



Analisis Teknis dan Evaluasi Ekonomi PLTS Atap 1,75 MWp Menggunakan Metode Levelized Cost of Energy (LCOE) pada PT Polytama Propindo

Geriandi*, Agus Adhi Nugroho

Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

Email: Geriandi.gh@gmail.com*, agusadhi@unissula.ac.id

Keywords:

*Rooftop solar PV;
techno-economic;
levelized cost of energy (LCOE);
industrial electrical system;
penetration limit evaluation.*

Abstract

The implementation of Rooftop Solar Power Plants (PLTS) in the industrial sector is one of the efforts to increase the utilization of renewable energy and reduce electricity costs. However, determining the capacity of the Rooftop Solar Power Plant needs to consider the condition of the electrical system and its economic feasibility so that the applied capacity is in accordance with the characteristics of customer energy consumption. This study aims to analyze the technical and economic aspects and determine the penetration capacity of the 1.75 MWp Rooftop Solar Power Plant in the PT Polytama Propindo electricity system using the Levelized Cost of Energy (LCOE) method. The study uses a quantitative approach based on simulation and analysis of electricity consumption data. The analysis of the PLTS energy production was carried out using PVsyst, while the economic evaluation was carried out using the LCOE method by considering investment costs, operation and maintenance costs, project life, discount rate, and energy production during the project life. The results of the study show that the PLTS energy production based on the PVsyst simulation reached 2,928.6 MWh/year. From the economic aspect, the LCOE value was obtained at Rp739.76/kWh, lower than the PLN electricity tariff of Rp1,035.78/kWh, so that the energy produced by the PLTS has a more competitive cost compared to electricity from the PLN network. The results of the savings evaluation also showed a reduction in energy supplied from the PLN network of 244,050 kWh/month and a decrease in electricity costs in accordance with the PLTS energy utilized by the system. Based on simultaneous technical and economic evaluations, the Rooftop PLTS capacity of 2,028.64 kWp (1.75 MWp) was determined as the penetration capacity evaluated in the PT Polytama Propindo electricity system.

Kata Kunci:

*PLTS atap;
teknologi-ekonomi;
levelized cost of energy (LCOE);
sistem kelistrikan industri;
evaluasi batas penetrasi.*

Abstrak

Implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap pada sektor industri merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan dan mengurangi biaya energi listrik. Namun, penentuan kapasitas PLTS Atap perlu mempertimbangkan kondisi sistem kelistrikan dan kelayakan ekonominya agar kapasitas yang diterapkan sesuai dengan karakteristik konsumsi energi pelanggan. Penelitian ini bertujuan menganalisis aspek teknis dan ekonomi serta menentukan kapasitas penetrasi PLTS Atap 1,75 MWp pada sistem kelistrikan PT Polytama Propindo menggunakan metode Levelized Cost of Energy (LCOE). Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi dan analisis data konsumsi energi listrik. Analisis produksi energi PLTS dilakukan menggunakan PVsyst, sedangkan evaluasi ekonomi dilakukan menggunakan metode LCOE dengan mempertimbangkan biaya investasi, biaya operasi dan pemeliharaan, umur proyek, tingkat diskonto, serta produksi energi selama umur proyek. Hasil penelitian

menunjukkan bahwa produksi energi PLTS berdasarkan simulasi PVsyst mencapai 2.928,6 MWh/tahun. Dari aspek ekonomi, diperoleh nilai LCOE sebesar Rp739,76/kWh, lebih rendah dibandingkan tarif listrik PLN sebesar Rp1.035,78/kWh, sehingga energi yang dihasilkan PLTS memiliki biaya yang lebih kompetitif dibandingkan energi listrik dari jaringan PLN. Hasil evaluasi penghematan juga menunjukkan adanya pengurangan energi yang dipasok dari jaringan PLN sebesar 244.050 kWh/bulan dan penurunan biaya listrik sesuai dengan energi PLTS yang dimanfaatkan sistem. Berdasarkan evaluasi teknis dan ekonomi secara simultan, kapasitas PLTS Atap 2.028,64 kWp (1,75 MWp) ditetapkan sebagai kapasitas penetrasi yang dievaluasi pada sistem kelistrikan PT Polytama Propindo.

PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi listrik pada sektor industri merupakan konsekuensi langsung dari pertumbuhan aktivitas produksi, ekspansi kapasitas, serta meningkatnya kompleksitas operasional perusahaan. Ketergantungan industri terhadap pasokan listrik dari jaringan utilitas tidak hanya menimbulkan beban biaya operasional yang signifikan, tetapi juga meningkatkan risiko terhadap fluktuasi tarif energi dan gangguan pasokan. Dalam konteks global, transisi menuju energi terbarukan telah mendorong sektor industri untuk mengembangkan sumber energi listrik alternatif yang dapat dimanfaatkan secara langsung pada fasilitasnya (Elphick, 2025; Fatima et al., 2020; Masters, 2013; Messenger & Abtahi, 2017; Nour, 2020). Salah satu teknologi yang semakin berkembang pesat adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap, yang memungkinkan konversi energi matahari menjadi energi listrik dan pemanfaatannya secara langsung untuk memenuhi sebagian kebutuhan energi pelanggan industri. Perkembangan teknologi fotovoltaik ini juga didukung oleh penurunan biaya pembangkitan energi surya yang signifikan; International Renewable Energy Agency (IRENA) melaporkan bahwa levelized cost of electricity (LCOE) global untuk pembangkit listrik tenaga surya fotovoltaik skala utilitas mencapai rata-rata tertimbang USD 0,043/kWh pada tahun 2024, menunjukkan semakin kompetitifnya teknologi surya sebagai sumber pembangkitan listrik baru (Baroni & Bruno, 2026).

Pemanfaatan PLTS pada sektor industri memiliki karakteristik yang berbeda secara mendasar dibandingkan sektor rumah tangga maupun komersial. Perbedaan ini tidak hanya terletak pada skala kebutuhan energi yang jauh lebih besar, tetapi juga pada pola konsumsi listrik yang relatif kompleks, kontinu, dan terikat pada proses produksi (Green, 1982; International Electrotechnical Commission, 2021; Marion, 2005; Newnan et al., 2017; Rodríguez-Martínez & Rodríguez-Monroy, 2021). Penelitian mengenai PLTS Atap di Indonesia menunjukkan bahwa ukuran sistem, tingkat pemanfaatan energi, tarif listrik, serta parameter investasi berpengaruh signifikan terhadap keekonomian sistem (International Renewable Energy Agency, 2025). Meskipun demikian, penerapan PLTS Atap pada sistem kelistrikan industri tidak dapat hanya ditinjau berdasarkan besarnya energi yang dapat dihasilkan. Integrasi sumber pembangkitan terdistribusi seperti PLTS dapat mengubah pola aliran daya, memengaruhi profil tegangan, meningkatkan arus hubung singkat, serta berpotensi menimbulkan distorsi harmonisa pada sistem. Oleh karena itu, kapasitas PLTS perlu disesuaikan dengan karakteristik sistem dan profil konsumsi energi agar tetap berada dalam batas operasi yang aman dan andal (International Renewable Energy Agency, 2023).

