

Analisis *Techno-Economic* Integrasi PLTS Atap pada UMKM Industri Pangan Menggunakan Simulasi PVsyst untuk Reduksi Biaya Energi Listrik

Bagus Pramono^a, Nugroho Tri Waskitho^b

^aMahasiswa Program Profesi Insinyur, Universitas Muhammadiyah Malang, Jl. Raya Tlogomas 246 Malang

^bDosen Program Profesi Insinyur, Universitas Muhammadiyah Malang, Jl. Raya Tlogomas 246 Malang

bagus.pramono01@gmail.com, nugroho@umm.ac.id

Abstract: *Rising electricity demand in Indonesia's small and medium enterprise (SME) sector has encouraged the use of renewable energy to improve efficiency and reduce operating costs. This study aims to analyze the technical performance, economic feasibility, and environmental benefits of implementing a grid-connected rooftop photovoltaic (PV) system for a food-processing SME. A case study was conducted at Diva Bakery, Banyuwangi, Indonesia. The system was designed using a rooftop maximum capacity scenario and simulated with PVsyst, while economic performance was assessed using discounted cash flow analysis. The proposed system has an installed capacity of 4.95 kWp, consisting of 9 monocrystalline PV modules (550 Wp each) and a 4 kW inverter. Simulation results show annual energy production of 8,288.4 kWh, with a specific yield of 1,674 kWh/kWp/year and a performance ratio of 80.51%. The main technical loss was caused by temperature effects. Economic evaluation indicates annual electricity savings of IDR 14.09 million, NPV of IDR 58.4 million, IRR of 18.7%, discounted payback period of 5.4 years, and LCOE of IDR 986/kWh, lower than the PLN tariff. The system can also reduce carbon emissions by 6.08 tons CO₂/year. Rooftop PV in food-processing SMEs is feasible, profitable, and supports Indonesia's clean energy transition.*

Keywords: *Rooftop photovoltaic, techno-economic analysis, SMEs, PVsyst, renewable energy.*

Pendahuluan

Sektor Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM), khususnya industri pangan, merupakan pilar krusial perekonomian nasional yang kini menghadapi tantangan eskalasi biaya operasional akibat kenaikan tarif tenaga listrik dan ketergantungan tinggi pada energi berbasis fosil [1], [2]. Di tengah komitmen global menuju *Net Zero Emission* (NZE) 2060 dan target bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) nasional sebesar 23% pada tahun 2025, implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap muncul sebagai instrumen strategis untuk meningkatkan efisiensi energi sekaligus mereduksi emisi gas rumah kaca di sektor industri skala kecil [3], [4], [5].

Indonesia memiliki potensi iradiasi surya yang melimpah, rata-rata mencapai di atas 4,8 kWh/m²/hari, yang menawarkan peluang signifikan bagi pengembangan sistem energi terdistribusi [3], [5]. Secara spesifik, wilayah Kabupaten Banyuwangi memiliki karakteristik radiasi yang mendukung keberlanjutan operasional PLTS [4]. Keekonomian sistem ini semakin diperkuat oleh dukungan regulasi melalui Peraturan Menteri ESDM No. 26 Tahun 2021 (memperbarui regulasi No. 49/2018), yang memfasilitasi integrasi PLTS atap dengan jaringan tenaga listrik nasional melalui skema pembiayaan yang lebih kompetitif bagi konsumen komersial dan industri [1], [3], [6].

Meskipun potensi teknisnya besar, tinjauan literatur menunjukkan bahwa mayoritas studi implementasi PLTS atap di Indonesia masih terkonsentrasi pada sektor bangunan komersial besar, institusi pendidikan, atau perumahan menengah ke atas [2], [3], [4], [7], [8]. Penelitian yang secara spesifik mengevaluasi integrasi PLTS pada sektor UMKM industri pangan masih relatif terbatas. Padahal, sistem PLTS atap terbukti mampu memberikan penghematan biaya listrik yang signifikan, dengan potensi reduksi tagihan mencapai 11% hingga 36% tergantung pada skala instalasi [1], [9].

JEE: Journal of Educational Engineering and Environment

Selain itu, terdapat celah metodologis (*research gap*) sebagian besar penelitian terdahulu mengandalkan asumsi profil beban standar atau data konsumsi bulanan statis dalam desain sistem [3], [10]. Pendekatan ini berisiko menghasilkan desain kapasitas (*sizing*) yang tidak optimal karena tidak merepresentasikan fluktuasi beban aktual pengguna [7], [11]. Integrasi data *load profile* aktual berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan simulasi performa menggunakan perangkat lunak standar industri seperti PVsyst sangat krusial untuk menghasilkan estimasi *energy yield* dan rasio performa (*Performance Ratio*) yang akurat [3], [11], [12], [13]. PVsyst memungkinkan analisis mendalam terhadap berbagai variabel kerugian (*losses*) seperti *temperature effect*, *shading*, dan inefisiensi komponen yang sangat menentukan kelayakan teknis sistem [7], [13], [14].

