

Analysis of a Rooftop Solar Power Plant in the Amamapare Coal-Fired Power Plant Area to Maximize the Plant's Energy Output

(Analisis PLTS Atap pada Area PLTU Amamapare untuk Memaksimalkan Output Energi Pembangkit)

Oktafianus Ala^{a,1*}, Jaka Windarta^{a,2}, Sri Widodo Agung Suedy^{a,3}

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

E-mail: ¹alaoktapianus@gmail.com; ²jakawindarta@lecturer.undip.ac.id; ³swasuedy@live.undip.ac.id

*Corresponding Author: alaoktapianus@gmail.com (O. Ala)

ARTICLE INFO

Received: 5 May 2026
Revised: 20 May 2026
Accepted: 21 May 2026

How to Cite:

Ala, O., Windarta, J., & Suedy, S. W. A. (2026). Analysis of a Rooftop Solar Power Plant in the Amamapare Coal-Fired Power Plant Area to Maximize the Plant's Energy Output. *Jurnal IPTEK Bagi Masyarakat*, 6(1), 7-19. <https://doi.org/10.55537/j-ibm.v6i1.1665>

ABSTRACT

The increasing electricity demand in the operational area of PT Freeport Indonesia, particularly at the Amamapare Coal-Fired Power Plant, has encouraged the integration of renewable energy systems to reduce fossil fuel dependency and carbon emissions. This study aims to evaluate the technical, economic, and environmental feasibility of utilizing the coal stockpile roof area for a rooftop solar power plant installation. The research employed a quantitative descriptive approach using field observations, operational data, and PVsyst simulation. The results indicate that the available roof area of 18,825 m² can accommodate a 2.57 MWp photovoltaic system consisting of 4,720 bifacial modules and 25 inverter units. The system is capable of generating 3,809 MWh/year with a performance ratio of 83.86%. Economic evaluation shows that the project is feasible with a levelized cost of energy of 0.0987 USD/kWh and a net present value of 1,437,413 USD. In addition, the system has the potential to reduce carbon emissions by 50,299.7 tCO₂ during its operational lifetime. Therefore, the implementation of a rooftop solar power plant at the Amamapare coal field area is considered technically reliable, economically feasible, and environmentally beneficial.

Keywords:

carbon emission reduction; economic feasibility; photovoltaic; PVsyst; renewable energy; rooftop solar power plant.

ABSTRAK

Meningkatnya kebutuhan energi listrik di kawasan operasional PT Freeport Indonesia, khususnya pada PLTU Amamapare, mendorong penerapan energi terbarukan untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan emisi karbon. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan dari pemanfaatan atap coal stockpile sebagai lokasi instalasi pembangkit listrik tenaga surya atap. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif melalui observasi lapangan, pengumpulan data operasional, dan simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst. Hasil penelitian menunjukkan bahwa luas atap sebesar 18.825 m² mampu digunakan untuk instalasi sistem photovoltaic berkapasitas 2,57 MWp dengan konfigurasi 4.720 modul bifacial dan 25 unit inverter. Sistem menghasilkan energi sebesar 3.809 MWh/tahun dengan nilai performance ratio sebesar 83,86%. Evaluasi ekonomi menunjukkan proyek layak dikembangkan dengan levelized cost of energy sebesar 0,0987 USD/kWh dan net present value sebesar 1.437.413 USD. Selain itu, sistem berpotensi menurunkan emisi karbon sebesar 50.299,7 tCO₂ selama masa operasionalnya. Dengan demikian, implementasi pembangkit listrik tenaga surya atap pada area coal field PLTU Amamapare layak diterapkan secara teknis, ekonomis, dan lingkungan.

Kata kunci:

energi terbarukan; kelayakan ekonomi; pengurangan emisi karbon; photovoltaic; PVsyst; pembangkit listrik tenaga surya atap.

Pendahuluan

Dalam memenuhi kebutuhan daya listrik untuk kegiatan operasi pertambangan, PT Freeport Indonesia menggunakan beberapa jenis pembangkit listrik. Di antaranya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), serta Pembangkit Listrik Tenaga Diesel-Gas (PLTMG) yang semuanya dioperasikan oleh departemen *Power Generation & Transmission*. Seiring berjalannya waktu, dalam rangka meningkatkan kapasitas produksi, perusahaan melakukan ekspansi dalam komponen pendukung kegiatan

produksi. Kawasan pemukiman karyawan di area Portsites juga direncanakan dilakukan peningkatan dalam rencana pengembangan area Portsites dan Cargodock yang diperkirakan membutuhkan daya sekitar 1,96 MW. Kenaikan kebutuhan listrik menuntut perusahaan untuk memperkuat kapasitas pembangkit yang ada sekaligus mencari sumber energi alternatif yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Meningkatnya permintaan global akan energi, ditambah dengan meningkatnya masalah lingkungan, telah memacu peralihan signifikan menuju energi untuk memberikan peluang yang menjanjikan dalam memproduksi energi secara berkelanjutan dan menawarkan jalur menuju konsumsi listrik rendah karbon (Apurv et al., 2017; Al-Aboosi & Al-Aboosi, 2021). Dalam usaha mempercepat pertumbuhan hijau, PT Freeport Indonesia melakukan langkah strategis dalam mencapai tujuan mengurangi emisi karbon 30 persen pada tahun 2030. Hal ini sejalan dengan program Indonesia untuk mencapai transisi energi bersih atau dikenal dengan *Net Zero Emission* 2060. Indonesia berkomitmen untuk mengurangi ketergantungan pada energi fosil dan beralih ke sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan, sebagaimana tercantum dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) dan komitmen Indonesia untuk *Net Zero Emission* pada 2060.

Salah satu bentuk energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia adalah energi surya. Indonesia merupakan negara yang terletak di garis khatulistiwa yang memberikan keuntungan dari segi intensitas paparan sinar matahari sepanjang tahun. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) saat ini menjadi salah satu yang banyak diterapkan di berbagai sektor, baik di perkotaan maupun di kawasan industri. Pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi tambahan dapat membantu mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik berbasis batu bara dan mempercepat transisi menjadi energi yang lebih bersih.

Pemanfaatan sistem fotovoltaik (PV) menjadi salah satu upaya optimalisasi dalam mewujudkan *Net Zero Emission* 2060. Pemanfaatan sistem fotovoltaik di Indonesia mempunyai prospek yang sangat baik, mengingat bahwa secara geografis sebagai negara tropis, melintang di garis khatulistiwa, memiliki potensi energi surya yang cukup baik. Pemanfaatan energi surya diyakini lebih ramah lingkungan karena memanfaatkan sinar matahari yang diubah menjadi energi listrik sehingga proses kerjanya tidak membutuhkan energi fosil dan tidak menghasilkan emisi karbon (Mdallal et al., 2025).

