

Optimization of the Development of the Tambak Lorok Floating Solar Power Plant for Self-Consumption (SC) through a Technical and Economic Analysis

(Optimalisasi Pengembangan Floating PLTS Tambak Lorok untuk Pemakaian Sendiri (PS) dengan Kajian Aspek Teknik dan Ekonomi)



Much Bahrhun Idris ^{a,1,*}, Heri Susanto ^{a,2}, Jaka Windarta ^{a,3}

^a Program Studi Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro, Semarang, 50241, Indonesia

E-mail: ¹mbi_jmk@yahoo.co.id; ²herisusanto@undip.ac.id; ³jakawindarta@lecturer.undip.ac.id;

*Corresponding Author.

E-mail address: mbi_jmk@yahoo.co.id (M.B. Indris).

Received: April 11, 2026 | Revised: April 19, 2026 | Accepted: April 22 2026



Abstract: Global climate change and rising greenhouse gas (GHG) emissions demand an accelerated transition from fossil fuels to sustainable energy systems. Floating solar power plants (FSPs) are one strategy for integrating renewable and conventional energy sources by utilizing water bodies without causing land-use conflicts. However, this implementation faces challenges related to fluctuations in solar irradiance, aquatic environmental characteristics, and economic uncertainty in investment, particularly for self-consumption schemes at existing power plants such as the Tambak Lorok Combined Cycle Power Plant (CCPP) in Semarang City. This study aims to analyze the technical feasibility, contribution to CO₂ emission reduction, and economic viability of developing a floating PV plant at Tambak Lorok. The research methodology employs a quantitative-analytical approach based on secondary data and system simulation. The study utilizes data on solar irradiance, meteorology, technical specifications of modules and inverters, electricity consumption data from the gas-fired power plant, and project economic parameters. The analysis was conducted through technical, environmental, economic, and integrative approaches. The results show that a 1.166 MWp floating solar power plant system is capable of generating approximately 1,810 MWh of electricity per year, with a performance ratio (PR) of around 85%, indicating efficient system performance. From an environmental perspective, this system has the potential to reduce carbon emissions by approximately 1,085 tons of CO₂ per year, or about 32,558 tons of CO₂ over the project's 30-year lifespan. Economically, the project is deemed viable, with a net present value (NPV) of Rp5.45 billion, an internal rate of return (IRR) of 12.8%, and a payback period of 11.48 years. These results indicate that the development of a floating solar power plant in Tambak Lorok is technically feasible, provides significant environmental benefits, and is economically profitable, thereby having the potential to serve as a model for the energy transition of fossil-fuel-based power plants in Indonesia.

Keywords: decarbonization; energy transition; floating solar power plants; renewable energy; CO₂ emissions.

Abstrak: Perubahan iklim global dan meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) menuntut percepatan transisi dari energi fosil menuju sistem energi berkelanjutan. Floating PLTS (PLTS terapung) merupakan salah satu strategi integrasi energi terbarukan dan konvensional yang memanfaatkan area perairan tanpa menimbulkan konflik lahan. Namun, implementasi ini menghadapi permasalahan berupa fluktuasi iradiasi matahari, karakteristik lingkungan perairan, serta ketidakpastian keekonomian investasi, terutama untuk skema pemakaian sendiri (self-consumption) pada pembangkit eksisting seperti PLTGU Tambak Lorok, Kota Semarang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan teknis, kontribusi penurunan emisi CO₂, dan kelayakan ekonomi pengembangan floating PLTS di Tambak Lorok. Metode



penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif-analitis berbasis data sekunder dan simulasi sistem. Penelitian ini menggunakan data iradiasi matahari, meteorologi, spesifikasi teknis modul dan inverter, data konsumsi listrik PLTGU, serta parameter ekonomi proyek. Analisis dilakukan melalui pendekatan teknis, lingkungan, ekonomi, dan integratif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem floating PLTS berkapasitas 1,166 MWp mampu menghasilkan energi listrik sebesar ± 1.810 MWh/tahun, dengan nilai performance ratio (PR) sekitar 85%, yang menunjukkan kinerja sistem yang efisien. Dari aspek lingkungan, sistem ini berpotensi mengurangi emisi karbon sebesar ± 1.085 ton CO₂ per tahun atau sekitar 32.558 ton CO₂ selama umur proyek 30 tahun. Secara ekonomi, proyek ini dinyatakan layak dengan nilai net present value (NPV) sebesar Rp5,45 miliar, internal rate of return (IRR) sebesar 12,8%, dan payback period selama 11,48 tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa pengembangan floating PLTS di Tambak Lorok layak secara teknis, memberikan manfaat lingkungan yang signifikan, serta menguntungkan secara ekonomi, sehingga berpotensi menjadi model implementasi transisi energi pada pembangkit listrik berbasis fosil di Indonesia.

Kata kunci: dekarbonisasi; emisi CO₂; energi terbarukan; floating plts; transisi energi.

Pendahuluan

Perubahan iklim merupakan fenomena global yang ditandai oleh perubahan pola unsur iklim dan cuaca yang semakin nyata, dengan dampak luas seperti krisis pangan, air, dan kerusakan infrastruktur (IPCC, 2022). Kondisi ini diperparah oleh aktivitas manusia, seperti industrialisasi, urbanisasi, pertumbuhan penduduk, dan penggunaan kendaraan pribadi, yang meningkatkan emisi karbon, khususnya CO₂ sebagai gas rumah kaca penyebab pemanasan global. Di Indonesia, sektor energi menjadi penyumbang terbesar emisi GRK, mencapai 59% dari total nasional, dengan PLTU batu bara sebagai kontributor utama (KLHK, 2024). Secara global, PLTU batu bara menghasilkan sekitar 9,99 miliar ton CO₂ pada tahun 2024, dengan Indonesia menempati posisi ketiga sebesar 244 juta ton CO₂ (Global Energy Monitor, 2024). Tanpa intervensi signifikan, emisi global diperkirakan mencapai 50 gigaton CO₂ per tahun dan meningkatkan suhu hingga 3°C pada akhir abad ke-21 (Climate Action Tracker, 2024). Melalui Perjanjian Paris, Indonesia berkomitmen menekan emisi melalui target *enhanced nationally determined contributions* (ENDC) sebesar 31,89% atau hingga 43,20% dengan dukungan internasional pada tahun 2030 (Kementerian Lingkungan Hidup, 2025).

Pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT) menjadi langkah utama untuk mencapai target ENDC dan *net zero emissions* (NZE) tersebut. Strategi ini dinilai mampu menjadi solusi atas keterbatasan sumber energi konvensional sekaligus memberikan manfaat lingkungan yang berkelanjutan (Ellabban et al., 2014). Pemerintah Indonesia telah menargetkan capaian EBT minimal 23% pada tahun 2025 dan meningkat hingga 25% pada tahun 2038. Salah satu sektor EBT yang paling banyak dikembangkan saat ini adalah pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Hal ini didukung oleh potensi energi surya di Indonesia yang mencapai 207.898 MW (4,80 kWh/m²/hari), namun pemanfaatannya masih sangat rendah, yaitu sekitar 0,05%, dengan total kapasitas terpasang sekitar 100 MW. Kesenjangan antara potensi dan realisasi ini menunjukkan adanya tantangan dalam implementasi teknologi PLTS, baik dari aspek teknis, ekonomi, maupun integrasi dengan sistem pembangkit eksisting. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang lebih aplikatif dan kontekstual untuk mengoptimalkan pemanfaatan PLTS, khususnya pada skema yang dapat langsung mendukung kebutuhan energi di lokasi pembangkit.