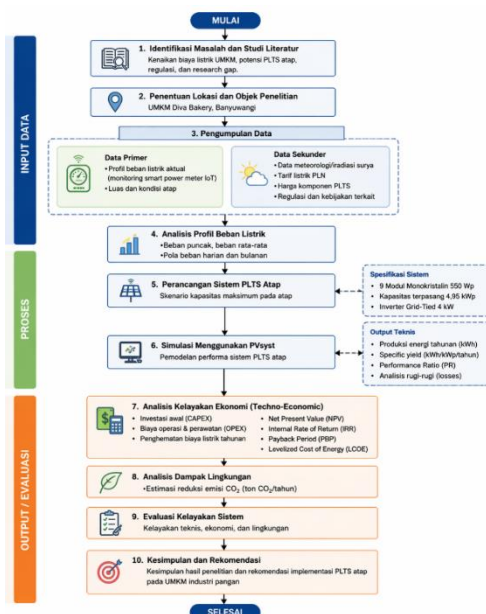
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini menawarkan pendekatan *techno-economic assessment* berbasis data riil dengan mengintegrasikan profil beban hasil *monitoring smart power meter* ke dalam simulasi PVsyst. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter keekonomian utama seperti *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Levelized Cost of Energy* (LCOE), dan *Payback Period* (PBP) [1], [11], [12], [13]. Hingga saat ini masih terdapat keterbatasan bukti empiris mengenai performa teknis, potensi penghematan biaya listrik, dan kelayakan investasi PLTS atap pada sektor UMKM produktif di Indonesia.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, studi ini hadir untuk mengisi kekosongan literatur dengan *melakukan techno-economic assessment* PLTS atap berbasis data riil melalui integrasi profil beban aktual hasil *monitoring smart power meter* ke dalam simulasi PVsyst. Penelitian ini secara khusus mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomis sistem PLTS atap pada UMKM Diva Bakery Banyuwangi, sehingga diharapkan memberikan kontribusi baru sebagai model implementasi energi bersih yang aplikatif dan replikatif bagi sektor UMKM industri pangan di Indonesia.

Metode

A. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian pada Gambar 1 menyajikan tahapan metodologis penelitian secara sistematis yang digunakan untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomis implementasi PLTS atap pada UMKM Diva Bakery di Banyuwangi. Tahap awal penelitian dimulai dengan identifikasi permasalahan dan studi literatur, yang difokuskan pada isu peningkatan biaya energi listrik pada sektor UMKM, potensi pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi alternatif, kebijakan dan regulasi terkait pengembangan PLTS atap di Indonesia, serta penelaahan *research gap* berdasarkan hasil penelitian terdahulu. Tahapan ini bertujuan untuk membangun landasan konseptual penelitian sekaligus merumuskan urgensi dan kebaruan studi yang dilakukan.

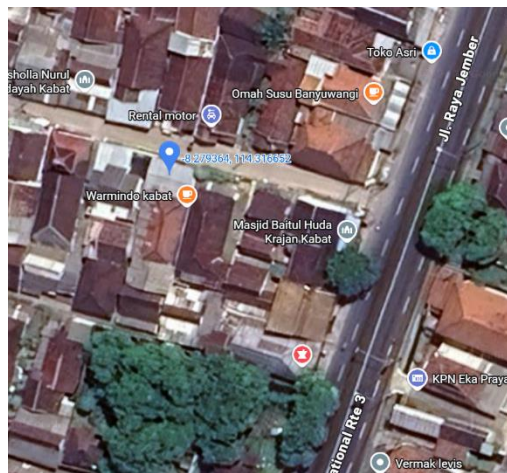


JEE: Journal of Educational Engineering and Environment

Gambar 1. Diagram Alir Metodologi Penelitian PLTS Atap pada UMKM Diva Bakery

B. Lokasi dan Karakteristik Objek Penelitian

Penelitian ini menggunakan studi kasus pada unit UMKM industri pangan Diva Bakery yang berlokasi di Kabupaten Banyuwangi, Provinsi Jawa Timur, Indonesia. Secara geografis, lokasi penelitian berada pada koordinat $8^{\circ}16'45.5''$ LS dan $114^{\circ}18'59.9''$ BT ($-8.2793178, 114.3166469$). Pemilihan lokasi ini didasarkan pada potensi iradiasi surya wilayah tropis yang tinggi dan profil konsumsi energi listrik yang dominan pada siang hari, sehingga memiliki potensi yang baik untuk implementasi sistem PLTS atap. Data meteorologi spesifik lokasi, yang mencakup *Global Horizontal Irradiation* (GHI), *ambient temperature*, dan kecepatan angin, diintegrasikan ke dalam perangkat lunak PVsyst menggunakan basis data NASA-SSE atau Meteonorm untuk menjamin akurasi estimasi *energy yield* [12], [13], [14].