Selain aspek teknis, aspek ekonomi merupakan faktor determinan dalam menentukan keputusan implementasi PLTS Atap pada sektor industri. Investasi PLTS memerlukan biaya awal yang meliputi pengadaan modul fotovoltaik, inverter, struktur pendukung, instalasi, sistem proteksi, serta biaya operasi dan pemeliharaan selama umur proyek (Duffie & Beckman, 2013; Ferede Abebe et al., 2021; Short et al., 1995; Smain & Fatiha, 2026). Evaluasi ekonomi yang komprehensif perlu mempertimbangkan keseluruhan biaya dan energi yang dihasilkan selama masa operasi pembangkit. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengevaluasi biaya energi pembangkit adalah Levelized Cost of Energy (LCOE), yang menyatakan biaya rata-rata energi listrik yang dihasilkan selama umur proyek dengan mempertimbangkan biaya investasi, biaya operasi dan pemeliharaan, tingkat diskonto, serta produksi energi (Blank & Tarquin, 2018; Branker et al., 2011; Fehr, 2016; Gönen, 2015; Illerhaus & Verstege, 2000; International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, 2017). International Energy Agency (IEA) dalam laporan World Energy Outlook 2003 (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, 2024) memproyeksikan bahwa tenaga surya fotovoltaik dan angin akan menyumbang porsi terbesar penambahan kapasitas energi terbarukan karena biaya pembangkitannya yang semakin kompetitif. Dengan demikian, LCOE menjadi instrumen yang relevan untuk menilai kelayakan ekonomi PLTS Atap pada sistem kelistrikan industri (Galevien et al., 2025; Khan & Rana, 2019; Najafi et al., 2025; Santoso, 2026).

PT Polytama Propindo merupakan perusahaan industri petrokimia yang dalam operasionalnya membutuhkan pasokan energi listrik yang andal dan kontinu. Sistem kelistrikan PT Polytama Propindo memperoleh pasokan listrik dari PT PLN (Persero) melalui jaringan tegangan menengah 20 kV dengan daya tersambung sebesar 15.280 kVA. Dalam upaya meningkatkan efisiensi energi dan pemanfaatan energi terbarukan, perusahaan merencanakan implementasi PLTS Atap on-grid dengan kapasitas inverter sebesar 1,75 MWac dan kapasitas modul fotovoltaik sebesar 2.028,64 kWp (2,02864 MWp). Perencanaan ini menjadikan PT Polytama Propindo sebagai studi kasus yang relevan untuk mengevaluasi pemanfaatan PLTS Atap pada sistem kelistrikan industri. Berdasarkan hasil simulasi PVsyst yang digunakan dalam penelitian, sistem PLTS yang direncanakan menghasilkan energi listrik sekitar 2.928,6 MWh/tahun, yang menjadi salah satu parameter utama dalam evaluasi ekonomi karena besarnya energi yang dihasilkan akan memengaruhi biaya energi rata-rata selama umur proyek. Permasalahan utama yang muncul adalah bahwa kapasitas PLTS yang besar belum tentu secara otomatis menunjukkan tingkat penetrasi yang paling sesuai bagi sistem kelistrikan industri. Kapasitas pembangkit perlu dievaluasi berdasarkan kemampuan sistem dalam memanfaatkan energi yang dihasilkan serta manfaat ekonomi yang diperoleh. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis aspek teknis dan mengevaluasi aspek ekonomi implementasi PLTS Atap berkapasitas 1,75 MWp pada sistem kelistrikan PT Polytama Propindo menggunakan metode LCOE sebagai indikator biaya energi. Nilai LCOE selanjutnya dibandingkan dengan tarif listrik PLN untuk mengetahui keunggulan biaya energi PLTS, kemudian dikaitkan dengan pengurangan konsumsi energi dari jaringan PLN serta estimasi penghematan biaya listrik.

Kajian yang menghubungkan kondisi operasi sistem kelistrikan dengan evaluasi ekonomi dalam menentukan kapasitas penetrasi PLTS Atap pada sistem kelistrikan industri masih relatif terbatas. Penelitian-penelitian sebelumnya cenderung berfokus pada aspek teknis

atau aspek ekonomi secara terpisah, tanpa mengintegrasikan keduanya dalam kerangka evaluasi kapasitas penetrasi yang komprehensif. Oleh karena itu, keaslian penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan terintegrasi antara kondisi sistem kelistrikan, produksi energi PLTS, dan evaluasi biaya energi menggunakan LCOE dalam menentukan kapasitas penetrasi PLTS Atap 1,75 MWp pada sistem kelistrikan PT Polytama Propindo. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai kelayakan teknis dan ekonomi PLTS Atap pada sistem kelistrikan industri.