Pemerintah telah menargetkan pembangunan PLTS di berbagai wilayah dengan kapasitas total 6,5 GW untuk meningkatkan pemanfaatan potensi energi surya tersebut (Kementerian ESDM RI, 2019). Salah satu inovasi dalam pengembangan PLTS adalah *floating PLTS*, yaitu sistem PV yang diinstalasikan di atas permukaan air, seperti danau atau waduk. *Floating PLTS* memiliki berbagai keunggulan dibandingkan PLTS darat, antara lain peningkatan efisiensi pembangkit, minimnya gangguan terhadap penggunaan lahan, serta penurunan tingkat evaporasi air (Rifansyah & Hakam, 2024). Penelitian oleh Aboshosha dan Hamad (2024) mengembangkan desain *floating PLTS* di Danau Nasser, Mesir, menggunakan analisis GIS,

simulasi CAD, dan perangkat lunak PVsyst. Sistem tersebut menghasilkan kapasitas energi sebesar 47 TWh/tahun dengan efisiensi 84,9%, serta mampu mengurangi evaporasi hingga 1,7 miliar m³/tahun dengan pemanfaatan 20% permukaan danau. Selain itu, Dzamesi et al. (2024) membandingkan kinerja sistem PV pada PLTS darat dan *floating PLTS* di Stasiun Bui, Ghana, menggunakan data SCADA tahun 2022. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *floating PLTS* memiliki suhu panel yang lebih rendah (42,75°C), efisiensi sistem sebesar 18,51%, dan rasio kinerja sebesar 91,66%, yang lebih tinggi dibandingkan PLTS darat.

Efisiensi pembangkit listrik pada sistem *floating PLTS* sangat dipengaruhi oleh faktor iradiasi matahari. Fluktuasi sudut datang sinar matahari dan intensitas iradiasi yang diterima modul PV dapat memengaruhi kinerja sistem dan menurunkan produksi listrik, sehingga berpotensi menghambat upaya penurunan emisi CO₂ (Wei et al., 2024). Li et al. (2021) juga menyatakan bahwa fluktuasi tingkat iradiasi matahari dapat menyebabkan variabilitas output energi dari sistem PV. Hal ini menjadi kendala dalam pemenuhan kebutuhan listrik yang cenderung konstan dan terus meningkat, khususnya dalam penyediaan energi listrik ramah lingkungan.

Selain itu, kualitas dan material modul PV juga menjadi faktor penting dalam pengembangan teknologi *floating PLTS*. Dallaev et al. (2023) menunjukkan bahwa material PV berbasis silikon monokristalin dapat meningkatkan efisiensi sistem PLTS sebesar 15–24%. Efisiensi ini sangat krusial karena berpengaruh langsung terhadap produksi listrik dan potensi penurunan emisi CO₂. Oleh karena itu, diperlukan kajian lebih lanjut mengenai pengaruh iradiasi matahari dan jenis material modul PV terhadap efisiensi kinerja PLTS, khususnya pada sistem *floating PLTS* dengan karakteristik lingkungan perairan.

Selain bermanfaat bagi lingkungan berkelanjutan, PLTS juga memberikan keuntungan dari sisi ekonomi, terutama dalam jangka panjang.

Metode

Pengembangan *floating PLTS* dilakukan pada bulan Oktober 2024 hingga bulan Juni 2025 di Tambak Lorok, Margorejo, Kota Semarang, Jawa Tengah, yang memiliki luas lahan sebesar 1 hektare dengan luas pengembangan 5.000 m². Tambak tersebut berada pada koordinat geografis -6,95° Lintang Selatan dan 110,43° Bujur Timur. Tambak berada pada wilayah dengan iklim tropis yang memiliki ketinggian 10 meter di atas permukaan laut dan zona waktu UTC+7.

Penelitian kuantitatif deskriptif ini dilakukan untuk menganalisis kinerja dan potensi PLTS terapung di Tambak Lorok. Data kuantitatif penelitian ini merupakan data primer yang berasal dari pengukuran dan data sekunder dari laporan instansi terkait. Rincian dan jenis data dalam penelitian ini dapat ditinjau pada [Tabel 1](#). Penelitian ini memiliki variabel bebas, yaitu jenis PV-modul, sedangkan variabel terikatnya adalah efisiensi produksi listrik dari *floating PLTS* Tambak Lorok. Data juga dianalisis dari sisi kelayakan ekonomi serta potensi *floating PLTS* dalam memenuhi kebutuhan energi untuk PS di PLTGU Tambak Lorok. Kelayakan ekonomi dianalisis berdasarkan indikator NPV, IRR, dan payback period (PBP). Objek penelitian ini adalah menganalisis pengaruh jenis modul PV sebagai variabel bebas terhadap efisiensi produksi listrik sebagai variabel terikat pada sistem PLTS. Jenis PV-modul yang diteliti disesuaikan dengan panduan dalam Standar Pembangkit Listrik Negara (SPLN), dengan rincian sebagaimana pada [Tabel 1](#).

Tabel 1. Jenis dan Sumber Data yang Digunakan

Kategori Data	Jenis Data Spesifik	Sumber Data
Data Primer	Kondisi operasional aktual, biaya pemeliharaan spesifik, tantangan teknis lapangan, prosedur internal.	Wawancara semi-terstruktur dengan Manajer/Insinyur Operasional PLTGU Tambak Lorok; Observasi langsung di lokasi PLTS.

Kategori Data	Jenis Data Spesifik	Sumber Data
Data Sekunder		
Teknis	<i>Data sheet</i> PV-Modul (efisiensi, koefisien suhu), spesifikasi inverter, diagram satu garis, tata letak modul.	Dokumentasi Proyek (PT PLN), situs website pabrikan komponen, Standar PLN (SPLN).
Lingkungan	Data iradiasi matahari bulanan/harian (GHI, DNI), suhu ambien rata-rata untuk wilayah Semarang.	Database meteorologi PVSyst (Meteonorm 8.0), Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Stasiun Klimatologi Semarang.
Ekonomi	Biaya investasi awal (CAPEX), biaya O&M tahunan, harga tarif listrik industri, harga referensi kredit karbon (IDXCarbon).	Laporan Keuangan Proyek (jika tersedia), RUPTL PLN, publikasi Kementerian ESDM, data pasar karbon.
Operasional	Data historis konsumsi listrik bulanan untuk PS di PLTGU Tambak Lorok.	Departemen Operasional PT PLN Unit Induk Pembangkitan Tanjung Jati B.
Referensi	Faktor emisi GRK jaringan listrik Jawa-Bali, tingkat suku bunga diskonto (BI <i>Rate + risk premium</i>).	Laporan resmi Kementerian ESDM, Bank Indonesia, jurnal ilmiah, dan publikasi IPCC.

Penelitian ini mengumpulkan data menggunakan metode triangulasi, yaitu simulasi menggunakan PVSyst V8.0.20 melalui metode *hourly simulation* dengan algoritma Perez. Simulasi tersebut menargetkan output berupa *energy yield*, PR, dan *system losses*. Kemudian, data dikaji menggunakan literatur yang valid serta mengumpulkan dokumen relevan dari PT PLN, seperti *as-built drawing*, laporan studi kelayakan awal (*feasibility study*), dan data operasional historis.

Selanjutnya, observasi lapangan dilakukan untuk memvalidasi data desain dengan kondisi terpasang, mengidentifikasi potensi masalah seperti bayangan (*shading*) atau penumpukan kotoran (*soiling*), serta memahami lingkungan operasional PLTS. Tahap terakhir berupa wawancara mendalam (semi-terstruktur) untuk menggali informasi kontekstual yang tidak tersedia dalam dokumen, seperti tantangan O&M spesifik untuk PLTS terapung dan asumsi biaya internal.

Data yang telah terkumpul dianalisis dengan membandingkan data produksi energi PLTS (aktual dan simulasi) dengan data konsumsi energi internal PLTGU secara bulanan. Penelitian ini menggunakan perhitungan metrik utama untuk mengukur dua rasio performa bulanan PLTS, yaitu Rasio Kecukupan Diri (*Self-Sufficiency Ratio - SSR*) untuk mengukur persentase kebutuhan listrik PLTGU yang dapat dipenuhi PLTS serta defisit energi untuk menunjukkan kekurangan pasokan listrik yang harus dipenuhi PLTGU setelah memperoleh suplai dari PLTS.