PLTU Amamapare saat ini menggunakan batu bara sebagai bahan bakar. Batu bara ini disimpan di sebuah lokasi dengan atap *coal field* dengan luasan atap berkisar 17.481 m². Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Amamapare merupakan salah satu fasilitas penyedia energi listrik penting yang menggunakan batu bara sebagai sumber energi utama. Meskipun mampu menyuplai energi dalam jumlah besar, penggunaan batu bara memiliki konsekuensi terhadap lingkungan, terutama terkait tingginya emisi karbon. Di sisi lain, pemerintah Indonesia terus mendorong percepatan transisi energi melalui peningkatan porsi energi terbarukan, dengan target bauran energi terbarukan mencapai 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 (Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian Republik Indonesia, 2023).

Potensi energi surya yang dimiliki Indonesia sangat besar karena intensitas radiasi matahari yang melimpah sepanjang tahun. Salah satu bentuk pemanfaatan energi surya yang paling efektif adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Namun, potensi energi surya pada atap bangunan industri tersebut selama ini masih terabaikan dan belum dimanfaatkan secara optimal. Apabila sistem fotovoltaik atap diintegrasikan pada atap *coal field* PLTU, maka dapat menghadirkan peluang unik dalam mengoptimalkan keluaran energi dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (Wang et al., 2023). Pemanfaatan PLTS atap di area *coal field* dapat membantu mengurangi beban konsumsi listrik berbasis batu bara. Energi matahari yang tersedia secara gratis sepanjang hari merupakan peluang besar yang semestinya dapat mengurangi ketergantungan pada energi fosil jika dimaksimalkan dengan baik.

Dengan adanya rencana pembangunan permukiman di sekitar area *coal field* akan meningkatkan kebutuhan energi yang cukup signifikan. Pertumbuhan pemukiman menghasilkan penambahan beban listrik. Kenaikan kebutuhan energi ini berpotensi menambah tekanan pada PLTU Amamapare sehingga dapat menyebabkan peningkatan konsumsi batu bara dan bertambahnya emisi karbon ke atmosfer. Dengan memaksimalkan pemanfaatan PLTS atap di area *coal field*, PLTU Amamapare tidak hanya dapat mengurangi konsumsi energi fosil, tetapi juga dapat menyediakan energi terbarukan yang cukup untuk memenuhi sebagian kebutuhan listrik di area sekitar, termasuk permukiman yang sedang dibangun. Bahkan, potensi ini dapat mengurangi ketergantungan terhadap pembangkit berbahan bakar fosil dan mendukung upaya yang sedang direncanakan di Indonesia.

Pemasangan PV surya *rooftop* ini juga diharapkan mampu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil sehingga akan lebih ramah lingkungan. Kelayakan dan efektivitas integrasi PV surya *rooftop* dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk tingkat iradiasi surya, efisiensi modul, desain sistem, dan strategi integrasi jaringan. Penilaian terperinci terhadap sumber daya surya, pemodelan sistem yang tepat, dan teknik kontrol yang canggih diperlukan untuk memaksimalkan produksi energi dan menjamin operasi jaringan yang stabil (Wei et al., 2023). Integrasi PLTS atap pada *coal field* PLTU Amamapare tidak hanya menawarkan peningkatan kapasitas suplai energi, tetapi juga menjadi langkah strategis dalam menurunkan emisi karbon yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara. Setiap energi listrik yang disubstitusi oleh energi surya secara langsung mengurangi konsumsi batu bara sehingga menurunkan intensitas emisi CO₂ pembangkit. Pengurangan emisi ini semakin penting mengingat target dekarbonisasi perusahaan dan komitmen nasional terhadap pengurangan emisi.

Pemanfaatan PLTS atap berpotensi mengurangi biaya operasional PLTU melalui penghematan bahan bakar,

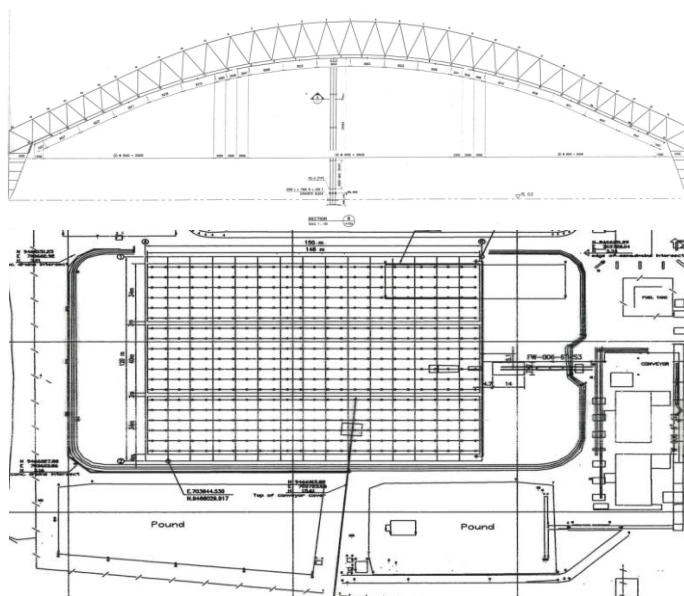
menurunkan biaya pemeliharaan akibat berkurangnya beban operasi unit, serta membuka peluang ekonomi baru melalui skema insentif energi terbarukan dan nilai ekonomi kredit karbon. Dengan demikian, pengembangan PLTS atap tidak hanya memberikan manfaat lingkungan, tetapi juga mendukung peningkatan efisiensi biaya operasional jangka panjang bagi perusahaan. Berdasarkan pemaparan tersebut, peneliti tertarik untuk menganalisis pemanfaatan atap *Coal Field* di PLTU Amamapare apabila dimanfaatkan sebagai PLTS serta besar output energi maksimum yang dapat dihasilkan.

Metode

Penelitian dilakukan di area PLTU Amamapare yang merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara yang terletak di Portsita, Timika, Papua Tengah. Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif. Penelitian ini membahas mengenai pemanfaatan energi matahari yang diubah menjadi energi listrik dengan memanfaatkan atap *Coal Field* sebagai tempat pemasangan panel surya. Metode kuantitatif diimplementasikan pada perancangan, simulasi, dan hasil produksi energi riil PLTS Atap *Coal Field* di PLTU Amamapare serta pada perancangan, simulasi, hasil produksi energi yang dihasilkan, pengurangan emisi CO₂, serta *payback period* dan NPV (analisis ekonomi).