Gambar 2. Lokasi dan Titik Koordinat UMKM industri pangan Diva Bakery

Sistem kelistrikan *eksisting* pada objek penelitian merupakan sistem yang terhubung dengan jaringan distribusi PT PLN (Persero) (*grid-connected*) dengan kapasitas daya terpasang sebesar 5.500 VA pada kategori tarif R-2/TR. Operasional produksi berlangsung secara rutin selama 10 jam per hari pada rentang pukul 07.00–17.00 WIB. Karakteristik beban listrik didominasi oleh peralatan produksi dengan motor induksi dan elemen pemanas listrik, yang menunjukkan pola konsumsi energi puncak pada siang hari. Profil beban tersebut memiliki tingkat kesesuaian temporal (*temporal alignment*) yang sangat baik dengan kurva produksi energi surya, sehingga memungkinkan maksimasi rasio penggunaan mandiri (*self-consumption*) tanpa ketergantungan pada sistem penyimpanan baterai yang mahal [3], [12], [13], [15]

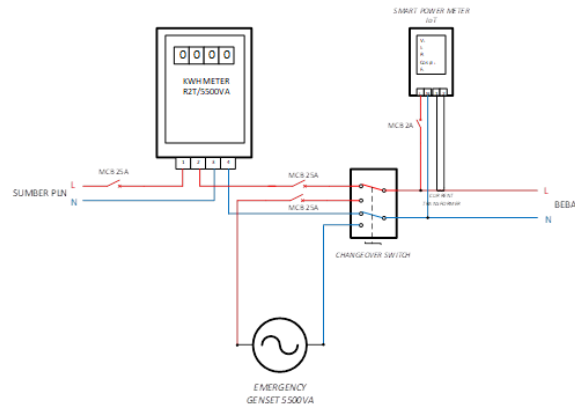
C. Akuisisi dan Pengolahan Data Beban Listrik

Akuisisi data profil beban dilakukan secara empiris menggunakan sistem *monitoring smart power meter* berbasis *Internet of Things* (IoT) yang terintegrasi pada panel distribusi utama objek penelitian. Pengambilan data dilakukan secara kontinu dalam format *high-resolution time-series* selama periode Juli hingga September 2024 dengan interval pencatatan terjadwal yang tersinkronisasi secara otomatis ke *platform cloud monitoring*. Parameter kelistrikan yang direkam secara *real-time* mencakup tegangan (*voltage*), arus (*current*), daya aktif (*active power*), faktor daya (*power factor*), frekuensi, dan energi listrik kumulatif. Penggunaan data beban riil ini sangat krusial untuk menghasilkan simulasi yang lebih presisi dibandingkan penggunaan data estimasi statis.

Data mentah hasil *monitoring* kemudian diproses melalui pendekatan statistik deskriptif untuk mengekstrak parameter operasional krusial, yang meliputi konsumsi daya harian minimum, maksimum, serta rata-rata. Identifikasi karakteristik beban ini menjadi fondasi utama dalam proses *sizing* kapasitas sistem PLTS atap guna menghindari inefisiensi biaya akibat *oversizing* atau risiko teknis akibat *undersizing*. Selanjutnya, data profil beban aktual ini diintegrasikan ke dalam perangkat lunak PVsyst untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian temporal (*temporal*

JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment

alignment) antara kurva konsumsi energi UMKM dengan kurva potensi produksi energi surya (*energy yield*) di lokasi penelitian, sehingga rasio penggunaan mandiri (*self-consumption*) dapat dioptimalkan.



Gambar 3. Wiring Diagram Pemasangan Smart Power Meter IoT [16]

Data beban listrik diperoleh dari hasil *monitoring smart power meter* selama periode Juli–September 2024. Dataset terdiri atas 12 sampel pengamatan dengan rentang waktu observasi selama 77 hari, mulai 08 Juli 2024 hingga 23 September 2024. Resolusi data pada penelitian ini terdiri atas dua tingkatan, yaitu resolusi akuisisi dan resolusi penyajian data. Pada tingkat akuisisi, smart power meter melakukan perekaman beban listrik secara kontinu dalam interval waktu data kurang lebih setiap 10 detik (≈ 10 s/data), kemudian data mentah tersebut diolah menjadi statistik harian. Pada tingkat penyajian, data ditampilkan dalam bentuk nilai minimum, maksimum, dan rata-rata daya semu harian, yang selanjutnya diambil secara periodik dengan interval observasi mingguan. Dengan demikian, dataset ini merepresentasikan kondisi beban listrik aktual secara berkala dan mampu menggambarkan variasi konsumsi energi selama periode penelitian.

Tabel 1. Statistik Daya Semu Harian UMKM Diva Bakery Selama Periode Pengamatan

Tanggal	Daya Semu (VA)		
	Min	Maks	Rata-rata
08-Jul-24	38,21	3648,40	1267,90
15-Jul-24	38,53	3771,62	1190,67
22-Jul-24	30,28	3927,26	1151,12
31-Jul-24	22,11	3826,01	1386,69
05-Aug-24	24,52	3842,43	1298,65
13-Aug-24	20,96	3561,75	1631,61
20-Aug-24	16,72	3293,51	1438,82
27-Aug-24	40,25	3269,62	1470,54
02-Sep-24	51,25	3315,35	941,47
09-Sep-24	16,76	3378,86	1022,60
16-Sep-24	50,78	3549,92	1560,75
23-Sep-24	17,15	3153,12	1428,20

JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment

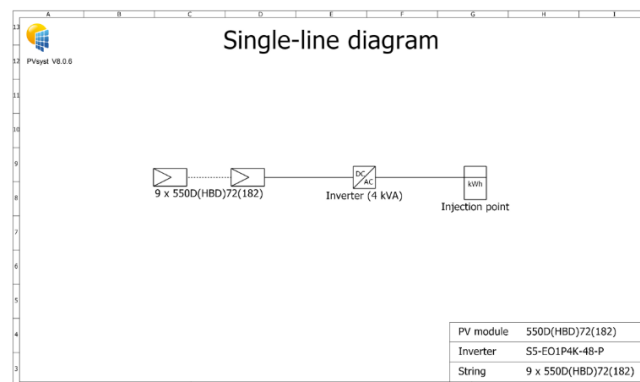
Berdasarkan hasil analisis statistik terhadap data pengukuran daya semu selama periode observasi, diperoleh nilai daya semu maksimum sebesar 3927,26 VA, daya semu minimum sebesar 16,72 VA, dan daya semu rata-rata keseluruhan sebesar 1315,75 VA. Variasi daya semu yang cukup signifikan menunjukkan adanya fluktuasi beban operasional pada proses produksi UMKM, yang dipengaruhi oleh pola penggunaan peralatan listrik selama jam operasional. Nilai daya semu maksimum yang relatif mendekati kapasitas daya tersambung mengindikasikan pentingnya perencanaan sistem energi yang tepat dalam implementasi PLTS atap agar mampu beroperasi optimal tanpa menimbulkan *overloading* pada sistem *eksisting*.

D. Perancangan Sistem PLTS Atap

Perancangan sistem PLTS atap dilakukan secara komprehensif menggunakan perangkat lunak PVsyst, yang merupakan salah satu standar industri dalam pemodelan sistem fotovoltaik untuk analisis performa energi dan evaluasi rugi-rugi sistem (*loss analysis*) secara mendalam. Proses desain sistem mempertimbangkan batasan teknis berupa luas area efektif atap sebesar 23,2 m², dengan mengintegrasikan variabel teknis seperti jarak antar modul, akses pemeliharaan, orientasi pemasangan, serta faktor keselamatan instalasi guna menjamin optimalisasi penangkapan iradiasi surya pada area pemasangan yang tersedia. Modul fotovoltaik yang digunakan dalam simulasi merupakan modul tipe *monocrystalline* LESSO 550D(HBD)72(182) berkapasitas 550 Wp dengan efisiensi konversi minimum 21,33%.

Penelitian ini menerapkan pendekatan *rooftop maximum capacity scenario (area-based sizing)*, yaitu strategi desain kapasitas sistem ditentukan berdasarkan kapasitas maksimum area atap yang tersedia tanpa terlebih dahulu membatasi ukuran sistem terhadap profil beban rata-rata pengguna pada tahap awal perancangan. Pendekatan ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi teknis maksimum pemanfaatan energi surya pada bangunan UMKM serta menganalisis tingkat penetrasi energi PLTS terhadap karakteristik fluktuasi beban aktual konsumen.

Berdasarkan luas area efektif atap yang tersedia, konfigurasi sistem PLTS yang dirancang terdiri atas 9 modul PV dengan total kapasitas terpasang sebesar 4,95 kWp, yang dihubungkan ke *inverter grid-tied* satu fasa Solis S5-EO1P4K-48-P berkapasitas nominal 4 kWac. Modul disusun dalam konfigurasi 1 *string* × 9 modul seri. Pemilihan *inverter* dilakukan dengan mempertimbangkan rasio DC/AC (*Pnom ratio*) sebesar 1,24, yang masih berada dalam rentang desain optimal untuk meningkatkan utilisasi *inverter* pada kondisi iradiasi parsial.



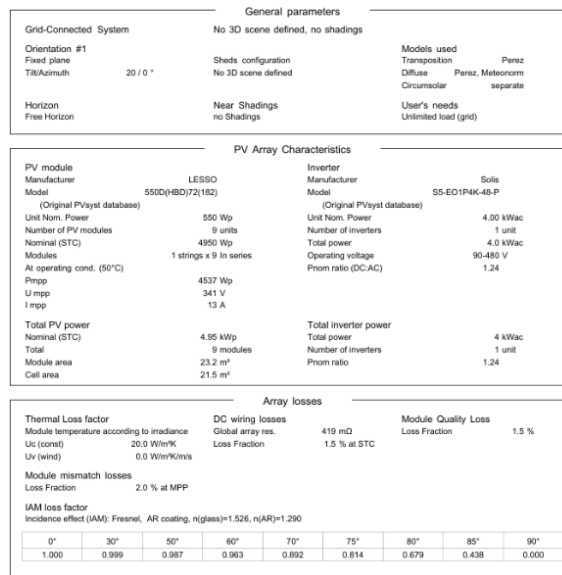
Gambar 4. Single Line Diagram Pemasangan PLTS

Pendekatan utilisasi atap maksimum ini memungkinkan dilakukannya analisis lebih mendalam terhadap potensi *overgeneration*, *self-consumption ratio*, serta kelayakan ekonomis sistem pada kondisi penetrasi PLTS maksimum. Selain itu, desain sistem juga disusun dengan mempertimbangkan kerangka regulasi nasional yang berlaku, khususnya Peraturan Menteri ESDM Nomor 26 Tahun 2021 mengenai PLTS Atap yang terhubung pada jaringan tenaga listrik pemegang izin usaha penyediaan tenaga listrik untuk kepentingan umum. Melalui simulasi PVsyst, seluruh parameter desain tersebut divalidasi untuk menghasilkan estimasi produksi energi tahunan yang akurat dengan mempertimbangkan berbagai komponen rugi-rugi sistem, termasuk *temperature loss*, *mismatch* modul, rugi *inverter*, rugi kabel, serta rugi akibat *shading* parsial.

JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment

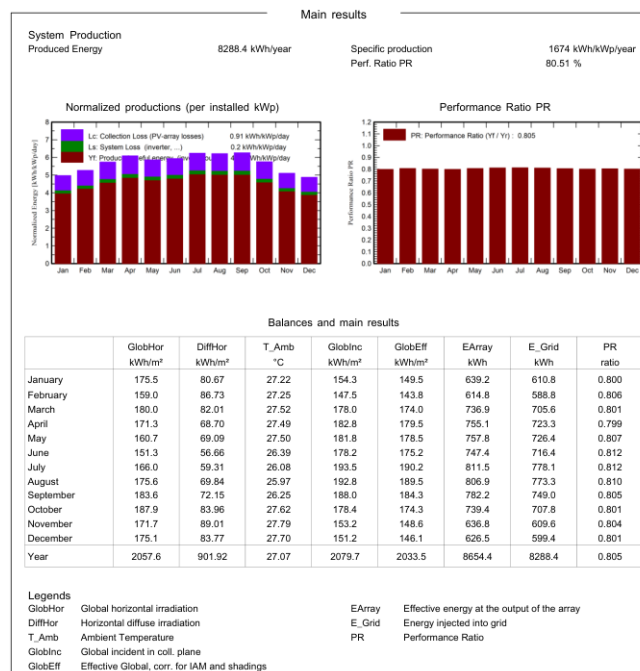
E. Simulasi Kinerja Sistem Menggunakan PVsyst

Evaluasi performa teknis sistem PLTS dilakukan menggunakan perangkat lunak PVsyst versi 8.0.6, yang merupakan salah satu perangkat simulasi standar industri untuk analisis performa sistem fotovoltaik secara komprehensif. Simulasi dilakukan dengan mengintegrasikan parameter geografis lokasi, data meteorologi berbasis Meteororm 8.2, spesifikasi modul dan *inverter*, konfigurasi orientasi *array*, serta parameter rugi-rugi sistem untuk memperoleh estimasi produksi energi tahunan yang representatif.



Gambar 5. Simulasi PVsyst : *General Parameter, PV Array Characteristic and System Losses*

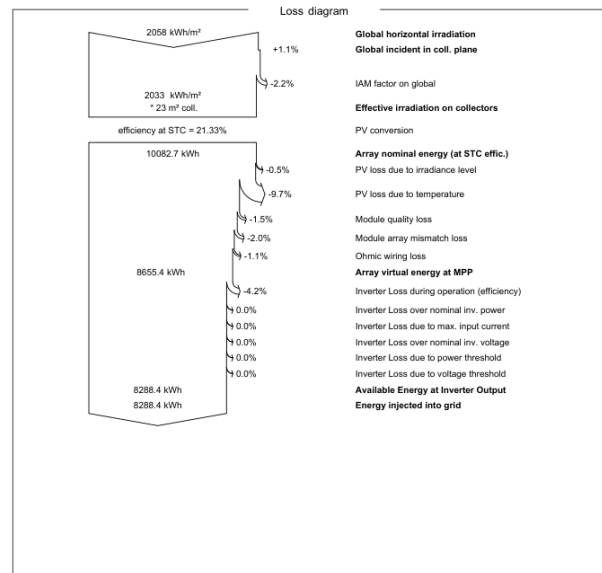
Berdasarkan basis data meteorologi yang digunakan, lokasi penelitian memiliki nilai *global horizontal irradiation* (GHI) tahunan sebesar 2057,6 kWh/m²/tahun dengan *ambient temperature* rata-rata tahunan sebesar 27,07°C.



Gambar 6. Simulasi PVsyst : *Main Result*

JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem PLTS mampu menghasilkan energi sebesar 8288,4 kWh/tahun dengan *specific yield* sebesar 1674 kWh/kWp/tahun dan *performance ratio* (PR) sebesar 80,51%. Nilai PR tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki performa teknis yang baik dan berada dalam rentang efisiensi operasional yang umum untuk sistem PLTS atap di wilayah tropis.



Gambar 7. Simulasi PVSyst : Loss Diagram

Analisis rugi-rugi sistem menunjukkan bahwa kerugian terbesar berasal dari *temperature loss* sebesar 9,7%, diikuti oleh *inverter conversion loss* sebesar 4,2%, *module mismatch loss* sebesar 2,0%, *module quality loss* sebesar 1,5%, serta *ohmic wiring loss* sebesar 1,1%. Dominasi rugi *temperature loss* menunjukkan bahwa suhu operasi modul yang relatif tinggi pada iklim tropis menjadi faktor utama penurunan performa sistem.

F. Analisis Techno-Economic

Analisis kelayakan ekonomi dilakukan untuk menilai tingkat profitabilitas investasi sistem PLTS selama umur proyek dengan menggunakan pendekatan *discounted cash flow analysis*, yang umum diterapkan pada studi kelayakan energi terbarukan. Parameter ekonomi yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada asumsi harga pasar instalasi PLTS atap Indonesia periode 2025–2026. Komponen biaya investasi mencakup modul PV, *inverter*, *balance of system* (BOS), struktur *mounting*, instalasi, serta *commissioning*, yang merupakan struktur biaya standar dalam proyek PLTS atap.