Data yang telah terkumpul dianalisis dengan membandingkan data produksi energi PLTS (aktual dan simulasi) dengan data konsumsi energi internal PLTGU secara bulanan. Penelitian ini menggunakan perhitungan metrik utama untuk mengukur dua rasio performa bulanan PLTS, yaitu Rasio Kecukupan Diri (*Self-Sufficiency Ratio - SSR*) dan defisit energi. SSR digunakan untuk mengukur persentase kebutuhan listrik PLTGU yang dapat dipenuhi oleh PLTS, sedangkan defisit energi menunjukkan kekurangan pasokan listrik yang masih harus dipenuhi oleh PLTGU setelah mendapatkan suplai dari PLTS.

$$SSR(\%) = \left(\frac{\text{Produksi Listrik PLTS (kWh)}}{\text{Produksi Listrik PLTGU (kWh)}} \right) \times 100\% \tag{1}$$

$$\text{Defisit Energi (kWh)} = \text{Konsumsi Listrik PLTGU (kWh)} - \text{Produksi Listrik PLTS} \tag{2}$$

Kelayakan teknis floating PLTS dianalisis menggunakan perangkat lunak PVSyst dengan metrik berupa produksi energi tahunan dan *performance ratio* (PR). Nilai PR dianalisis menggunakan Persamaan (3). Jika nilai PR > 80%, maka rancangan dan operasional sistem dinilai berada dalam kondisi baik (Duffie & Beckman, 2006).

$$PR = \frac{Y_j}{Y_r} = \frac{\left(\frac{E_{Grid}}{P_{peak}}\right)}{\left(\frac{H_{glob}}{G_{ref}}\right)} \quad (3)$$

dengan:

Y_f = final yield (kWh/kWp)

Y_r = reference yield (kWh/kWp)

E_{Grid} = energi yang disalurkan ke grid (kWh)

P_{peak} = daya puncak sistem (kWp)

H_{glob} = iradiasi global pada bidang modul (kWh/m²)

G_{ref} = iradiasi referensi (1000 W/m²)

Dampak lingkungan dari PLTS dihitung berdasarkan jumlah emisi karbon yang berhasil dihindari menggunakan faktor emisi jaringan listrik. Perhitungan reduksi emisi CO₂ ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$\text{Reduksi Emisi CO}_2(\text{ton/tahun}) = E_{Grid}(\text{MWh/tahun}) \times EF_{Grid}(\text{ton CO}_2/\text{MWh}) \quad (4)$$

di mana:

E_{Grid} = produksi energi tahunan (MWh/tahun)

EF_{Grid} = faktor emisi grid (ton CO₂/MWh)

Kelayakan ekonomi dianalisis menggunakan metode *discounted cash flow* (DCF) untuk mengevaluasi viabilitas investasi proyek selama umur ekonomisnya (25–30 tahun). Analisis dilakukan dengan menggunakan tiga indikator utama, yaitu Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period (PBP).

NPV digunakan untuk menghitung nilai sekarang dari selisih antara total manfaat dan biaya selama umur proyek.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} - I_0 \quad (5)$$

dengan:

B_t = manfaat (benefit) pada tahun ke-t

C_t = biaya operasional pada tahun ke-t

I_0 = investasi awal

r = tingkat diskonto

t = tahun ke-t

Payback Period (PBP) digunakan untuk menentukan waktu yang diperlukan agar investasi awal dapat kembali melalui arus kas bersih tahunan.

$$PP = \frac{\text{Initial Investment}}{\text{Annual Cash Flow}} \quad (6)$$

Hasil

Berdasarkan ekstraksi data meteorologi menggunakan Meteonorm 8.1 pada PVSystem, sebaran iradiasi bulanan di titik koordinat Tambak Lorok dapat ditinjau pada [Tabel 1](#). Data tersebut menunjukkan bahwa nilai iradiasi global horizontal (*horizontal global irradiation*) tahunan tercatat mencapai 1796,6 kWh/m². Distribusi iradiasi bulanan menunjukkan fluktuasi yang cukup stabil, di mana nilai tertinggi terjadi pada bulan Oktober sebesar 169,5 kWh/m² dan nilai terendah pada bulan Februari sebesar 120,8 kWh/m². Stabilitas paparan cahaya matahari ini merupakan indikator penting bagi konsistensi produksi energi listrik yang akan dihasilkan oleh sistem PLTS Terapung. Karakteristik komponen cahaya lainnya di lokasi ini juga mencakup iradiasi difusi horizontal sebesar 950,8 kWh/m² per tahun. Kemudian, tingkat *clearness index* (Kt) rata-rata tahunan berada pada angka yang memadai dan kondisi atmosfer di Margorejo dinilai mendukung efektivitas penyerapan energi oleh modul fotovoltaik. Seluruh data meteorologi ini diintegrasikan ke dalam model simulasi untuk mendapatkan estimasi produksi energi yang akurat dengan mempertimbangkan variabel lingkungan spesifik, seperti suhu ambien yang mempengaruhi efisiensi kerja panel surya di atas permukaan air.

Tabel 1. Data meteorologi spesifik di Tambak Lorok

Bulan	Horizontal Global (GHI) [kWh/m ²]	Horizontal Diffuse (DIF) [kWh/m ²]	Suhu Ambien [°C]
Januari	128,0	79,0	27,2
Februari	120,8	80,6	27,2
Maret	146,7	78,2	27,6
April	152,1	79,0	28,1
Mei	152,4	74,5	28,4
Juni	146,0	66,4	28,0
Juli	157,6	63,7	27,6
Agustus	167,2	80,1	27,9
September	166,8	78,2	28,6
Oktober	169,5	96,9	29,1
November	146,1	89,7	28,3
Desember	143,5	84,5	27,6
Tahunan (Total/Rata-rata)	1796,6	950,8	27,9

Hasil simulasi kelayakan teknis

Analisis kelayakan teknis dilakukan dengan membandingkan performa jenis modul fotovoltaik Jinko Solar dan JA Solar. Perbandingan tersebut bertujuan untuk menentukan sistem yang paling optimal pada instalasi floating PLTS di Tambak Lorok. Simulasi dilakukan dengan kapasitas desain yang mendekati target 561 kWp, namun disesuaikan dengan konfigurasi rangkaian modul dan kapasitas inverter yang tersedia pada perangkat lunak PVSystem.

Parameter utama yang diamati meliputi total produksi energi tahunan yang disalurkan ke jaringan (*energy injected to grid*), produksi spesifik, serta rasio performa (*performance ratio*) dari masing-masing sistem. Berdasarkan hasil simulasi, kedua modul menunjukkan efisiensi yang tinggi berkat pendinginan alami dari permukaan air.

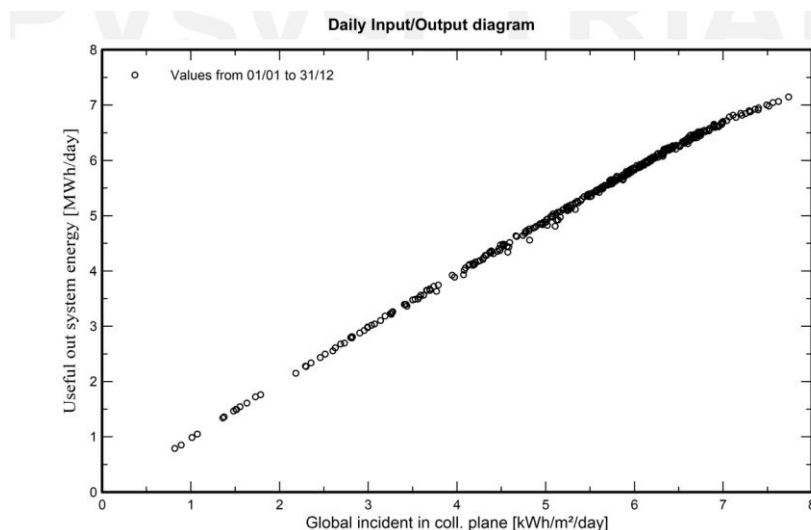
Kedua modul menghasilkan perbedaan output yang dipengaruhi oleh teknologi sel masing-masing merek. Modul Jinko Solar dengan konfigurasi 1.785 unit menghasilkan daya nominal sistem sebesar 1.133 kWp, sementara modul JA Solar dengan 1.850 unit menghasilkan daya yang sedikit lebih tinggi, yaitu 1.166 kWp. Detail perbandingan hasil simulasi performa modul Jinko Solar dan JA Solar dapat dilihat pada [Tabel 3](#).