Penelitian ini mencakup analisis pemanfaatan atap *Coal Field* PLTU Amamapare yang akan dimanfaatkan sebagai PLTS. Penelitian ini dimulai dengan tinjauan literatur sistem *solar cell*. Hal ini kemudian diikuti dengan pra-studi kelayakan sederhana untuk mendapatkan gambaran awal mengenai jumlah energi yang akan dihasilkan oleh sistem, memperkirakan total area yang diperlukan untuk instalasi sistem, dan aspek ekonomi keseluruhan. Adapun rancangan PLTS disimulasikan menggunakan perangkat lunak PVsyst.

Penelitian ini menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer pada penelitian ini didapatkan dari hasil observasi dan pengukuran berupa luas kemiringan atap *Coal Field* yang diperoleh melalui observasi langsung di lapangan, kondisi lingkungan (debu, temperatur, dan kelembapan) yang diukur menggunakan alat pengukur (*dust sensor*), serta spesifikasi teknis PLTU dan beban listrik yang diperoleh melalui wawancara dengan operator PLTU. Sedangkan data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini berupa data iradiasi matahari (GHI Timika) yang diperoleh melalui BMKG atau *Global Atlas*, spesifikasi modul PV dan inverter yang diperoleh melalui studi literatur katalog produk, faktor emisi CO₂ batu bara yang diperoleh melalui dokumen perusahaan, tarif listrik dan asumsi biaya investasi, kapasitas inverter, serta penentuan orientasi dan sudut kemiringan optimal.



Gambar 1. Denah dan kemiringan atap coal field

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui tujuh tahap, yaitu penentuan luas dan struktur atap *Coal Field* PLTU Amamapare dari dokumen perusahaan; penentuan intensitas radiasi matahari dari data Meteororm dalam aplikasi PVsyst; penentuan efisiensi modul PV, inverter, dan BOS dari katalog produsen; analisis pola beban listrik, konsumsi batu bara, dan *auxiliary power* dari laporan harian maupun bulanan PLTU; pengukuran tingkat debu dan polusi menggunakan *dust sensor* serta data emisi dari laporan tahunan; analisis biaya investasi dan pemeliharaan PLTS; serta pemodelan energi dengan PVsyst untuk simulasi produksi energi PLTS berdasarkan data iradiasi, *shading*, dan suhu.

Tahap perancangan PLTS awalnya dilaksanakan dengan analisis terhadap kondisi dan ketersediaan area pada lokasi. Selanjutnya dilakukan kalkulasi potensi energi yang mampu dihasilkan oleh area tersebut. Simulasi pemetaan area PLTS dilakukan dengan bantuan PVsyst untuk mengetahui kapasitas daya optimum yang dapat diperoleh.

1. **Analisa Potensi Energi Surya**
 Analisis statistik deskriptif dilakukan untuk menghitung rata-rata, maksimum, dan minimum iradiasi harian maupun bulanan dari data BMKG atau pengukuran lapangan. Analisis simulasi kinerja PLTS menggunakan PVsyst dilakukan dengan memodelkan produksi energi berdasarkan parameter efisiensi modul dan dampak debu untuk estimasi energi (kWh/tahun) dan *performance ratio* (PR). Analisis degradasi modul PV dilakukan dengan membandingkan efisiensi modul dalam lingkungan bersih dan berdebu menggunakan uji *t-test*.
2. **Analisis Ekonomi**
 Analisis ekonomi dilakukan untuk menilai kelayakan finansial menggunakan analisis *Net Present Value* (NPV) serta *Payback Period*.
3. **Analisis Dampak Lingkungan**
 Analisis dampak lingkungan dilakukan dengan menghitung emisi terhindar dan *Life Cycle Assessment* (LCA).

Hasil

Analisis Desain Sistem dan Pemanfaatan Luas Atap *Coal Stockpile Cover*

Perancangan sistem PLTS pada unit PLTU Amamapare memanfaatkan struktur atap *Coal Stockpile Cover* yang memiliki karakteristik geometri *cylindrical dome* (atap lengkung). Berdasarkan data teknis, bangunan ini memiliki lebar bentang (*span*) sebesar 120 meter dengan tinggi puncak (*rise*) 18 meter. Mengingat geometri atap yang melengkung, maka konfigurasi orientasi panel tidak dapat dilakukan secara seragam (*single orientation*). Dalam penelitian ini diimplementasikan skema *double orientation* (Utara-Selatan) untuk mengoptimalkan penangkapan radiasi matahari pada kedua sisi lengkungan atap. Sisi utara diatur dengan sudut *tilt* rata-rata 10° (*azimuth* 0°), sementara sisi selatan diatur simetris dengan sudut *tilt* 10° (*azimuth* 180°). Pembagian ini bertujuan untuk menyeimbangkan produksi energi sepanjang tahun mengingat posisi geografis lokasi yang berada di belahan bumi selatan.

Untuk menentukan kapasitas maksimal yang dapat dipasang, dilakukan perhitungan panjang busur (*arc length*) atap guna mengetahui total luasan permukaan yang tersedia. Perhitungan matematis busur lingkaran dilakukan sebagai berikut:

1. Radius Kelengkungan (R)

$$R = \frac{H^2 + (\frac{W}{2})^2}{2H} = \frac{18^2 + 60^2}{2 \times 18} \approx 109 \text{ meter} \tag{1}$$

2. Panjang Busur Atap (S)

Berdasarkan radius R dan lebar W, panjang busur total adalah sekitar 125,5 meter. Dengan panjang bangunan 150 meter, maka total luas atap tersedia adalah:

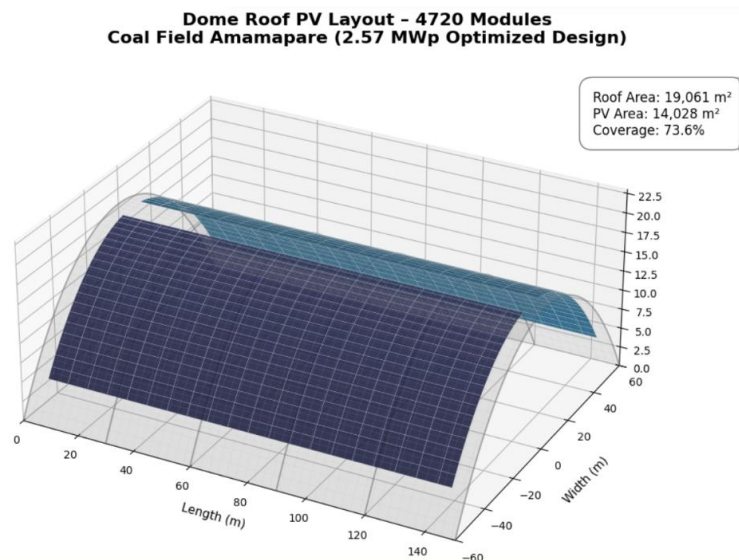
$$A_{total} = S \times L = 125,5m \times 150m = 18.825 \text{ m}^2 \tag{2}$$

Rencana pemasangan PLTS menggunakan luasan sebesar 14.028 m² yang dikonversikan ke dalam tabel ringkasan pemanfaatan lahan sebagai berikut.