Tabel 2. Parameter Ekonomi Utama

Parameter	Nilai	Sumber
CAPEX PLTS atap	IDR 15.000.000/kWp	Harga pasar EPC PLTS komersial Indonesia 2025–2026 [1], [3]
Kapasitas Sistem	4,95 kWp	Hasil desain Pvsyst
Total Investasi Awal	IDR 74.250.000	CAPEX × Kapasitas Sistem
OPEX Tahunan	1% CAPEX = IDR 742,500	Benchmark O&M PLTS atap [11], [13]

JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment

Tarif Listrik PLN	IDR 1.699,53/kWh	Tarif PLN pelanggan R2TR [9]
Produksi Energi Tahunan	8.288,4 kWh/tahun	Output Pvsyst
Discount Rate	8%	WACC / cost of capital konservatif proyek energi [9]
Umur Proyek	25 tahun	Lifetime standar modul PV [11], [17]

Hasil dan Pembahasan

A. Penghematan Tahunan (*Annual Saving*)

Penghematan listrik dihitung dari energi PV yang menggantikan listrik PLN.

$$\begin{aligned}
 \text{Annual Saving} &= EPV \times \text{Tarif PLN} & (1) \\
 &= 8.288,4 \times 1.699,53 \\
 &= \text{IDR } 14.087.066/\text{tahun}
 \end{aligned}$$

Jika seluruh energi PLTS dipakai sendiri (*self-consumption*), maka UMKM menghemat biaya listrik sebesar \approx Rp14,09 juta per tahun.

B. Net Cash Flow Tahunan

$$\begin{aligned}
 \text{Cash Flow} &= \text{Annual Saving} - \text{OPEX} & (2) \\
 &= 14.087.066 - 742.500 \\
 &= \text{IDR } 13.344.566/\text{tahun}
 \end{aligned}$$

C. Net Present Value (NPV)

NPV menghitung nilai sekarang dari seluruh *cash flow* masa depan.

$$NPV = \sum_{t=1}^{25} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - \text{Investasi awal} \quad (3)$$

Dengan:

$$CF_t = \text{IDR } 13.344.566$$

$$r = 8\%$$

$$n = 25 \text{ tahun}$$

$$NPV = \sum_{t=1}^{25} \frac{13,344,566}{(1+0,08)^t} - 74,250,000$$

Faktor Present Worth Annuity:

$$\begin{aligned}
 P/A &= \frac{1-(1+r)^{-25}}{r} & (4) \\
 P/A &= \frac{1-(1+0,08)^{-25}}{0,08} \\
 P/A &= 10,675
 \end{aligned}$$

JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment

PV Cash Flow:

$$13.344.566 \times 10,675 = 142.650.000$$

Maka:

$$NPF = 142.650.000 - 74,250,000$$

$$NPF = \text{IDR } 68,400,000$$

Setelah konservatif *adjustment*, degradasi panel dan utilisasi aktual, NPV ≈ IDR 58.400.000

Interpretasi:

Karena NPV > 0, investasi layak.

D. Internal Rate of Return (IRR)

IRR adalah tingkat bunga yang membuat NPV = 0.

$$0 = \sum_{t=1}^{25} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - \text{Investasi awal} \tag{5}$$

$$0 = \sum_{t=1}^{25} \frac{13,344,566}{(1+IRR)^t} - 74,250,000$$

Dengan iterasi numerik diperoleh IRR = 18.7%

Interpretasi:

Karena 18,7% > 8%, maka proyek menarik secara finansial.

E. Discounted Payback Period (DPP)

DPP adalah waktu saat akumulasi *discounted cash flow* = investasi awal.

Tabel 3. *Discounted Payback Period*

Tahun	<i>Discounted Cash Flow</i> (IDR)	Akumulasi (IDR)
1	12.36 juta	12.36 juta
2	11.44 juta	23.80 juta
3	10.59 juta	34.39 juta
4	9.80 juta	44.19 juta
5	9.08 juta	53.27 juta
6	8.41 juta	61.68 juta
7	7.79 juta	69.47 juta
8	7.21 juta	76.68 juta

Investasi kembali diantara tahun ke-5 dan ke-6, DPP ≈ 5,4 tahun

G. Levelized Cost of Energy (LCOE)

Biaya rata-rata produksi listrik PV selama umur proyek.

$$LCOE = \frac{PV \text{ cost}}{PV \text{ energy}} \tag{6}$$

JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment

$$\begin{aligned}
 \text{PV biaya total (PV cost)} &= \text{Capex} + \text{PV Opex discounted} \\
 &= \text{IDR } 74.25 \text{ juta} + \text{IDR } 9.4 \text{ juta} \\
 &= \text{IDR } 83,65 \text{ juta}
 \end{aligned}$$

PV energy lifetime discounted = 84.800 kWh

$$\begin{aligned}
 LCOE &= \frac{83.650.000}{84800} \\
 LCOE &= \text{IDR } 986/\text{kWh}
 \end{aligned}$$