Tabel 2. Perbandingan hasil simulasi performa modul Jinko Solar dan JA Solar

Parameter Performa	Modul Jinko Solar	Modul JA Solar	Satuan
Kapasitas Sistem (P_{nom} total)	1.133	1.166	kWp
Produksi Energi Tahunan	1.758	1.81	MWh/tahun
Produksi Spesifik	1.551	1.552	kWh/kWp/tahun
Performance Ratio (PR)	85,2	85,3	%
Jumlah Modul PV	1.785	1.850	Unit

Meskipun kedua modul menunjukkan nilai *performance ratio* (PR) yang hampir identik, perbedaan kapasitas terpasang memberikan implikasi langsung terhadap total produksi energi tahunan. Modul JA Solar menghasilkan energi lebih tinggi terutama karena jumlah modul dan kapasitas sistem yang lebih besar, bukan semata-mata karena efisiensi teknologi sel. Hal ini menunjukkan bahwa dalam konteks desain sistem PLTS, optimasi kapasitas terpasang memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap output energi dibandingkan perbedaan kecil pada efisiensi modul. Oleh karena itu, pemilihan modul dalam studi ini lebih dipengaruhi oleh strategi konfigurasi sistem daripada keunggulan intrinsik teknologi modul itu sendiri.

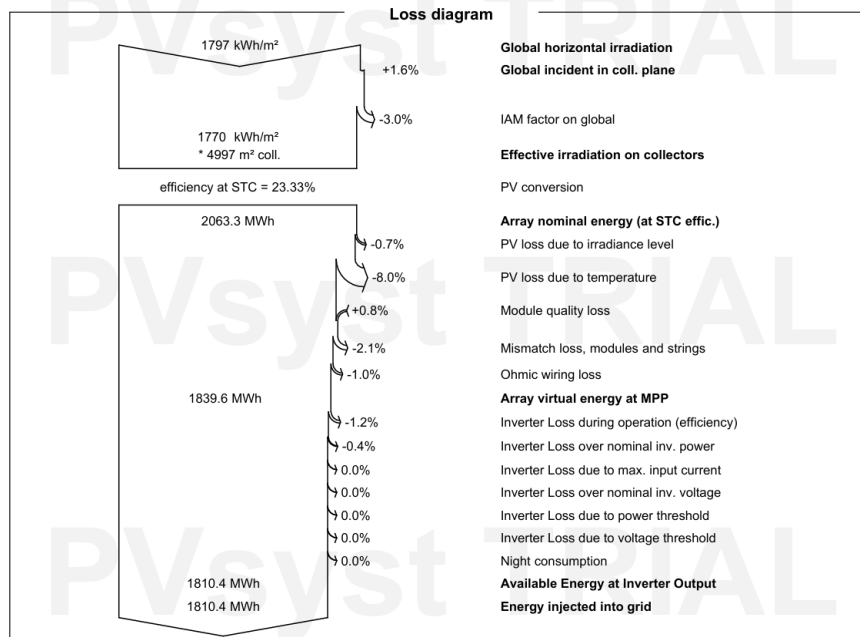
Produksi energi bulanan dari modul Jinko Solar dan JA Solar mengikuti pola iradiasi matahari di Kota Semarang, di mana produksi tertinggi dicapai pada periode Agustus hingga Oktober. Meskipun terdapat perbedaan pada jumlah modul yang digunakan, nilai PR kedua sistem berada di atas 85%, yang mengindikasikan bahwa desain sistem on-grid ini sangat efisien dan memiliki rugi-rugi (*losses*) yang minimal. Analisis rugi-rugi sistem secara mendalam dapat dilihat pada diagram loss yang dihasilkan oleh simulasi, yang mencakup faktor suhu, rugi-rugi kabel (*ohmik*), hingga efisiensi *inverter*.



Gambar 1. Konsistensi produksi harian modul Jinko terhadap iradiasi matahari

Grafik *daily input/output* pada **Gambar 1** menunjukkan hubungan linier yang sangat kuat antara intensitas iradiasi matahari harian dengan energi yang dihasilkan oleh sistem. Titik-titik data yang terkumpul membentuk garis lurus konsisten yang menandakan bahwa sistem PLTS Terapung di Tambak Lorok memiliki stabilitas performa yang baik di berbagai kondisi cuaca. Tidak adanya *outlier* di bawah garis utama menghasilkan kerugian akibat bayangan (*shading*) atau malfungsi sistem sangat minimal, sehingga konversi energi dari cahaya matahari menjadi listrik berlangsung secara optimal setiap hari. Persebaran data tersebut juga menunjukkan bahwa produksi harian pada rentang iradiasi yang cukup tinggi menghasilkan PR sebesar 85%.

Hubungan linier yang kuat ini juga mengindikasikan bahwa sistem memiliki respons yang konsisten terhadap variasi iradiasi, sehingga ketidakpastian produksi energi relatif rendah. Hal ini penting dalam konteks operasional karena meningkatkan keandalan sistem dalam memenuhi kebutuhan energi secara prediktif.



Gambar 2. Rincian energi yang hilang dari panel hingga masuk ke jaringan/grid

Gambar 2 menunjukkan bahwa pemilihan modul JA Solar memberikan total produksi energi yang sedikit lebih besar dibandingkan Jinko Solar dalam tahap simulasi. Hal itu terjadi karena kapasitas yang terpasang sedikit lebih tinggi. Secara efisiensi produksi spesifik (kWh/kWp), keduanya menunjukkan hasil yang hampir identik,

Hasil kontribusi penurunan emisi CO₂

Berdasarkan laporan CO₂ Emission Balance, total emisi yang berhasil dihindari atau digantikan oleh sistem PLTS mencapai 39.865,4 tCO₂ selama siklus hidup proyek (30 tahun). Angka ini didasarkan pada produksi energi tahunan sebesar 1.810,42 MWh/tahun dan faktor emisi jaringan (*grid lifecycle emissions*) sebesar 734 gCO₂/kWh. Setelah dikurangi dengan emisi yang dihasilkan selama proses manufaktur, transportasi, dan pemasangan komponen sistem sebesar 2.031,63 tCO₂, maka didapatkan nilai bersih pengurangan emisi karbon (*total saved emissions*) sebesar 32.558,2 tCO₂. Tabel 3 menunjukkan estimasi kontribusi terhadap keseimbangan emisi CO₂ oleh modul JA Solar.