Tabel 1. Geometri dan Pemanfaatan Luas Atap

Parameter Geometri	Nilai	Satuan
Lebar Bentang Gudang (W)	120	Meter
Tinggi Puncak (H)	18	Meter
Panjang Gudang (L)	150	Meter
Total Luas Permukaan Atap	18.825	m ²
Luas Area Terpasang PV	14.028	m ²
Persentase Okupansi Atap	74.51%	%

Pemanfaatan area sebesar 74,51% dinilai sangat ideal dalam konteks *Engineering, Procurement, and Construction* (EPC). Ruang sisa sebesar 25,49% dialokasikan sebagai jalur pemeliharaan (*maintenance walkway*), akses pembersihan panel dari debu batu bara, serta ruang antarbaris panel untuk meminimalisir efek *near-shading*.



Gambar 2. Desain Geometri Pemanfaatan Atap untuk PV

Konfigurasi Elektrikal dan Teknologi *Bifacial*

Sistem ini menggunakan total 4.720 unit modul surya Jinko Solar 600 Wp (seri JKM-600N-66HL4M-BDV) yang berbasis teknologi *N-Type Bifacial*. Penggunaan modul *bifacial* pada area *Coal Field* memberikan keuntungan strategis karena sisi belakang modul dapat menangkap radiasi pantulan (*albedo*) dari permukaan atap metal sebesar 30% (*albedo* 0,3).

Tabel 2. Spesifikasi Kapasitas dan Konfigurasi Sistem

Deskripsi Parameter	Spesifikasi Teknis
Kapasitas Total DC	2572 kWp (2,572 MWp)
Konfigurasi Array	236 Strings x 20 Modules in Series
Jenis Inverter	Huawei SUN2000-100KTL-M1 (100 kWac)
Jumlah Inverter	25 Unit (asumsi rasio DC/AC 1.2)
Faktor Bifacialitas	80%

Dalam pemodelan Pvsyst, kerugian akibat debu (*soiling loss*) ditetapkan secara konservatif pada angka 8% mengingat lokasi proyek berada tepat di atas operasional *Coal Stockpile*. Namun, sebagian dari kerugian ini dikompensasi oleh *bifacial gain* yang dihasilkan dari pantulan cahaya ke sisi belakang panel sehingga mengoptimalkan *performance ratio* (PR) sistem secara keseluruhan di lingkungan industri yang ekstrem.

Analisis Pvsyst

Berdasarkan data meteorologi Meteonorm 8.1 untuk koordinat -4,83° S dan 136,84° E (Amamapare), lokasi penelitian memiliki potensi energi surya yang signifikan. Rata-rata iradiasi global horizontal tahunan tercatat sebesar 1.780,4 kWh/m² dengan suhu ambien rata-rata 27,0 °C.

Tabel 3. Data Meteorologi Bulanan Lokasi PLTU Amamapare

Bulan	Iradiasi Horizontal (kWh/m ² /hari)	Suhu Ambien (°C)	Kecepatan Angin (m/s)
Januari	5,54	27,1	1,3
Februari	5,46	27,0	1,4
Maret	5,54	27,0	1,3
April	5,08	26,8	1,0
Mei	4,62	27,3	1,0
Juni	3,97	26,6	1,1
Juli	4,07	27,0	1,2
Agustus	4,54	26,9	1,2
September	4,56	26,8	1,1
Oktober	4,98	27,3	1,2
November	5,12	26,9	1,0
Desember	5,08	27,2	1,1
Rata-rata	4,88	27,0	1,2

Fluktuasi iradiasi tertinggi terjadi pada bulan Januari dan Maret, sedangkan nilai terendah terjadi pada bulan Juni yang dipengaruhi oleh faktor musiman di wilayah Papua. Produksi energi listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS sangat berfluktuasi mengikuti ketersediaan iradiasi matahari bulanan. Berdasarkan simulasi, bulan Maret memberikan kontribusi energi tertinggi ke jaringan, sementara bulan Juni merupakan periode dengan produksi energi terendah.

1. Analisis Produksi Energi Spesifik dan Efisiensi Konversi

Berdasarkan hasil simulasi, sistem PLTS di PLTU Amamapare menunjukkan performa yang sangat produktif untuk wilayah tropis. Produksi energi spesifik (*specific production*) tercatat sebesar 1.480 kWh/kWp/tahun. Angka ini mencerminkan jumlah energi yang dihasilkan per unit kapasitas terpasang yang merupakan indikator efisiensi pemanfaatan teknologi Jinko Solar 545 Wp di lokasi penelitian.

Produksi energi harian rata-rata (*normalized energy*) adalah 4,06 kWh/kWp/hari. Penurunan produksi (*collection loss*) sebesar 0,71 kWh/kWp/hari disebabkan oleh faktor internal pada sisi DC (modul dan kabel), sementara kerugian sistem pada sisi AC (*inverter loss*) sangat rendah, yaitu sebesar 0,08 kWh/kWp/hari. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan inverter Huawei SUN2000-100KTL-M1 dengan efisiensi tinggi sangat tepat untuk meminimalisir kerugian konversi.

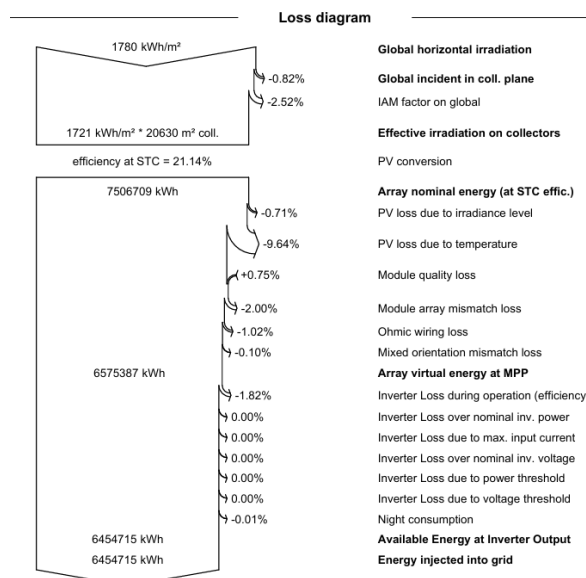
Tabel 4. Hasil Produksi Energi Listrik dan *Performance Ratio* (PR) Bulanan

Bulan	Energi yang Dihasilkan (kWh)	Performance Ratio (PR)
Januari	364.367	0,831
Februari	324.277	0,831
Maret	365.143	0,833
April	325.989	0,838
Mei	306.172	0,838
Juni	258.46	0,851
Juli	272.774	0,849
Agustus	304.134	0,846
September	292.827	0,839
Oktober	330.201	0,839
November	327.558	0,836
Desember	337.138	0,838
Total Setahun	3.809.041	0,839 (Rata-rata)

Nilai PR tertinggi tercatat pada bulan Juni sebesar 0,851. Hal ini disebabkan oleh suhu ambien yang relatif lebih rendah (26,6 °C) dibandingkan bulan lainnya sehingga efisiensi sel surya meningkat akibat berkurangnya kehilangan panas (*thermal loss*) pada modul. Sistem menunjukkan performa yang stabil dengan PR rata-rata tahunan sebesar 83,86%.