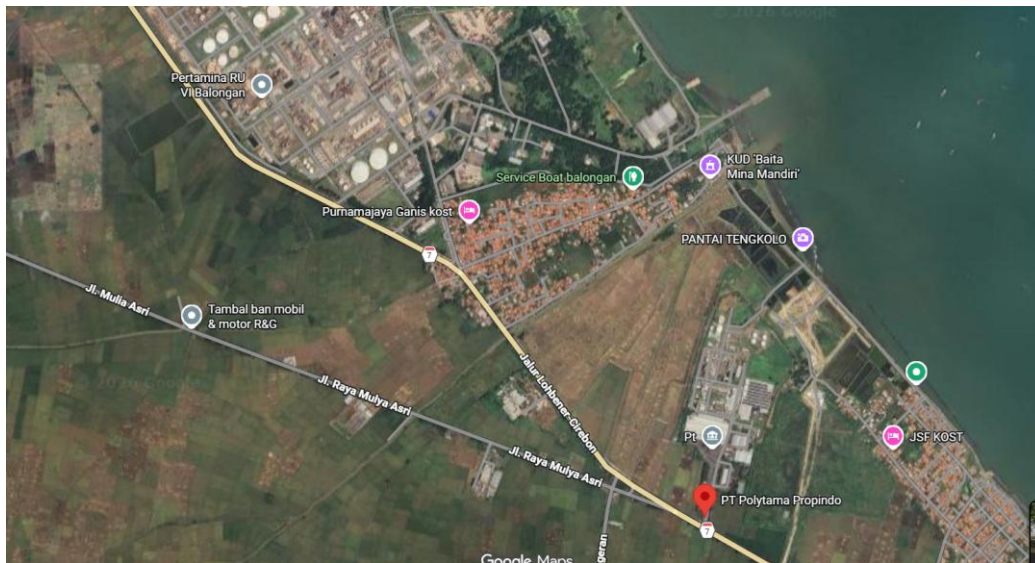
Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi sebagai dasar pengambilan keputusan bagi implementasi PLTS Atap pada sistem kelistrikan industri, khususnya dalam menentukan kapasitas yang tidak hanya dapat diterapkan secara teknis, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi melalui biaya energi yang lebih kompetitif dan pengurangan biaya listrik. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi bagi perusahaan industri lain yang memiliki karakteristik serupa dalam merencanakan implementasi PLTS Atap, serta memperkaya literatur mengenai evaluasi tekno-ekonomi PLTS Atap pada sektor industri di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan studi kasus (case study) pada rencana implementasi PLTS Atap berkapasitas 1,75 MWp pada sistem kelistrikan PT Polytama Propindo. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian ini berfokus pada pengukuran, simulasi, dan analisis data numerik yang berkaitan dengan parameter teknis sistem tenaga listrik dan parameter ekonomi investasi. Metode yang digunakan adalah analisis teknis dan evaluasi ekonomi, yaitu pendekatan yang mengintegrasikan evaluasi kinerja sistem tenaga listrik dengan analisis kelayakan ekonomi investasi. Analisis teknis dilakukan melalui simulasi Load Flow Analysis, Short Circuit Analysis, dan Harmonic Analysis, sedangkan evaluasi ekonomi dilakukan menggunakan metode Levelized Cost of Energy (LCOE) untuk menentukan biaya pembangkitan energi listrik selama umur proyek. Hasil analisis teknis dan ekonomi selanjutnya diintegrasikan untuk mengevaluasi kapasitas penetrasi PLTS Atap dengan mempertimbangkan aspek keandalan sistem serta kelayakan ekonomi investasi. Pendekatan terintegrasi ini dipilih karena penetapan kapasitas penetrasi PLTS Atap pada sistem kelistrikan industri tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan satu aspek saja, melainkan memerlukan pertimbangan simultan terhadap kondisi operasi sistem dan manfaat ekonomi yang dihasilkan.