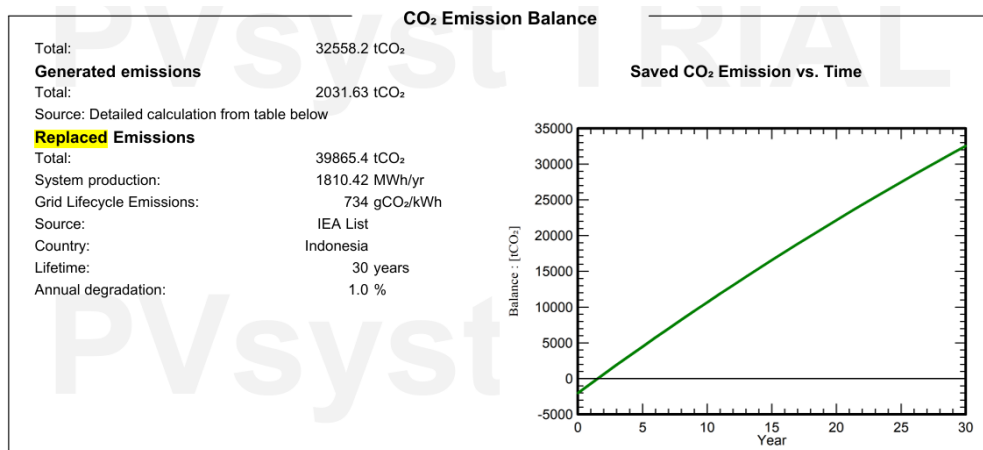
Tabel 3. Estimasi keseimbangan emisi CO₂ dalam siklus hidup 30 tahun

Parameter Emisi	Nilai	Satuan
Emisi yang Digantikan (<i>Replaced Emissions</i>)	39.865,4	tCO ₂
Emisi yang Dihasilkan Sistem (<i>Generated Emissions</i>)	2.031,6	tCO ₂
Total Pengurangan Emisi Bersih	32.558,2	tCO ₂
Rata-rata Pengurangan Emisi per Tahun	1.085,2	tCO ₂ /tahun

Pengurangan emisi lebih dari seribu ton CO₂ terjadi setiap tahun, ini membuktikan bahwa proyek *floating* PLTS Tambak Lorok memiliki nilai strategis dalam mendukung target *net zero emission* di Indonesia. Selain mengurangi ketergantungan pada pembangkit termal

eksisting di lokasi tersebut, proyek ini juga menurunkan beban lingkungan dari operasional PS di PLTGU Tambak Lorok secara berkelanjutan.

Nilai pengurangan emisi sebesar 1.085,2 ton CO₂ per tahun menunjukkan kontribusi yang signifikan dalam konteks operasional satu unit pembangkit berbasis fosil. Jika dibandingkan dengan intensitas emisi pembangkit listrik konvensional, pengurangan ini mencerminkan peran nyata floating PLTS dalam menurunkan jejak karbon sistem energi. Selain itu, akumulasi reduksi emisi sebesar 32.558 ton CO₂ selama siklus hidup proyek menunjukkan bahwa investasi pada teknologi ini tidak hanya berdampak jangka pendek, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan yang berkelanjutan dalam jangka panjang.



Gambar 3. Perbandingan antara Replaced Emissions dan Generated Emissions

Hasil analisis ekonomi

Skenario penggunaan modul JA Solar dengan kapasitas 1.166 kWp yang menghasilkan energi tahunan sebesar 1.810 MWh menjadi basis utama analisis ekonomi. Nilai investasi mencakup pengadaan modul PV, inverter, sistem pontoon (pelampung), instalasi kabel, serta biaya integrasi ke jaringan PS PLTGU Tambak Lorok.

- a. Komponen Pembilang: Total Investasi (CAPEX)
 - Biaya rata-rata wilayah Asia = USD 1.133/kW
 - Kapasitas = 1.166 kWp.
 - Kurs = Rp15.700/USD.
 - Total investasi = $1.166 \times 1.133 \times 15.700 = Rp20.740.924.600$

- b. Komponen Penyebut: Arus Kas Bersih Tahunan
 - Arus kas bersih didapat dari penghematan listrik dikurangi biaya operasional (OPEX).
 - Penghematan listrik = Produksi energi tahunan dari PVSYST (kWh) dikalikan tarif industri (Rp per kWh)
 - Penghematan listrik = $1.810.000 \times 1.112 = Rp2.012.720.000$
 - Biaya operasional (OPEX)
 - = Diasumsikan 1% dari CAPEX per tahun. $1\% \times 20.740.924.600$
 - = Rp 207.409.246
 - Arus Kas Bersih = $2.012.720.000 - 207.409.246 = Rp1.805.310.754$

- c. Hasil akhir (PBP)
 - $PBP = \frac{20.740.924.600}{1.805.310.754} = 11,488 \dots$ (dibulatkan menjadi 11,48)

Tabel 4. Parameter input analisis ekonomi

No	Parameter	Nilai	Satuan	Sumber/Keterangan
1	Kapasitas Terpasang	1.166	kWp	Hasil Simulasi PVSYST
2	Biaya Investasi Satuan	1.133	USD/kW	IRENA (2024) (Wilayah Asia)
3	Asumsi Kurs	15.7	IDR/USD	Asumsi Nilai Tukar
4	Total CAPEX	20.740.924.600	IDR	(Kapasitas × Biaya × Kurs)
5	Produksi Energi Tahunan	1.810.000	kWh/th	Hasil Simulasi PVSYST
6	Tarif Listrik Industri (I-3)	1.112	IDR/kWh	Tarif Penghematan (PLN)
7	Biaya Operasional (OPEX)	1%	/Tahun	Persentase dari Total CAPEX

Berdasarkan parameter pada [Tabel 4](#), total estimasi investasi untuk kapasitas 1.166 kWp adalah Rp20.740.924.600 (asumsi USD1 setara IDR15.700). Selain biaya investasi awal (CAPEX), analisis ini juga mempertimbangkan biaya operasional tahunan OPEX yang meliputi pemeliharaan rutin, pembersihan panel surya secara berkala untuk menjaga efisiensi dari penumpukan debu atau garam, serta pengawasan teknis sistem. Besaran OPEX ditetapkan sebesar 1% dari total CAPEX, yakni senilai Rp207.409.246 per tahun. Kemudian, aliran kas masuk (*cash inflow*) diproyeksikan berasal dari penghematan biaya listrik PS di PLTGU Tambak Lorok. Potensi penghematan tahunan mencapai Rp2.012.720.000 karena produksi energi tahunan sebesar 1.810 MWh dan asumsi tarif listrik industri (I-3) sebesar Rp1.112 per kWh. Berdasarkan data tersebut, ringkasan parameter kelayakan ekonomi untuk sistem *floating* PLTS JA Solar disajikan pada [Tabel 5](#).

Tabel 5. Parameter kelayakan ekonomi floating PLTS 1.166 kWp

Parameter Ekonomi	Nilai Estimasi	Satuan	Keterangan
Total Investasi (CAPEX)	20.740.924.600	IDR	Biaya kapital awal pembangunan
Biaya Operasional (OPEX)	207.409.246	IDR / Th	Pemeliharaan dan pembersihan panel
Arus Kas Bersih (Net)	1.805.310.754	IDR / Th	(Saving Kotor - OPEX)
Net Present Value (NPV)	5.451.820.400	IDR	Bernilai Positif (Investasi Layak)
Internal Rate of Return (IRR)	12,8%	%	Di atas suku bunga diskonto (10%)
Payback Period (PBP)	11,48	Tahun	Waktu pengembalian modal awal

- CAPEX: Angka investasi sebesar Rp20,7 Miliar dihitung dengan mengalikan kapasitas 1.166 kWp dengan standar biaya global IRENA untuk wilayah Asia (USD 1.133/kW) menggunakan asumsi kurs Rp15.700.
- Kelayakan Finansial: Proyek ini dinyatakan layak karena menghasilkan NPV Positif dan IRR (12,8%) yang lebih tinggi dari tingkat suku bunga diskonto yang ditetapkan (10%).
- Masa Manfaat: Perusahaan memiliki waktu sisa sekitar 13-18 tahun (dari total umur proyek 25-30 tahun) dengan PBP 11,48 tahun untuk menikmati penghematan energi secara murni tanpa beban biaya investasi awal.

Diskusi

Kelayakan teknis pengembangan *floating* PLTS di Tambak Lorok

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *floating* PLTS di Tambak Lorok memiliki kinerja teknis yang optimal dan stabil, yang terutama dipengaruhi oleh kondisi iradiasi yang konsisten serta efek pendinginan alami dari permukaan air. Berdasarkan hasil simulasi, lokasi Tambak Lorok menghasilkan potensi energi yang relatif stabil dan tinggi sepanjang tahun. Lokasi yang menghasilkan nilai GHI tahunan sebesar 1796,6 kWh/m² ini berpotensi sebagai tempat pengembangan system fotovoltaik skala menengah hingga besar di wilayah iklim tropis.