2. Evaluasi Kerugian Energi (*Detailed Loss Diagram Analysis*)

Diagram kerugian (*loss diagram*) memberikan gambaran utuh mengenai transformasi energi dari radiasi matahari menjadi listrik yang siap digunakan.



Gambar 3. Diagram Kerugian

Kehilangan akibat optik (*incidence angle modifier / IAM*) menunjukkan kerugian sebesar -2,52%. Hal ini dipengaruhi oleh sudut datang sinar matahari terhadap permukaan kaca modul yang mengikuti kemiringan atap *dome*. Selanjutnya, kerugian suhu (*thermal loss*) atau kehilangan energi terbesar terjadi pada tahap konversi PV akibat suhu sel yang tinggi, yaitu mencapai -9,64%. Mengingat suhu ambien rata-rata Amamapare berada pada 27,0 °C, suhu operasional modul dapat mencapai angka signifikan yang mengurangi efisiensi sel surya secara langsung.

Kerugian kualitas dan *mismatch* pada *module quality loss* memberikan kontribusi positif sebesar +0,75% yang menunjukkan performa modul Jinko Solar di lapangan sedikit lebih baik dari spesifikasi standar minimumnya. Namun, terdapat *mismatch loss* sebesar -2,00% akibat variasi performa antar modul dalam satu rangkaian *string*.

3. Analisis Kelayakan Ekonomi dan Manfaat Lingkungan

Berdasarkan estimasi biaya sistem, total nilai investasi (*Capital Expenditure / CAPEX*) untuk pembangunan PLTS berkapasitas 2,57 MWp adalah sebesar 1.477.600 USD. Nilai ini mencakup seluruh komponen utama sistem, jasa instalasi, hingga *commissioning*. Biaya operasional tahunan (*Operational Expenditure / OPEX*) diproyeksikan sebesar 245.006 USD/tahun setelah memperhitungkan asumsi inflasi 3% per tahun. Tingginya biaya operasional ini mencerminkan strategi pemeliharaan yang intensif di lingkungan PLTU, khususnya untuk pembersihan panel dari debu batu bara guna menjaga performa jangka panjang.

Tabel 5. Ringkasan Indikator Finansial Proyek

Parameter Ekonomi	Nilai Estimasi	Satuan
Total Installation Cost	1.477.600	USD
Energi Diproduksi	3.809	MWh/year
Operating Costs (Incl. Inflation)	245.006	USD/tahun
Cost of Produced Energy (LCOE)	0,0987	USD/kWh

Nilai LCOE sebesar 0,0987 USD/kWh menunjukkan harga pokok produksi energi dari PLTS selama masa pakai 25 tahun. Nilai ini menjadi parameter penting untuk membandingkan efisiensi ekonomi PLTS terhadap biaya pokok pembangkitan (BPP) eksisting di unit PLTU Amamapare.

Dalam aspek lingkungan, implementasi PLTS pada atap *Coal Stockpile* memberikan kontribusi signifikan terhadap target pengurangan emisi gas rumah kaca. Berdasarkan analisis siklus hidup sistem pada laporan PVsyst, proyek ini menghasilkan neraca emisi karbon yang sangat positif.

Tabel 6. Analisis Keseimbangan Emisi CO₂ Selama Masa Pakai 25 Tahun

Parameter Emisi	Nilai	Satuan
Total Saved Emissions	50.299,7	tCO ₂
Generated Emissions (Produksi & Transport)	11.817,8	tCO ₂
Replaced Emissions (Substitusi Energi Fosil)	69.896	tCO ₂
Specific Saved CO ₂	0,530	kgCO ₂ /kWh

Selama 25 tahun masa operasional, PLTS diproyeksikan mampu menghindari emisi sebesar 50.299,7 ton CO₂. Nilai emisi yang digantikan (*replaced emissions*) dihitung berdasarkan faktor emisi jaringan listrik yang disubstitusi oleh produksi energi bersih PLTS sebesar 3,809 GWh per tahun.

Secara teknis-ekonomi, setiap kWh energi bersih yang dihasilkan tidak hanya bernilai secara moneter berupa penghematan biaya bahan bakar fosil, tetapi juga memiliki nilai lingkungan yang dapat dikonversikan menjadi *carbon credit*. Dengan total penghematan emisi tahunan rata-rata sekitar 2.012 tCO₂, proyek ini memperkuat posisi PLTU Amamapare dalam mendukung transisi energi hijau di kawasan industri Papua.

Analisis Pemodelan Ekonomi

1. Cost-Benefit Analysis (CBA)

Tabel 7. Detail Perhitungan *Cost-Benefit Analysis (CBA)* Proyek PLTS 2,57 MWp

No	Komponen Parameter	Simbol	Perhitungan / Sumber Data	Nilai	Satuan
A. Komponen Biaya (Costs)					
1	Biaya Investasi Awal	CAPEX	Data PVsyst (Hal. 10)	1.477.600	USD
2	Biaya Operasional (25 thn)	OPEX ₂₅	245.006 × 25 tahun	6.125.150	USD

No	Komponen Parameter	Simbol	Perhitungan / Sumber Data	Nilai	Satuan
3	Total Biaya Pengeluaran	C _{total}	CAPEX + OPEX ₂₅	7.602.750	USD
B. Komponen Manfaat (Benefits)					
4	Produksi Energi Tahunan	E _{yield}	Data PVsyst (Hal. 11)	3.809	MWh/thn
5	Harga Substitusi Energi	P _{elec}	Estimasi BPP PLTU Amamapare	0,13	USD/kWh
6	Total Manfaat (25 thn)	B _{total}	E _{yield} × P _{elec} × 25	12.379.250	USD
C. Indikator Kelayakan					
7	Net Benefit	NPV	(Data PVsyst Hal.12)	1.437.413	USD
8	Benefit-Cost Ratio	BCR	B _{total} / C _{total}	1,63	-