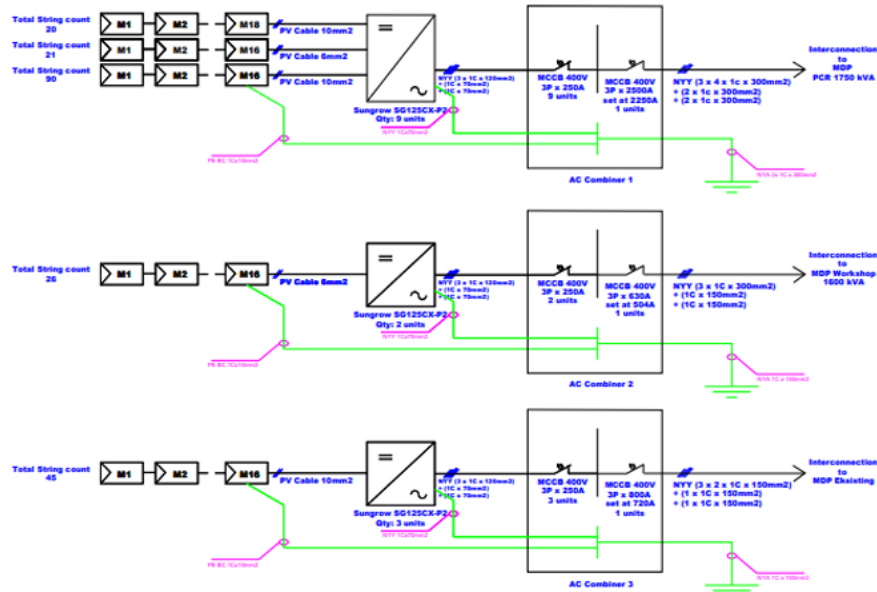
Penelitian dilaksanakan di PT Polytama Propindo, perusahaan industri petrokimia dengan produk utama polypropylene, yang berlokasi di Jalan Raya Juntinyuat KM. 13, Desa Limbangan, Kecamatan Juntinyuat, Kabupaten Indramayu, Provinsi Jawa Barat. Perusahaan ini dipilih sebagai objek penelitian karena memiliki sistem kelistrikan industri tegangan menengah 20 kV serta rencana implementasi PLTS Atap berkapasitas 1,75 MWp, sehingga representatif untuk mengevaluasi pengaruh penetrasi PLTS terhadap aspek teknis dan ekonomi sistem kelistrikan industri. Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh parameter teknis dan ekonomi yang berkaitan dengan sistem kelistrikan PT Polytama Propindo dan rencana implementasi PLTS Atap, meliputi data konsumsi energi listrik, data spesifikasi peralatan kelistrikan, data radiasi matahari, data biaya investasi, data biaya operasi dan pemeliharaan, serta parameter ekonomi lainnya. Sampel penelitian ditentukan menggunakan teknik purposive

sampling, yaitu pemilihan sampel berdasarkan pertimbangan tertentu yang sesuai dengan tujuan penelitian. Sampel yang digunakan meliputi data konsumsi energi listrik bulanan PT Polytama Propindo selama periode pengamatan, data spesifikasi teknis PLTS Atap yang direncanakan, data radiasi matahari lokasi penelitian, serta parameter ekonomi yang relevan dengan evaluasi LCOE. Teknik purposive sampling dipilih karena penelitian ini memerlukan data yang spesifik dan sesuai dengan karakteristik sistem kelistrikan industri yang dikaji, sehingga tidak semua data yang tersedia dapat digunakan secara langsung. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian PT Polytama Propindo, Kabupaten Indramayu, Jawa Barat
Sumber: Google Maps dan hasil pengolahan peneliti, 2026.