Iradiasi bulanan pada area tersebut juga tidak menunjukkan fluktuasi ekstrem menjadi faktor kunci dalam menjaga *energy yield* yang konsisten. Stabilitas tersebut memberikan implikasi pada keandalan suplai energi dan prediktibilitas produksi tahunan dari sistem *floating* PLTS. Lebih lanjut, pengembangan *floating* PLTS memperoleh keuntungan dari reflektivitas permukaan air yang prospektif dalam meningkatkan penerimaan iradiasi efektif modul. Pengembangan ini semakin diuntungkan dengan capaian iradiasi difusi sebesar 950,8 kWh/m² per tahun. Angka itu menunjukkan bahwa sistem *floating* PLTS tidak bergantung pada radiasi langsung. Selain itu, keberadaan air sebagai *heat sink* mampu memitigasi penurunan efisiensi akibat panas berlebih, meskipun suhu ambien di lokasi Tambak Lorok mencapai rata-rata 27,9°C. Keberadaan air tersebut mengurangi *temperature-induced losses* yang biasanya menjadi kerugian terbesar pada PV yang diimplementasikan di daratan. Hasil tersebut selaras dengan penelitian Aryanto & Husodo (2025) yang menemukan adanya kerugian produksi energi listrik dapat terjadi karena suhu. Kjeldstad et al. (2021) dan Ramanan et al. (2025) juga mengonfirmasi bahwa suhu air yang cenderung lebih rendah dan stabil dibandingkan suhu tanah memberikan keuntungan termal bagi modul surya di atasnya.

Jinko Solar dan JA Solar menghasilkan PR yang sangat tinggi dengan nilai masing-masing sebesar 85,2% dan 85,3%. Secara umum, nilai PR yang melebihi 80% termasuk dalam kategori sistem performa yang sangat baik. Hal tersebut mencerminkan kondisi operasional sistem *floating* PLTS, desain sistem, dan konfigurasi *inverter* dalam kondisi optimal. Hasil simulasi modul JA Solar JAM72S30-545/MR menunjukkan bahwa sistem *floating* PLTS di Tambak Lorok menunjukkan performa teknis yang sangat stabil dengan luaran energi tahunan sebesar 1.810 MWh. Penempatan sistem PLTS di atas permukaan air Tambak Lorok memberikan keuntungan termal yang signifikan melalui mekanisme pendinginan pasif. Berdasarkan simulasi, nilai konstanta perpindahan panas (U_c) ditetapkan sebesar 29 W/m²K, yang merepresentasikan efektivitas pendinginan evaporatif dan konvektif di lingkungan perairan. Fenomena ini selaras dengan temuan Dörenkämper et al. (2021) yang menyatakan bahwa kedekatan modul dengan badan air memicu perpindahan panas yang lebih efisien dibandingkan sistem di darat, di mana perbedaan suhu modul antara sistem terapung dan darat dapat mencapai beberapa derajat Celsius tergantung pada kecepatan angin lokal. Kecepatan angin yang lebih tinggi di area terbuka seperti Tambak Lorok berperan krusial dalam meningkatkan koefisien perpindahan panas konvektif, sehingga menekan suhu operasional modul.

Lebih lanjut, Sharaf et al. (2022) menekankan bahwa pendinginan alami memiliki peran sangat krusial bagi modul berbasis silikon pada JA Solar Mono-PERS untuk menjaga tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}) agar tidak merosot tajam. Laju degradasi termal harian dapat ditekan dengan suhu sel yang lebih rendah, sehingga memaksimalkan *energy yield* tahunan sebesar 1.810 MWh.

Hasil simulasi ini memperkuat teori bahwa sistem *floating* PV bekerja lebih optimal di wilayah tropis dengan radiasi tinggi seperti Semarang. Perbandingan data lintas zona iklim menunjukkan bahwa di wilayah dengan iradiasi tinggi, efek pendinginan air memberikan persentase peningkatan daya yang lebih besar dibandingkan wilayah beriklim sedang. Hal ini divalidasi oleh nilai *specific yield* (PVOUT) sebesar 3,91 kWh/kWp/hari di lokasi penelitian, yang didukung oleh stabilitas termal modul akibat interaksi terus-menerus dengan massa air di bawahnya.

Kontribusi penurunan emisi CO₂ di *floating* PLTS Tambak Lorok

Hasil analisis menunjukkan bahwa implementasi *floating* PLTS di Tambak Lorok memberikan kontribusi signifikan terhadap upaya dekarbonisasi sektor energi, khususnya pada pembangkit berbasis fosil. Gambar 3 menunjukkan perbandingan antara *Replaced Emissions* dan *Generated Emissions* mengilustrasikan perbandingan antara beban emisi yang dihasilkan selama siklus hidup sistem dengan potensi emisi karbon yang berhasil dihindari. *Replaced Emissions* sebesar 39.865,4 tCO₂ merepresentasikan jumlah emisi gas rumah kaca

yang seharusnya dihasilkan jika energi listrik sebesar 1.810 MWh per tahun tersebut dipasok oleh jaringan listrik konvensional (*grid*) yang berbasis bahan bakar fosil. Angka ini didapatkan dari akumulasi produksi energi selama masa pakai proyek yang dikalikan dengan faktor emisi grid sebesar 734 gCO₂/kWh. Nilai reduksi emisi ini tidak hanya merepresentasikan pengurangan beban karbon secara langsung, tetapi juga menunjukkan efektivitas integrasi energi terbarukan dalam sistem pembangkit eksisting sebagai strategi transisi energi.

Di sisi lain, batang *Generated Emissions* sebesar 2.031,63 tCO₂ menunjukkan jejak karbon yang timbul dari proses manufaktur modul surya, *inverter*, struktur rangka terapung, hingga proses transportasi dan instalasi di lokasi Tambak Lorok. Selisih yang sangat besar antara kedua nilai tersebut menghasilkan *total saved emissions* sebesar 32.558,2 tCO₂. Hal ini menunjukkan bahwa investasi karbon yang dikeluarkan untuk membangun sistem ini akan "terbayar lunas" dalam waktu singkat melalui produksi energi bersih, sehingga sisa masa operasional PLTS sepenuhnya memberikan kontribusi positif terhadap target dekarbonisasi di lingkungan PLTGU Tambak Lorok. Implementasi *floating* PLTS di Tambak Lorok tidak hanya memberikan keuntungan dari sisi teknis dan ekonomi, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap upaya dekarbonisasi di lingkungan PLTGU Tambak Lorok. Berdasarkan hasil simulasi, sistem ini mampu mereduksi emisi gas rumah kaca sebesar 32.558 ton CO₂ selama 30 tahun masa operasional proyek. Selain itu, substitusi energi di Tambak Lorok menjadi langkah konkret dekarbonisasi yang sejalan dengan peta jalan energi bersih yang diulas oleh Lau et al. (2022) dan Triani et al. (2023) mengenai pentingnya diversifikasi energi untuk mengurangi ketergantungan pada batu bara dan gas.

Lebih jauh, PLTS konvensional sering memicu kompetisi penggunaan lahan dengan sektor pangan (pertanian) dan konservasi ekologi. Sistem *floating PLTS* di Tambak Lorok menawarkan solusi tanpa okupansi lahan daratan. Secara teoritis, instalasi PLTS di darat berisiko mengurangi cadangan karbon alami (*carbon sink*) dan mengganggu koridor ekologis. Studi terbaru oleh Zhang et al. (2026) menekankan bahwa ekspansi PLTS darat yang agresif dapat mengancam ketahanan pangan jika tidak dikelola dengan integrasi spasial yang tepat. Sejalan dengan itu, Jiang et al. (2026) menyarankan perlunya keseimbangan antara kebutuhan energi dan pelestarian ekologi melalui pemanfaatan area non-produktif. Proyek yang memanfaatkan area perairan PLTGU ini secara efektif merekonsiliasi konflik *land-energy* tersebut sekaligus mempertahankan integritas ekosistem sekitar. Pandey et al. (2022) menyatakan penutupan permukaan air oleh panel secara fisik menekan laju evaporasi dan membatasi penetrasi cahaya matahari yang berpotensi memicu ledakan alga (*algae blooming*). Hal ini menciptakan sinergi di mana produksi energi bersih tidak hanya mereduksi emisi global, tetapi juga berkontribusi pada perlindungan kualitas air lokal di lingkungan operasional pembangkit. Dalam konteks global, kontribusi ini memperkuat peran *floating PLTS* sebagai solusi dekarbonisasi yang tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga adaptif terhadap keterbatasan lahan, terutama di negara berkembang dengan tekanan kebutuhan energi yang tinggi.

