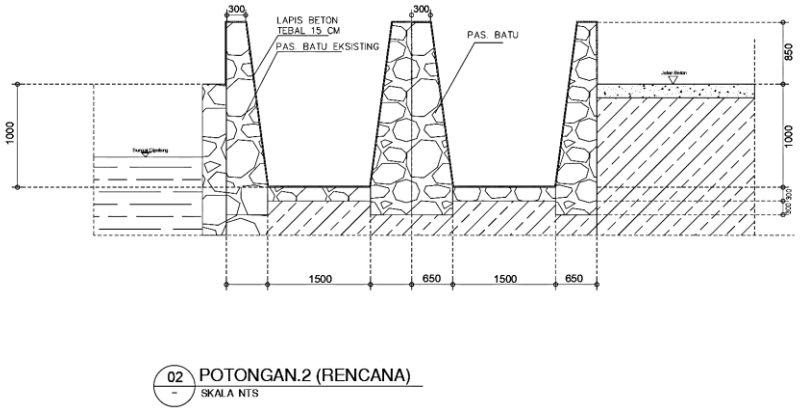


Gambar 4. Denah Rencana Sistem GWVPP di Sungai Cipelang

Gambar 4 menunjukkan tata letak rencana sistem *Gravity Water Vortex Power Plant* (GWVPP) yang dirancang pada Sungai Cipelang. Sistem terdiri atas bangunan intake sebagai pengarah aliran, saluran pembawa menuju bak turbin vortex, dua unit turbin vortex yang dipasang secara paralel, serta saluran pembuang yang mengembalikan aliran ke badan sungai. Konfigurasi ini dirancang untuk memanfaatkan debit andalan dan *head* efektif secara optimal pada kondisi *head* rendah.

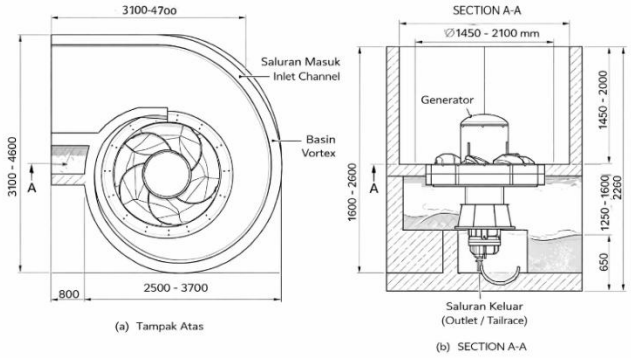
Tata letak sistem pembangkit yang direncanakan pada Sungai Cipelang ditunjukkan pada Gambar 5. Untuk memperlihatkan konfigurasi vertikal dan dimensi bangunan air yang digunakan pada sistem turbin *vortex*, potongan bangunan ditampilkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.

ISSN (*Online*) 2747-0733



Gambar 5. Potongan Rencana Saluran Masuk

Potongan bangunan air pada sistem pembangkit ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar tersebut memperlihatkan konfigurasi saluran masuk (*intake*), basin turbin vortex, serta saluran pembuang (*tailrace*) yang direncanakan pada Sungai Cipelang. Aliran air dari sungai diarahkan melalui saluran masuk menuju basin turbin dengan pola aliran tangensial, sehingga membentuk pusaran air (vortex) di dalam basin silinder. Pusaran tersebut menghasilkan energi kinetik yang dimanfaatkan untuk memutar turbin dan menghasilkan energi listrik.