Analisis ini bertujuan untuk menilai apakah total manfaat finansial berupa penghematan biaya energi mampu melampaui total pengeluaran selama 25 tahun masa pakai sistem. Penentuan komponen biaya terdiri atas *Capital Expenditure* (CAPEX) sebesar 1.477.600 USD, *Operational Expenditure* (OPEX) riil tanpa inflasi sebesar 168.000 USD/tahun, serta OPEX terinflasi sebesar 245.006 USD/tahun berdasarkan perhitungan PVsyst dengan asumsi inflasi 3% per tahun. Dengan demikian, total pengeluaran selama 25 tahun diperoleh dari perhitungan berikut:

$$1.477.600 + (245.006 \times 25) = 7.602.750 \text{ USD} \tag{3}$$

Penentuan manfaat (*benefit*) dihitung berdasarkan total energi yang dihasilkan dikalikan dengan asumsi nilai substitusi energi atau biaya pokok pembangkitan (BPP) PLTU. Produksi energi tahunan sistem sebesar 3.809 MWh dengan estimasi nilai energi sebesar 0,13 USD/kWh yang digunakan untuk menunjukkan nilai substitusi listrik berbasis fosil. Dengan demikian, total manfaat selama 25 tahun diperoleh melalui persamaan berikut:

$$3.809.000 \times 0,13 \times 25 = 12.379.250 \text{ USD} \tag{4}$$

2. *Cost-Effectiveness Analysis* (CEA)

CEA digunakan untuk mengukur seberapa rendah biaya yang diperlukan sistem dalam menghasilkan pengurangan emisi karbon dibandingkan metode dekarbonisasi lainnya. Berdasarkan hasil analisis, total emisi yang berhasil dikurangi (*total CO₂ saved*) sebesar 50.299,7 ton CO₂ dengan total investasi (CAPEX) sebesar 1.477.600 USD. Perhitungan nilai CEA dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Cost Effectiveness} = \frac{\text{Total Investment (CAPEX)}}{\text{Total CO}_2 \text{ Saved}} \tag{5}$$

$$CEA = \frac{1.477.600}{50.299,7} = 29,38 \text{ USD/tCO}_2 \tag{6}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa perusahaan mengeluarkan biaya sebesar 29,38 USD untuk setiap pengurangan 1 ton CO₂. Berdasarkan standar pasar karbon internasional (*European Union Allowance* / EUA), nilai tersebut tergolong efektif dan kompetitif sehingga menunjukkan bahwa implementasi PLTS atap *Coal Field* merupakan solusi dekarbonisasi yang ekonomis bagi PLTU Amamapare.

3. *Sensitivity Analysis* (SA)

Analisis sensitivitas dilakukan untuk melihat perubahan LCOE (0,0987 USD/kWh) apabila variabel operasional di area ekstrem mengalami perubahan.

Skenario 1 merupakan kenaikan biaya pembersihan (*cleaning cost*). Pada area *Coal Field*, debu batu bara dapat lebih tebal dari perkiraan sehingga berpotensi meningkatkan biaya tenaga kerja dan penggunaan air. Apabila OPEX naik sebesar 20%, yaitu dari 245.006 USD/tahun menjadi 294.007 USD/tahun, maka nilai LCOE baru berdasarkan perhitungan PVsyst meningkat menjadi 0,1081 USD/kWh.

Skenario 2 merupakan penurunan efisiensi akibat *soiling* atau akumulasi debu pada permukaan panel. Apabila panel tidak dibersihkan tepat waktu, produksi energi diperkirakan turun sebesar 5% menjadi 3.618,5 MWh/tahun. Dengan nilai investasi yang tetap dan output energi yang lebih rendah, nilai LCOE meningkat menjadi 0,1038 USD/kWh.

Tabel 8. Sensitivity Analysis

Analisis Skenario	Variabel Input yang Berubah	Deviasi (%)	LCOE Hasil (USD/kWh)	Selisih terhadap Baseline
Baseline Case	Kondisi Normal (PVsyst Data)	0%	0,0987	-

Analisis Skenario	Variabel Input yang Berubah	Deviasi (%)	LCOE Hasil (USD/kWh)	Selisih terhadap Baseline
Pesimis I	Kenaikan Biaya Pembersihan (OPEX)	20%	0,1081	+9,52%
Pesimis II	Penurunan Produksi (Soiling Loss)	-5%	0,1038	+5,16%
Optimis I	Peningkatan Bifacial Gain	5%	0,0939	-4,86%
Optimis II	Efisiensi Biaya Pemeliharaan	-10%	0,0954	-3,34%

Nilai LCOE pada Tabel 8 dihitung kembali berdasarkan prinsip dasar total biaya siklus hidup dibagi dengan total energi yang dihasilkan. Berikut ini rumus perubahan LCOE pada Tabel 8.

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Yield_t}{(1+r)^t}} \tag{7}$$

Di mana CAPEX adalah biaya investasi tetap sebesar 1.477.600 USD, OPEX adalah biaya operasional tahunan sebesar 245.006 USD, dan *yield* adalah produksi energi tahunan sebesar 3.809.041 kWh.

Variabel yang paling sensitif adalah biaya operasional (OPEX). Namun, meskipun dalam kondisi paling kritis dengan nilai LCOE sebesar 0,1081 USD/kWh, angka tersebut masih dianggap layak untuk wilayah Papua yang memiliki biaya logistik energi fosil yang tinggi.

Diskusi

Kelayakan Teknis Pemanfaatan Atap *Coal Field* PLTU Amamapare dalam Menghasilkan Energi dari Sistem PLTS

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst 7.4.8, pemanfaatan atap *Coal Stockpile Cover* PLTU Amamapare untuk sistem PLTS berkapasitas 2,57 MWp menunjukkan tingkat kelayakan teknis yang sangat tinggi. Temuan hasil analisis pemodelan mencatat produksi energi tahunan sebesar 3.809 MWh dengan *performance ratio* (PR) mencapai 83,86%. Nilai PR yang berada di atas ambang batas standar industri, yaitu di atas 80%, menunjukkan bahwa konfigurasi 4.720 unit modul Jinko Solar 545 Wp dan 25 unit inverter Huawei 100 kW telah terintegrasi secara optimal.