PLTS Atap yang menjadi objek penelitian memiliki kapasitas terpasang 2.028,64 kWp pada sisi DC dengan kapasitas inverter 1.750 kWac, terdiri atas 3.272 modul surya Trina Solar Vertex N berkapasitas 620 Wp per unit dan 14 unit inverter Sungrow SG125CX-P2 berkapasitas 125 kW per unit, dioperasikan secara on-grid tanpa sistem penyimpanan energi (battery energy storage system). Energi listrik yang dihasilkan dirancang untuk memenuhi sebagian kebutuhan energi pada beban non-produksi PT Polytama Propindo melalui skema self-consumption, sedangkan beban produksi utama tetap memperoleh pasokan dari jaringan PLN. Konfigurasi umum sistem PLTS Atap, mulai dari rangkaian modul fotovoltaik hingga titik interkoneksi ke sistem kelistrikan industri, ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Konfigurasi Sistem PLTS Atap PT Polytama Propindo

Sumber: Hasil desain dan simulasi sistem PLTS Atap menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Instrumen penelitian yang digunakan dalam studi ini terdiri atas perangkat lunak simulasi dan perangkat analisis data. Perangkat lunak PVsyst digunakan untuk mensimulasikan produksi energi PLTS berdasarkan data radiasi matahari, orientasi modul, dan spesifikasi teknis sistem. Perangkat lunak ETAP atau perangkat lunak analisis sistem tenaga listrik lainnya digunakan untuk melakukan Load Flow Analysis, Short Circuit Analysis, dan Harmonic Analysis guna mengevaluasi kinerja sistem kelistrikan setelah integrasi PLTS. Perangkat lunak Microsoft Excel digunakan untuk mengolah data ekonomi dan menghitung nilai LCOE berdasarkan parameter yang telah ditetapkan. Uji validitas dan reliabilitas dalam penelitian ini dilakukan melalui triangulasi data dan verifikasi silang (cross-check) antara data simulasi dengan data aktual sistem kelistrikan yang tersedia. Validitas data konsumsi energi listrik diverifikasi melalui rekening listrik PLN dan data pencatatan internal perusahaan, sedangkan validitas data radiasi matahari diverifikasi melalui database meteorologi yang relevan dan data pengukuran lokasi jika tersedia. Reliabilitas hasil simulasi diuji dengan membandingkan hasil simulasi PVsyst dengan data produksi energi aktual dari PLTS sejenis yang telah beroperasi, serta dengan melakukan analisis sensitivitas terhadap parameter-parameter kunci yang memengaruhi hasil perhitungan LCOE.

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui studi dokumentasi, observasi, dan simulasi. Studi dokumentasi dilakukan dengan mengumpulkan data sekunder dari PT Polytama Propindo, meliputi data konsumsi energi listrik bulanan, data spesifikasi peralatan kelistrikan, data tarif listrik PLN, serta data rencana implementasi PLTS Atap. Observasi dilakukan untuk memahami kondisi aktual sistem kelistrikan dan tata letak instalasi PLTS Atap yang direncanakan. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak PVsyst dan perangkat lunak analisis sistem tenaga listrik untuk memperoleh data produksi energi PLTS dan parameter teknis sistem kelistrikan setelah integrasi PLTS. Prosedur penelitian dilaksanakan dalam beberapa tahap yang sistematis. Tahap pertama adalah pengumpulan data

dan informasi yang relevan dengan penelitian. Tahap kedua adalah simulasi produksi energi PLTS menggunakan PVsyst berdasarkan data radiasi matahari dan spesifikasi teknis sistem. Tahap ketiga adalah analisis teknis sistem kelistrikan menggunakan perangkat lunak analisis sistem tenaga listrik untuk mengevaluasi profil tegangan, pembebanan peralatan, arus hubung singkat, dan distorsi harmonisa. Tahap keempat adalah evaluasi ekonomi menggunakan metode LCOE dengan mempertimbangkan biaya investasi, biaya operasi dan pemeliharaan, tingkat diskonto, umur proyek, dan produksi energi tahunan. Tahap kelima adalah integrasi hasil analisis teknis dan ekonomi untuk menentukan kapasitas penetrasi PLTS Atap yang dievaluasi. Tahap keenam adalah analisis penghematan biaya listrik dan distribusi pemanfaatan energi PLTS pada beban non-produksi. Tahap ketujuh adalah penarikan kesimpulan dan pemberian saran untuk penelitian selanjutnya.