Gambar 6. Detail Basin Turbin *Vortex*

Setelah melewati turbin, air dialirkan kembali ke sungai melalui saluran pembuang tanpa menyebabkan perubahan signifikan terhadap karakteristik aliran sungai. Secara teknis, konfigurasi bangunan air ini dirancang untuk menjaga kontinuitas aliran, meningkatkan efisiensi konversi energi, serta memudahkan proses konstruksi dan pemeliharaan sistem pembangkit. Penempatan dua unit turbin *vortex* dilakukan untuk meningkatkan kapasitas daya terpasang sekaligus menjaga fleksibilitas operasional saat terjadi variasi debit musiman. Aliran air yang masuk melalui intake diarahkan secara tangensial ke dalam basin silinder sehingga membentuk pusaran (*vortex*) yang menghasilkan energi kinetik untuk memutar turbin. Setelah melewati turbin, air dialirkan kembali ke sungai melalui saluran pembuang tanpa mengubah karakteristik aliran secara signifikan. Secara teknis, tata letak ini mempertimbangkan aspek kontinuitas aliran, efisiensi konversi energi, serta kemudahan konstruksi dan pemeliharaan. Dengan konfigurasi tersebut, sistem diharapkan mampu beroperasi secara stabil sesuai debit rencana dan mendukung produksi energi tahunan yang telah dihitung pada analisis sebelumnya.

3.4 Analisis Kelayakan Ekonomi

Kelayakan ekonomi pengembangan GWVPP di Sungai Cipelang dievaluasi menggunakan indikator *Net Present* Value (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Benefit Cost Ratio* (BCR), *Levelized Cost of Energy* (LCOE), dan *Payback Period* (PBP). Hasil analisis disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisis Kelayakan Ekonomi Pengembangan GWVPP

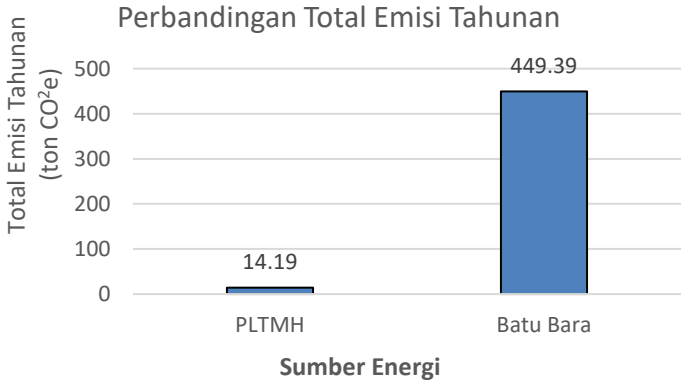
Indikator Ekonomi	Nilai / Hasil	Parameter Kelayakan	Keterangan
NPV (*Net Present Value*)	Rp3.152.355.229	> 0	**Layak**
IRR (*Internal Rate of Return*)	16,05%	> 14%	**Layak**
BCR (*Benefit Cost Ratio*)	1,13	> 1	**Layak**
LCOE (*Levelized Cost of Energy*)	Rp235,92/kWh	< Rp1.447,77 (Tarif PLN)	**Sangat Kompetitif**
PBP (*Payback Period*)	6 Tahun 1 Bulan	-	Pengembalian Investasi

Berdasarkan Tabel 2, nilai NPV sebesar Rp3.152.355.229 menunjukkan bahwa proyek mampu menghasilkan manfaat bersih positif selama umur rencana pembangkit. Nilai positif tersebut mengindikasikan bahwa seluruh biaya investasi dan operasional dapat tertutupi oleh manfaat ekonomi yang diperoleh. Nilai IRR sebesar 16,05% lebih tinggi dibandingkan tingkat suku bunga acuan sebesar 14%, sehingga investasi dinilai mampu memberikan tingkat pengembalian yang lebih baik dibandingkan alternatif investasi dengan risiko sebanding. Selain itu, nilai BCR sebesar 1,13 menunjukkan bahwa setiap Rp1,00 biaya yang dikeluarkan menghasilkan manfaat sebesar Rp1,13, sehingga proyek layak untuk dikembangkan. Dari aspek biaya produksi energi, nilai LCOE yang diperoleh sebesar Rp235,92/kWh. Nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan tarif listrik PLN sebesar Rp1.447,77/kWh, yang menunjukkan bahwa energi listrik yang dihasilkan memiliki tingkat daya saing ekonomi yang tinggi. Sementara itu, periode pengembalian investasi (*Payback Period*) selama 6 tahun 1 bulan tergolong relatif cepat dibandingkan umur operasional pembangkit yang direncanakan.