Tingginya efisiensi ini dipengaruhi secara signifikan oleh penerapan skema *double orientation* (Utara-Selatan) dengan sudut landai 10°. Interpretasi atas data ini menunjukkan bahwa meskipun sistem berada di wilayah tropis dengan suhu ambien rata-rata 27 °C, penggunaan teknologi *bifacial* memberikan keuntungan tambahan (*bifacial gain*) yang mampu mengompensasi kerugian termal (*thermal loss*) sebesar -9,64%. Kerugian orientasi ganda yang sangat minim, yaitu sebesar -0,10%, membuktikan bahwa inverter dengan teknologi *multi-MPPT* mampu menangani variasi iradiasi pada atap lengkung tanpa menurunkan performa sistem secara keseluruhan. Implikasinya, struktur atap *Coal Field* yang luas dan masif bukan lagi sekadar pelindung material, tetapi juga dapat dimanfaatkan sebagai aset produktif penyedia energi bersih.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Rahmanta et al. (2023) yang menyatakan bahwa integrasi PLTS pada atap industri di wilayah Indonesia Timur memiliki potensi *yield* energi yang stabil karena tingkat variasi iradiasi musiman yang relatif rendah. Nilai PR sebesar 83,86% dalam penelitian ini juga mendukung teori yang dikemukakan oleh Okonkwo et al. (2025), di mana sistem PLTS skala besar di lingkungan pesisir mampu mencapai efisiensi tinggi melalui pemilihan material modul yang tahan terhadap kelembapan tinggi dan suhu ekstrem.

Namun demikian, terdapat sedikit perbedaan hasil apabila dibandingkan dengan penelitian Faye et al. (2021) dan Shahrouri et al. (2026) pada objek atap datar, di mana kerugian IAM pada atap datar umumnya lebih rendah. Pada penelitian ini, kerugian IAM mencapai -2,52% akibat geometri atap *dome* yang melengkung. Perbedaan ini merupakan konsekuensi logis karena geometri lengkung menciptakan sudut datang cahaya matahari yang lebih bervariasi sepanjang hari dibandingkan permukaan datar sempurna. Meskipun demikian, kerugian tersebut masih dapat diminimalkan melalui penempatan panel yang presisi pada busur atap sehingga sistem tetap mampu menghasilkan output energi yang kompetitif dibandingkan PLTS atap konvensional.

Kontribusi PLTS atap terhadap peningkatan output pembangkit dan pengurangan emisi karbon

Implementasi PLTS pada atap *Coal Field* PLTU Amamapare memberikan kontribusi signifikan, baik dalam aspek penyediaan energi bersih maupun pengurangan emisi karbon. Berdasarkan hasil simulasi, sistem ini mampu menginjeksikan energi sebesar 3.809 MWh per tahun ke jaringan internal pembangkit. Temuan ini menunjukkan bahwa PLTS dapat berfungsi sebagai unit pembangkit pendukung yang membantu mengurangi beban operasi unit termal eksisting, terutama pada periode *peak sun hours*. Dengan produksi spesifik sebesar 1.481 kWh/kWp/tahun, sistem ini secara efektif meningkatkan total output energi kawasan industri PLTU Amamapare tanpa memerlukan tambahan konsumsi bahan bakar fosil.

Dari sisi lingkungan, proyek ini mencatat potensi reduksi emisi sebesar 50.299,7 tCO₂ selama masa operasi 25 tahun. Nilai tersebut diperoleh dari selisih antara emisi yang dihasilkan selama proses produksi dan transportasi komponen sebesar 11.817,8 tCO₂ terhadap emisi yang berhasil digantikan dari penggunaan energi

listrik berbasis batu bara sebesar 69.896 tCO₂. Dengan demikian, setiap kWh energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS mampu mengurangi emisi sekitar 0,530 kgCO₂. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi energi terbarukan pada infrastruktur pendukung pembangkit fosil memiliki dampak signifikan dalam mempercepat transisi energi pada sektor industri.

Kontribusi energi sebesar 3,81 GWh per tahun ini sejalan dengan penelitian Anisah dan Tharo (2025) yang menyatakan bahwa skema *captive power* melalui PLTS atap di sektor industri mampu menyuplai sebagian kebutuhan beban tambahan secara mandiri. Nilai PR sebesar 83,86% dalam penelitian ini juga konsisten dengan temuan Tarigan et al. (2025), yang menyatakan bahwa penggunaan modul dengan efisiensi tinggi pada wilayah dengan tingkat iradiasi tinggi memiliki korelasi positif terhadap target dekarbonisasi perusahaan.

Apabila dibandingkan dengan PLTS darat (*ground-mounted*), efisiensi reduksi karbon per meter persegi pada proyek ini cenderung lebih tinggi karena sistem memanfaatkan area atap (*roof-mounted*) yang telah tersedia tanpa memerlukan pembukaan lahan baru (*land clearing*) (Awan et al., 2020; Kouloumpis et al., 2020). Dengan demikian, tidak terdapat tambahan emisi karbon akibat perubahan tata guna lahan maupun hilangnya vegetasi. Namun demikian, efisiensi pemanfaatan area pada PLTS atap tetap memiliki keterbatasan karena tidak seluruh permukaan atap dapat digunakan untuk pemasangan modul. Sebagian area harus disediakan untuk kebutuhan *grounding*, *mounting*, akses pemeliharaan, dan keselamatan kerja di area atap. Hal tersebut sejalan dengan penelitian Roy dan Pearce (2024) yang menyatakan bahwa sistem PLTS atap memiliki keterbatasan ruang instalasi dibandingkan sistem *ground-mounted*.

Kelayakan Ekonomi dan Estimasi Dampak Lingkungan Pemanfaatan Atap *Coal Field* sebagai PLTS

Analisis kelayakan ekonomi terhadap sistem PLTS 2,57 MWp di PLTU Amamapare menunjukkan parameter investasi yang kompetitif dengan nilai LCOE sebesar 0,0987 USD/kWh. Nilai ini diperoleh dari total biaya investasi awal (CAPEX) sebesar 1.477.600 USD dan biaya operasional tahunan (OPEX) sebesar 245.006 USD setelah memperhitungkan inflasi sebesar 3% per tahun. Nilai LCOE tersebut merepresentasikan biaya rata-rata produksi energi listrik selama masa operasi 25 tahun sehingga dapat digunakan sebagai indikator utama efisiensi ekonomi proyek.

Untuk memperdalam evaluasi ekonomi, dilakukan CBA guna membandingkan total manfaat finansial dengan total biaya proyek. Berdasarkan hasil analisis, proyek menghasilkan nilai NPV sebesar 1.437.413 USD dengan BCR sebesar 1,63. Hasil tersebut menunjukkan bahwa setiap investasi sebesar 1 USD mampu memberikan manfaat ekonomi sebesar 1,63 USD melalui penghematan konsumsi bahan bakar fosil dan pengurangan biaya energi pembangkit.

Selain manfaat ekonomi, proyek ini juga memiliki nilai lingkungan yang tinggi berdasarkan hasil CEA. Dengan total pengurangan emisi sebesar 50.299,7 tCO₂, biaya reduksi karbon sistem ini tercatat sebesar 29,38 USD/tCO₂. Nilai tersebut tergolong kompetitif apabila dibandingkan dengan harga rata-rata kredit karbon internasional maupun skema pajak karbon global. Dengan demikian, implementasi PLTS pada atap *Coal Field* dapat dikategorikan sebagai solusi dekarbonisasi yang ekonomis dan efektif bagi PLTU Amamapare.