Kelayakan ekonomi pengembangan *floating PLTS* Tambak Lorok

Dari sisi ekonomi, pengembangan *floating PLTS* di Tambak Lorok menunjukkan kelayakan investasi yang cukup kuat berdasarkan indikator finansial utama. Berdasarkan hasil simulasi teknis menggunakan perangkat lunak PVSYST 7.4, pengembangan *floating PLTS* di Tambak Lorok dengan kapasitas 1.166 kWp memberikan kontribusi nyata dalam upaya mitigasi perubahan iklim melalui pengurangan emisi karbon. Data simulasi menunjukkan bahwa sistem ini mampu menghasilkan reduksi emisi sebesar 1.085,3 ton CO₂ per tahun atau setara 32.558 ton CO₂ selama siklus hidup proyek 30 tahun. Nilai ini merepresentasikan potensi dekarbonisasi yang signifikan bagi operasional PLTGU Tambak Lorok, di mana setiap unit energi hijau yang dihasilkan secara langsung memitigasi pelepasan gas rumah kaca (GRK) yang biasanya dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil pada jaringan listrik konvensional.

Secara global, dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan merupakan pilar utama dalam mencapai target pembatasan kenaikan suhu bumi di bawah 1,5°C sesuai dengan Persetujuan Paris. Berdasarkan laporan IER (2024), intensitas emisi dari teknologi fotovoltaik jauh lebih rendah dibandingkan pembangkit berbahan bakar gas alam maupun batu bara sebesar 20 sampai 40 gCO₂eq/kWh. Wang et al. (2024) menyatakan bahwa setiap peningkatan kapasitas sebesar 1% oleh PV dapat mereduksi 2,05% emisi dari pembangkit listrik lainnya secara kumulatif. Penghematan emisi tahunan sebesar 1.085,3 ton CO₂ di Tambak Lorok ini sebanding dengan kemampuan penyerapan karbon oleh puluhan ribu pohon dewasa setiap tahunnya. Meskipun memiliki luasan yang terbatas, sistem *floating* PLTS memiliki kepadatan reduksi emisi yang tinggi per satuan luas dibandingkan teknologi energi terbarukan lainnya. Pembahasan mengenai dampak lingkungan ini juga tidak lepas dari keunggulan spesifik teknologi terapung (*floating* PV) dalam aspek konservasi ekosistem.

Berbeda dengan instalasi PLTS di darat yang seringkali memerlukan pembukaan lahan hutan atau konversi lahan produktif yang justru dapat melepaskan simpanan karbon tanah (*land-use change emissions*) sistem di Tambak Lorok memanfaatkan badan air buatan sebagai platform. Pemanfaatan permukaan air ini meminimalisir intervensi terhadap ekosistem darat dan menjaga fungsi lahan sekitar tetap utuh. Selain itu, penutupan permukaan air oleh panel surya secara fisik mengurangi paparan sinar matahari langsung ke badan air, yang secara ilmiah terbukti mampu menekan laju penguapan (evaporasi) air serta mencegah pertumbuhan alga berlebih (*algae blooming*), sehingga turut menjaga kualitas dan keberlanjutan sumber daya air setempat.

Apabila ditinjau dampaknya dalam jangka panjang, reduksi emisi sebesar 32.558 ton CO₂ ini menempatkan PLTGU Tambak Lorok dalam posisi yang strategis dalam menghadapi regulasi pajak karbon (*carbon tax*) yang mulai diimplementasikan secara global maupun nasional. Dengan mengganti sebagian kebutuhan energi PS dari sumber terbarukan, perusahaan tidak hanya berkontribusi pada kesehatan lingkungan tetapi juga meningkatkan efisiensi ekonomi melalui skema kredit karbon atau penghematan biaya kepatuhan emisi. Integrasi teknologi *floating* PLTS ini menjadi bukti nyata transformasi infrastruktur energi konvensional menjadi fasilitas yang lebih rendah karbon dan berwawasan lingkungan.

Apabila ditinjau dari sisi ekonomi, perbandingan kelayakan ekonomi antara modul Jinko dan JA Solar menunjukkan bahwa sistem yang menerapkan JA Solar memiliki indikator finansial yang lebih tinggi daripada Jinko Solar. Hal tersebut dapat terjadi berdasarkan nilai NPV dan total arus kas bersih tahunan. Selain itu, indikator NPV, IRR, dan *payback period* lebih dipengaruhi oleh skala kapasitas sistem daripada kualitas teknologi dari kedua modul. Nilai IRR yang melebihi tingkat diskonto menunjukkan bahwa proyek ini mampu memberikan tingkat pengembalian yang kompetitif dibandingkan alternatif investasi lainnya. Selain itu, periode pengembalian modal yang berada dalam umur ekonomis proyek mengindikasikan tingkat risiko investasi yang relatif moderat. Sistem solar yang memiliki kapasitas lebih besar akan menghasilkan energi yang lebih besar, sehingga menyebabkan adanya peningkatan *cash flow* tahunan dan memperbaiki indikator kelayakan investasi. Namun, parameter analisis ekonomi berbasis kapasitas terpasang (per kWp) dilakukan untuk memperoleh hasil yang lebih objektif dalam menilai kelayakan ekonomi.

Nilai CAPEX/kWp pada modul JA Solar mencapai Rp17,79 juta/kWp dengan biaya operasional tahunan sebesar sekitar Rp177.900/kWp. Sedangkan, sistem ini menghasilkan pendapatan atau penghematan energi listrik mencapai Rp1,726 juta/kWp/tahun, sehingga menghasilkan arus kas bersih sekitar Rp1,548 juta/kWp/tahun. Berdasarkan parameter tersebut, nilai NPV spesifik diperoleh sebesar Rp4,67 juta/kWp. Apabila modul JA Solar dibandingkan dengan Jinko Solar menggunakan pendekatan berbasis kapasitas (per kWp), maka kedua modul menghasilkan kinerja ekonomi yang setara. Hal ini terjadi karena nilai produksi energi per kWp yang hampir sama, yaitu Jinko Solar mencapai 1.551 kWh/kWp/tahun dan JA Solar mencapai 1.552 kWh/kWp/tahun. Selain itu, biaya investasi

kedua modul per kWp tidak adad perbedaan secara signifikan. Oleh karena itu, JA dan Jinko Solar menghasilkan nilai *return* ekonomi yang sebanding dalam kapasitas yang sama.

Temuan tersebut mengindikasikan bahwa keunggulan ekonomi modul JA Solar dalam parameter absolut (arus kas tahunan dan NPV total) merupakan konsekuensi dari kapasitas terpasang yang lebih besar, bukan terjadi karena efisiensi kinerja modul. Setelah dilakukan analisis data agar menjadi setara (membagi semua parameter terhadap kapasitas (kWp)), perbedaan nilai indikator ekonomi absolut antara modul JA dan Jinko Solar menjadi tidak signifikan. Analisis ekonomi dalam penelitian ini memberikan implikasi bahwa pemilihan modul dalam pengembangan *floating* PLTS di Tambak Lorok tidak perlu memperhatikan perbedaan kinerja ekonomi karena secara praktis tidak terdapat selisih yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa skala kapasitas menjadi faktor dominan dalam menentukan kelayakan ekonomi, sehingga analisis berbasis per kWp menjadi pendekatan yang lebih representatif dalam membandingkan performa ekonomi antar teknologi.

Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang menggabungkan analisis teknis, lingkungan, dan ekonomi dalam konteks pemanfaatan *floating* PLTS untuk skema pemakaian sendiri pada pembangkit listrik berbasis fosil. Berbeda dengan studi sebelumnya yang umumnya hanya berfokus pada satu aspek, penelitian ini memberikan perspektif komprehensif mengenai optimalisasi integrasi energi terbarukan pada sistem eksisting.

Kesimpulan

Implementasi *floatong* PLTS berkapasitas 1.166 kWp mampu menghasilkan energi listrik sebesar ± 1.810 MWh/tahun dengan nilai performance ratio (PR) sekitar 85%, yang mengindikasikan kinerja sistem yang efisien dan stabil. Dari aspek lingkungan, sistem ini berpotensi menurunkan emisi karbon sebesar ± 1.085 ton CO₂ per tahun atau sekitar 32.558 ton CO₂ selama masa operasional 30 tahun, sehingga memberikan kontribusi nyata terhadap upaya dekarbonisasi pada pembangkit listrik berbasis fosil. Secara ekonomi, proyek ini dinyatakan layak dengan nilai *net present value* (NPV) sebesar Rp5,45 miliar, *internal rate of return* (IRR) sebesar 12,8% (lebih tinggi dari tingkat diskonto 10%), serta *payback period* selama 11,48 tahun yang masih berada dalam umur ekonomis proyek. Temuan ini menunjukkan bahwa pengembangan *floating* PLTS di Tambak Lorok tidak hanya optimal dari sisi teknis, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan dan ekonomi yang signifikan melalui pendekatan integratif. Dengan demikian, sistem ini berpotensi menjadi model implementasi strategis dalam integrasi energi terbarukan pada pembangkit listrik eksisting guna mendukung percepatan transisi energi dan pencapaian target dekarbonisasi di Indonesia.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada PLTS Tambak Lorok dan Universitas Diponegoro yang telah mendukung dalam menjalankan penelitian ini, sehingga dapat berjalan dengan baik dan lancar.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Para penulis menyatakan bahwa tidak memiliki konflik kepentingan dari segi apapun mulai dari penelitian sampai publikasi.

Daftar Pustaka

- Aboshosha, A., & Hamad, H. A. (2024). Computer-aided design and simulation-based development of floating solar resort. *Energy*, 294, Article 130862. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130862>
- Aryanto, J. S., & Husodo, B. Y. (2025). Analisis perbandingan panel surya p-type dan n-type untuk PLTS atap pabrik karton menggunakan PVsyst. *Jurnal Teknologi Elektro*, 16(2), 119. <https://doi.org/10.22441/jte.2025.v16i2.008>

- Brealey, R. A., Myers, S. C., & Allen, F. (2020). *Principles of corporate finance* (13th ed.). McGraw-Hill Education.
- Climate Action Tracker. (2024). *Emissions pathways to 2100*. <https://climateactiontracker.org/global/emissions-pathways/>
- Dallaev, R., Pisarenko, T., Papež, N., & Holcman, V. (2023). Overview of the current state of flexible solar panels and photovoltaic materials. *Materials*, 16(17), Article 5839. <https://doi.org/10.3390/ma16175839>
- Dörenkämper, M., Wahed, A., Kumar, A., de Jong, M., Kroon, J., & Reindl, T. (2021). The cooling effect of floating PV in two different climate zones: A comparison of field test data from the Netherlands and Singapore. *Solar Energy*, 219, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.051>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2006). *Solar engineering of thermal processes*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- Dzamesi, S. K. A., Ahiataku-Togobo, W., Yakubu, S., Acheampong, P., Kwarteng, M., Samikannu, R., & Azeave, E. (2024). Comparative performance evaluation of ground-mounted and floating solar PV systems. *Energy for Sustainable Development*, 80, Article 101421. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101421>
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects, and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748–764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>
- Global Energy Monitor. (2024). *Global coal plant tracker*. <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. In *Global warming of 1.5°C* (pp. 175–312). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.005>
- Jiang, L., Liu, Y., & Yang, L. (2026). Scenario-based simulation of future photovoltaic land expansion in China: Balancing energy demands and ecological conservation. *Environmental Impact Assessment Review*, 117, Article 108203. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108203>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2019). *Peluang besar kejar target EBT melalui energi surya*. <https://www.esdm.go.id/id/berita-unit/direktorat-jenderal-ebtke/peluang-besar-kejar-target-ebt-melalui-energi-surya>
- Kementerian Lingkungan Hidup. (2025). *KLH/BPLH dorong integritas MRV untuk capai target penurunan emisi GRK 2030*. <https://kemenlh.go.id/news/detail/klhbplh-dorong-integritas-mrv-untuk-capai-target-penurunan-emisi-grk-2030>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024). *Laporan inventarisasi gas rumah kaca (GRK) dan monitoring, pelaporan, verifikasi (MPV)*. <https://signsmart.menlhk.go.id/v2.1/app/frontend/pedoman/detail/100>
- Kjeldstad, T., Lindholm, D., Marstein, E., & Selj, J. (2021). Cooling of floating photovoltaics and the importance of water temperature. *Solar Energy*, 218, 544–551. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.022>
- Kurniawan, D., Nugroho, A. P., Aridito, M. N., & Fallo, T. (2023). Kajian lingkungan dari potensi pembangkit listrik tenaga surya di energy park Universitas Proklamasi 45. [*Nama jurnal tidak lengkap*], 7(1), 72–82.
- Lau, H. C., Zhang, K., Bokka, H. K., & Ramakrishna, S. (2022). A review of the status of fossil and renewable energies in Southeast Asia and its implications on the decarbonization of ASEAN. *Energies*, 15(6), 2152. <https://doi.org/10.3390/en15062152>
- Li, Z., Yang, J., & Dezfuli, P. A. N. (2021). Study on the influence of light intensity on the performance of solar cell. *International Journal of Photoenergy*, 2021, Article 6648739. <https://doi.org/10.1155/2021/6648739>
- Pandey, A. K., Kalidasan, B., Reji Kumar, R., Rahman, S., Tyagi, V. V., Krismadinata, Said, Z., Salam,

- P. A., Juanico, D. E., Ahamed, J. U., Sharma, K., Samykano, M., & Tyagi, S. K. (2022). Solar energy utilization techniques, policies, potentials, progresses, challenges, and recommendations in ASEAN countries. *Sustainability*, 14(18), 11193. <https://doi.org/10.3390/su141811193>
- Ramanan, C. J., Lim, K. H., & Kurnia, J. C. (2025). Thermal behavior of floating photovoltaics: A comparison of performance at varying heights and benchmarking against land-based photovoltaics. *Applied Energy*, 388, Article 125642. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125642>
- Rifansyah, M., & Hakam, D. F. (2024). Techno-economic study of floating solar photovoltaic project in Indonesia using RETScreen. *Cleaner Energy Systems*, 9, Article 100155. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100155>
- Sharaf, M., Yousef, M. S., & Huzayyin, A. S. (2022). Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(18), 26131–26159. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9>
- Triani, M., Tambunan, H. B., Dewi, K., & Ediansjah, A. S. (2023). Review on greenhouse gases emission in the Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) countries. *Energies*, 16(9), 3920. <https://doi.org/10.3390/en16093920>
- Wang, L., Qiu, T., Zhang, M., Cao, Q., Qin, W., Wang, S., Wang, L., Chen, D., & Wild, M. (2024). Carbon emissions and reduction performance of photovoltaic systems in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 200, Article 114603. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114603>
- Wei, Y., Khojasteh, D., Windt, C., & Huang, L. (2024). An interdisciplinary literature review of floating solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 209, Article 115094. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115094>
- Zhang, N., Yang, Z., Wang, H., Duan, H., & Yang, J. (2026). Rethinking and reconciling the land-energy conflicts from centralized photovoltaics in China. *Land Use Policy*, 163, Article 107925. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2026.107925>