Secara keseluruhan, seluruh indikator ekonomi menunjukkan hasil yang memenuhi kriteria kelayakan. Dengan demikian, pengembangan GWVPP di Sungai Cipelang layak untuk direalisasikan dari aspek finansial dan berpotensi menjadi alternatif penyediaan energi yang ekonomis bagi Kawasan Agroeduwisata Cikundul.

3.5 Analisis Dampak Lingkungan

Analisis dampak lingkungan dilakukan dengan membandingkan intensitas emisi gas rumah kaca (GRK) antara sistem PLTMH yang direncanakan di Kawasan Agroeduwisata Cikundul (KAC) dan pembangkit listrik berbasis batu bara. Berdasarkan data intensitas emisi dari *International Energy Agency* (IEA), faktor emisi rata-rata pembangkit listrik tenaga air skala kecil sebesar 30 gCO^2e/kWh, sedangkan pembangkit listrik berbahan bakar batu bara mencapai 950 gCO^2e/kWh. Dengan estimasi produksi energi tahunan sebesar 473.049,6 kWh, emisi tahunan PLTMH diperkirakan sebesar 14,19 ton CO^2e, sedangkan pembangkit berbasis batu bara dengan produksi energi yang sama menghasilkan emisi sebesar 449,39 ton CO^2e per tahun. Perbandingan total emisi tahunan kedua sistem pembangkitan ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan Emisi Gas Rumah Kaca Tahunan PLTMH dan Pembangkit Batu Bara

ISSN (*Online*) 2747-0733

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa penggunaan PLTMH berpotensi menurunkan emisi sebesar 435,2 ton CO_2e per tahun dibandingkan pembangkit batu bara. Selisih yang signifikan ini mengindikasikan bahwa pengembangan pembangkit berbasis energi air tidak hanya memenuhi aspek kelayakan teknis dan ekonomis, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap mitigasi perubahan iklim. Temuan ini sejalan dengan strategi transisi energi rendah karbon yang menekankan pengembangan energi terbarukan sebagai upaya pengurangan emisi sektor ketenagalistrikan

4. Kesimpulan

Sungai Cipelang memiliki potensi yang memadai untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga air berbasis *Gravity Water Vortex Power Plant* (GWVPP). Berdasarkan analisis hidrologi, diperoleh kapasitas terpasang sebesar 62,08 kW dengan produksi energi tahunan mencapai 473.049,6 kWh. Hasil analisis ekonomi menunjukkan bahwa proyek layak untuk dikembangkan dengan nilai NPV sebesar Rp3.152.355.229, IRR 16,05%, BCR 1,13, LCOE Rp235,92/kWh, serta periode pengembalian investasi selama 6 tahun 1 bulan. Dari aspek lingkungan, emisi GRK yang dihasilkan sebesar 14,19 ton CO_2e/tahun, lebih rendah dibandingkan pembangkit berbahan bakar batu bara. Dengan demikian, pengembangan GWVPP di Kawasan Agroeduwisata Cikundul layak secara teknis, ekonomis, dan lingkungan serta berpotensi mendukung pengembangan kawasan wisata berkelanjutan. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan perencanaan teknis yang lebih rinci serta analisis sensitivitas ekonomi terhadap perubahan biaya investasi dan tarif listrik.

Referensi

[1] W. G. Prakoso dan D. A. Ismiralda, "Hydrological and Hydraulic Modelling of Sekolo River Diversion for Coal Mining Activities," Civilla: Jurnal Teknik Sipil Universitas Islam Lamongan, vol. 9, no. 1, 2024.

[2] B. Sosilo, Pembangkit Listrik Tenaga Air sebagai Energi Bersih, Jakarta: Penerbit Energi Terbarukan, 2016.

[3] A. Arismunandar, Teknik Mesin dan Konversi Energi, Jakarta: Penerbit ITB, 1991.

[4] S. Wiranata, Analisis Ekonomi Proyek PLTA: NPV, BCR, dan IRR, Jakarta: Penerbit Manajemen Proyek, 2012.

[5] H. Purwanti, "Pengelolaan Lingkungan dalam Pembangunan Berkelanjutan," Jurnal Teknik Sipil, vol. 16, no. 2, 2020.