Mengingat sistem PLTS ditempatkan pada area *stockpile* batu bara yang memiliki tingkat debu tinggi, dilakukan analisis sensitivitas untuk mengevaluasi ketahanan nilai LCOE terhadap perubahan biaya operasional dan penurunan produksi energi. Hasil analisis menunjukkan bahwa kenaikan biaya pemeliharaan maupun penurunan produksi energi akibat *soiling* menyebabkan peningkatan nilai LCOE. Namun demikian, pada kondisi paling kritis sekalipun, yaitu sebesar 0,1081 USD/kWh, proyek masih berada pada rentang biaya energi yang kompetitif untuk wilayah Papua yang memiliki biaya logistik energi fosil relatif tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa proyek PLTS atap *Coal Field* memiliki tingkat ketahanan ekonomi (*robustness*) yang baik terhadap perubahan kondisi operasional.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis, disimpulkan bahwa pemanfaatan atap *Coal Stock Pile Cover* PLTU Amamapare dengan desain *double orientation* (10° utara dan 10° selatan) layak diterapkan secara teknis karena mampu menghasilkan energi sebesar 3.809 MWh/tahun dengan nilai PR sebesar 83,86%. Sistem PLTS berkapasitas 2,57 MWp tersebut juga memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan bauran energi bersih dengan produksi spesifik sebesar 1.481 kWh/kWp/tahun. Selain itu, dari aspek ekonomi proyek dinyatakan layak dengan nilai LCOE sebesar 0,0987 USD/kWh, NPV sebesar 1.437.413 USD, serta BCR sebesar 1,63.

Berdasarkan temuan penelitian, disarankan untuk mengintegrasikan sistem pembersihan panel otomatis (*robotic cleaning*) guna mengurangi kerugian akibat debu batu bara yang menjadi variabel paling kritis. Selain itu, diperlukan instalasi sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mendukung pemantauan *real-time* dan pemeliharaan prediktif terhadap akumulasi debu pada permukaan panel. Penelitian lanjutan juga perlu dilakukan terkait integrasi BESS untuk mengatasi fluktuasi energi surya di Amamapare sehingga stabilitas tegangan sistem internal PLTU dapat lebih terjaga.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada PLTU Amamapare dan Universitas Diponegoro atas dukungan yang diberikan dalam

melaksanakan kegiatan penelitian ini, sehingga dapat berjalan dengan baik dan lancar.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan mulai dari awal penelitian sampai publikasi.

Daftar Pustaka

- Al-Aboosi, F. Y., & Al-Aboosi, A. F. (2021). Preliminary evaluation of a rooftop grid-connected photovoltaic system installation under the climatic conditions of Texas (USA). *Energies*, *14*(3), 586. <https://doi.org/10.3390/en14030586>
- Anisah, S., & Tharo, Z. (2025). The potential of rooftop solar power plants as an environmentally friendly energy source for residents in Medan City. *Journal of Information Technology, Computer Science and Electrical Engineering*, *2*(3), 83–90. <https://doi.org/10.61306/jitcse.v2i3.239>
- Apurv, B., Nagangouda, H., & Ananthachar, R. (2017). The design and proposal of solar photovoltaic power plant for medium scale industry. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, *3*(6), 5–17. <https://doi.org/10.7324/ijasre.2017.36516>
- Awan, A. B., Alghassab, M., Zubair, M., Bhatti, A. R., Uzair, M., & Abbas, G. (2020). Comparative analysis of ground-mounted vs. rooftop photovoltaic systems optimized for interrow distance between parallel arrays. *Energies*, *13*(14), 3639. <https://doi.org/10.3390/en13143639>
- Faye, I., Ndiaye, A., & Mamadou, E. (2021). Influence of the incidence angle modifier and radiation as a function of the module performance for monocrystalline textured glass and no textured in outdoor exposed. In *Solar cells: Theory, materials and recent advances*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96160>
- Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian Republik Indonesia. (2023). *Pemerintah terus dorong transisi energi menuju net zero emission 2060*.
- Kouloumpis, V., Kalogerakis, A., Pavlidou, A., Tsinarakis, G., & Arampatzis, G. (2020). Should photovoltaics stay at home? Comparative life cycle environmental assessment on roof-mounted and ground-mounted photovoltaics. *Sustainability*, *12*(21), 9120. <https://doi.org/10.3390/su12219120>
- Mdallal, A., Ahmad, Y., Montaser, M., Muhammad, A. A., Abdul, H. A., & Abdul, G. O. (2025). A comprehensive review on solar photovoltaics: Navigating generational shifts, innovations, and sustainability. *Sustainable Horizons*, *13*(1). <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2025.100137>
- Okonkwo, P. C., Nwokolo, S. C., Udo, S. O., Obiwulu, A. U., Onnoghen, U. N., Alarifi, S. S., Eldosouky, A. M., Ekwok, S. E., Andr  s, P., & Akpan, A. E. (2025). Solar PV systems under weather extremes: Case studies, classification, vulnerability assessment, and adaptation pathways. *Energy Reports*, *13*, 929–959. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.12.067>
- Rahmanta, M. A., Syamsuddin, A., Tanbar, F., & Damanik, N. (2023). Analisis perkembangan teknologi modul photovoltaic (PV) untuk meningkatkan penetrasi pusat listrik tenaga surya (PLTS) di Indonesia. *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, *7*(1), 22–33. <https://doi.org/10.30588/jo.v7i1.1509>
- Roy, R., & Pearce, J. M. (2024). Is small or big solar better for the environment? Comparative life cycle assessment of solar photovoltaic rooftop vs. ground-mounted systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *29*(3), 516–536. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02254-x>
- Shahrouri, K., Tolba, A. G., Doranehgard, M. H., & Vasselbehagh, A. (2026). Optical losses in photovoltaic solar panels: Mechanisms, modeling approaches, and mitigation strategies. *Thermal Science and Engineering Progress*, *71*, 104557. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2026.104557>
- Tarigan, E., Dwi Kartikasari, F., Indrawati, V., & Irawati, F. (2025). Sustainability assessment of residential grid-connected monocrystalline module solar PV systems in three major cities in Indonesia: A life cycle assessment perspective. *Future Cities and Environment*, *11*. <https://doi.org/10.70917/fce-2025-003>
- Wang, X., Xing, G., & Yuming, W. (2023). Comprehensive analysis of tropical rooftop PV project: A case study in Nanning. *Heliyon*, *9*(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14131>
- Wei, X., Yingzhang, L., Guo, X., Wenlong, C., & Zhuocheng, J. (2023). A visualization study of vacuum enhancement on vapor flow and yield in tubular solar still. *Solar Energy*, *253*(1), 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.045>