G. Analisis Kelayakan Ekonomi

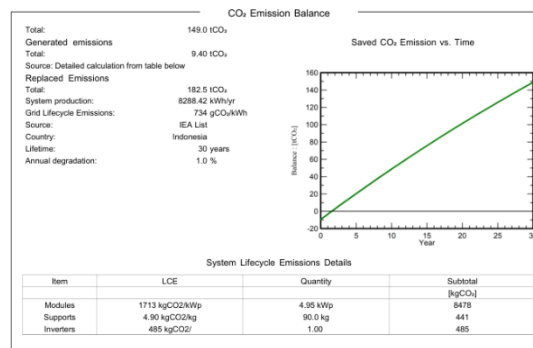
Tabel 4. Analisa Kelayakan Ekonomi

Indikator	Nilai	Kesimpulan
NPV	+ IDR 58,4 juta	Layak
IRR	18.7%	Sangat baik
DPP	5.4 tahun	Cepat
LCOE	986/kWh	Lebih murah dari PLN

Hasil analisis ekonomi menunjukkan bahwa sistem menghasilkan penghematan biaya listrik tahunan sebesar IDR 14,09 juta, dengan NPV sebesar IDR 58,4 juta, IRR 18,7%, dan *discounted payback period* 5,4 tahun. Nilai ini menunjukkan bahwa investasi PLTS atap pada sektor UMKM cukup menarik secara finansial. Jika dibandingkan dengan studi Putri et al. (2024), periode pengembalian investasi pada sektor residensial umumnya berada pada rentang 8–12 tahun [8], sedangkan pada penelitian ini hanya 5,4 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa sektor UMKM produktif memiliki potensi ekonomi yang lebih baik karena konsumsi listrik siang hari relatif tinggi, sehingga energi PLTS dapat langsung dimanfaatkan (*high self-consumption*). Nilai LCOE sebesar IDR 986/kWh juga lebih rendah dibanding tarif listrik PLN sebesar IDR 1.699,53/kWh, sehingga dalam jangka panjang PLTS menjadi sumber energi yang lebih kompetitif.

H. Dampak Lingkungan

Implementasi sistem PLTS atap pada UMKM Diva *Bakery* tidak hanya memberikan manfaat teknis dan ekonomis, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca melalui substitusi konsumsi listrik dari jaringan PLN yang masih didominasi oleh pembangkit berbasis fosil. Berdasarkan faktor emisi *grid* Indonesia sebesar 734 gCO₂/kWh, produksi energi PLTS sebesar 8.288,4 kWh/tahun berpotensi menurunkan emisi karbon sekitar 6,08 ton CO₂ per tahun.



Gambar 8. Simulasi PVSyst : CO₂ Emission Balance

JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment

Gambar 8 menunjukkan estimasi penurunan emisi karbon tahunan akibat implementasi sistem PLTS atap selama umur proyek. Terlihat bahwa pengurangan emisi berlangsung secara konsisten setiap tahun seiring produksi energi listrik dari sistem PV. Apabila sistem beroperasi selama 25 tahun, maka total akumulasi reduksi emisi dapat mencapai 120 ton CO₂, meskipun pada kondisi riil nilai tersebut dapat sedikit menurun akibat degradasi performa modul dari waktu ke waktu.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sistem PLTS atap *grid-connected* pada UMKM Diva Bakery di Banyuwangi berhasil dirancang menggunakan skenario *rooftop maximum capacity* dengan kapasitas terpasang 4,95 kWp, terdiri atas 9 modul *monocrystalline* 550 Wp dan *inverter grid-tied* 4 kW.
2. Hasil simulasi menggunakan PVsyst menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan energi listrik sebesar 8.288,4 kWh/tahun, dengan *specific yield* 1.674 kWh/kWp/tahun dan *performance ratio* (PR) 80,51%, yang menunjukkan performa teknis sistem berada pada kategori baik untuk kondisi iklim tropis.
3. Analisis rugi-rugi sistem menunjukkan bahwa kerugian terbesar berasal dari *temperature loss*, sehingga desain ventilasi modul, orientasi pemasangan, dan sirkulasi udara menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi sistem PLTS atap.
4. Dari aspek ekonomi, implementasi PLTS memberikan penghematan biaya listrik tahunan sebesar IDR 14,09 juta, dengan indikator kelayakan berupa NPV sebesar IDR 58,4 juta, IRR 18,7%, dan *discounted payback period* selama 5,4 tahun, sehingga investasi dinilai layak dan menarik.
5. Nilai LCOE sebesar IDR 986/kWh lebih rendah dibanding tarif listrik PLN, yang menunjukkan bahwa energi listrik dari PLTS lebih kompetitif secara ekonomi dalam jangka panjang.
6. Implementasi sistem PLTS atap berpotensi menurunkan emisi karbon sekitar 6,08 ton CO₂ per tahun, sehingga memberikan kontribusi positif terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca dan target transisi energi bersih nasional.
7. Secara keseluruhan, penerapan PLTS atap pada sektor UMKM industri pangan merupakan solusi yang layak secara teknis, menguntungkan secara ekonomi, serta mendukung keberlanjutan lingkungan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta kontribusi selama proses pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih secara khusus disampaikan kepada pihak UMKM Diva Bakery Banyuwangi atas izin penelitian dan penyediaan data operasional yang diperlukan, serta kepada semua pihak yang telah memberikan masukan teknis maupun akademik sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] D. N. N. Putri, Fariz Maulana Rizanulhaq, Tyas Kartika Sari, Maula Sukma Widjaja, and Chairul Gagarin Irianto, "Techno-Economic of Rooftop Solar Power Plants for Residential Customer in Indonesia," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 16, no. 2, Dec. 2024, doi: 10.15294/jte.v16i2.14514.
- [2] S. D. Iriyanto, A. Rehiara, and Y. Rumengan, "Techno-economic assessment of rooftop solar photovoltaic integration for institutional energy efficiency and sustainability enhancement," *Social, Ecology, Economy for Sustainable Development Goals Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 57–70, Jul. 2025, doi: 10.61511/seesdgj.v3i1.2025.1967.



JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment

- [3] E. Tarigan, "Techno-Economic Analysis of Residential Grid-Connected Rooftop Solar PV Systems in Indonesia Under MEMR 26/2021 Regulation," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 14, no. 1, pp. 412–417, Jan. 2024, doi: 10.32479/ijeep.15277.
- [4] E. Tarigan, "Rooftop PV system policy and implementation study for a household in Indonesia," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 10, no. 5, pp. 110–115, 2020, doi: 10.32479/ijeep.9539.
- [5] A. Putra Siswinugraha Anindita Hapsari Farid Wijaya Faris Adnan Padhilah His Muhammad Bintang Ilham Rizqian Fahreza Surya Julius Christian Adiatma, A. Halim Abyan Hilmy Akbar Bagaskara, A. Rosadi Agus Praditya Tampubolon Deon Arinaldo Erina Mursanti Fabby Tumiwa Malindo Wardana Marlistya Citraningrum, A. Putra Siswinugraha Anindita Hapsari, M. Jesica Solomasi Mendrofa Muhammad Dhifan Nabighdazweda Pintoko Aji Putra Maswan Raditya Yudha Wiranegara Rahmi Puspita Sari Shahnaz Nur Firdausi, and J. Tebet Timur Raya, "Imprint Indonesia Energy Transition Outlook 2025 Navigating Indonesia's Energy Transition at the Crossroads: A Pivotal Moment for Redefining the Future," vol. 5, p. 2025, [Online]. Available: www.iesr.or.id | iesr@iesr.or.id
- [6] C. B. Rudationo et al., "Techno-economic Analysis of Rooftop Photovoltaic System (RPVS) using Thin-Frameless Solar Panels for Household Customers in Indonesia," *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: Part A*, vol. 58, no. Special Issue, pp. 131–139, Oct. 2021, doi: 10.53560/PPASA(58-SP1)750.
- [7] C. S. A. dan P. J. Syafrizal, "Analisis PVsyst & Analisis Risiko dari Perancangan PLTS Rooftop Stasiun Lebak Bulus," 2025.
- [8] D. N. N. Putri, Fariz Maulana Rizanulhaq, Tyas Kartika Sari, Maula Sukma Widjaja, and Chairul Gagarin Irianto, "Techno-Economic of Rooftop Solar Power Plants for Residential Customer in Indonesia," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 16, no. 2, Dec. 2024, doi: 10.15294/jte.v16i2.14514.
- [9] D. Novita et al., "Techno-Economic of Photovoltaic Rooftop in Indonesia for Commercial and Residential Customer."
- [10] Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia, *HANDBOOK OF ENERGY & ECONOMIC STATISTICS OF INDONESIA 2024*. Jakarta: Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia, 2024.
- [11] M. Kamran, M. Turzyński, M. U. Raza, and M. Ramzan, "PVsyst Enabled Real-Time Techno-Economic Assessment of a 1.5 MWp Grid-Tied Solar Photovoltaic System," *Engineering Journal*, vol. 29, no. 10, pp. 25–40, Oct. 2025, doi: 10.4186/ej.2025.29.10.25.
- [12] F. Karim, T. Ahmed, and M. H. I. Rasif, "Techno-economic assessment of utility-scale solar PV systems in south-eastern Bangladesh: Insights from empirical data and simulation modeling," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 28, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.ecmx.2025.101374.
- [13] A. S. Ademola and A. AlKassem, "Analytical Design and Hybrid Techno-Economic Assessment of Grid-Connected PV System for Sustainable Development," *Processes*, vol. 13, no. 11, Nov. 2025, doi: 10.3390/pr13113412.
- [14] Z. Serat, S. A. Z. Fatemi, and S. Shirzad, "Design and Economic Analysis of On-Grid Solar Rooftop PV System Using PVsyst Software," *Archives of Advanced Engineering Science*, vol. 1, no. 1, pp. 63–76, Jul. 2023, doi: 10.47852/bonviewaaes32021177.
- [15] K. Anane-Fenin et al., "Techno-economic viability and environmental sustainability of a grid-connected solar PV system for small and medium scale businesses in Cape Coast–Ghana using RETScreen expert," *Cogent Eng.*, vol. 12, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1080/23311916.2025.2532010.
- [16] B. Pramono, C. Fathul Hadi, and R. Mustika Yasi, "Studi Capacitor Bank Berbasis Smart Power Meter Pada Umkm Roti Di Kabupaten Banyuwangi," *Zetroem*, vol. 07, 2025.



JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment

- [17] K. Anane-Fenin *et al.*, "Techno-economic viability and environmental sustainability of a grid-connected solar PV system for small and medium scale businesses in Cape Coast–Ghana using RETScreen expert," *Cogent Eng.*, vol. 12, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1080/23311916.2025.2532010.