Variabel penelitian yang digunakan dalam studi ini dikelompokkan menjadi dua kategori utama, yaitu variabel teknis dan variabel ekonomi. Pada kelompok variabel teknis, parameter yang dianalisis meliputi profil tegangan bus dengan satuan per unit (p.u.) atau kilovolt (kV), pembebanan peralatan (loading) yang dinyatakan dalam persentase kapasitas nominal, arus hubung singkat dengan satuan kiloampere (kA), serta produksi energi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berdasarkan simulasi PVsyst yang dinyatakan dalam kWh/bulan dan MWh/tahun. Variabel-variabel teknis tersebut digunakan untuk mengevaluasi kinerja dan keandalan sistem kelistrikan setelah integrasi PLTS. Sementara itu, pada kelompok variabel ekonomi, parameter yang digunakan meliputi Capital Expenditure (CAPEX), Operational Expenditure (OPEX), produksi energi tahunan, tingkat diskonto, umur proyek, dan nilai Levelized Cost of Energy (LCOE) yang dinyatakan dalam Rupiah per kWh. Variabel ekonomi ini menjadi dasar dalam menilai kelayakan finansial dari investasi PLTS Atap yang direncanakan. Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi analisis deskriptif kuantitatif untuk menyajikan data konsumsi energi listrik dan produksi energi PLTS, analisis teknis untuk mengevaluasi kinerja sistem kelistrikan berdasarkan hasil simulasi Load Flow Analysis, Short Circuit Analysis, dan Harmonic Analysis, serta analisis ekonomi menggunakan metode LCOE untuk menentukan biaya pembangkitan energi listrik selama umur proyek. Analisis LCOE dilakukan dengan menghitung Capital Recovery Factor (CRF) berdasarkan tingkat diskonto dan umur proyek, kemudian menghitung LCOE berdasarkan CAPEX, OPEX, dan produksi energi tahunan. Hasil perhitungan LCOE selanjutnya dibandingkan dengan tarif listrik PLN untuk menentukan keunggulan biaya energi PLTS. Analisis penghematan biaya listrik dilakukan dengan menghitung biaya PLN yang dapat dihindari berdasarkan produksi energi PLTS dan tarif listrik PLN. Seluruh analisis data dilakukan secara sistematis dan terintegrasi untuk memperoleh kesimpulan yang valid dan reliabel mengenai kapasitas penetrasi PLTS Atap yang dievaluasi pada sistem kelistrikan PT Polytama Propindo.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil penelitian mengenai pemanfaatan PLTS Atap pada sistem kelistrikan PT Polytama Propindo dengan fokus utama pada evaluasi ekonomi. Analisis meliputi kondisi konsumsi energi listrik eksisting, hasil simulasi produksi energi PLTS, perhitungan Levelized Cost of Energy (LCOE), perbandingan biaya energi PLTS dengan tarif listrik PLN, analisis penghematan energi dan biaya listrik, serta verifikasi teknis kapasitas

penetrasi PLTS Atap yang dievaluasi. PLTS Atap berkapasitas 2.028,64 kWp diarahkan untuk memenuhi sebagian kebutuhan energi pada beban non-produksi, sedangkan beban produksi utama tetap memperoleh pasokan dari jaringan PLN.

Karakteristik Konsumsi Energi dan Biaya Listrik Eksisting

PT Polytama Propindo memperoleh pasokan tenaga listrik dari PT PLN (Persero) melalui jaringan tegangan menengah 20 kV dengan golongan tarif I-3/TM dan daya tersambung sebesar 15.280 kVA (15,28 MVA). Berdasarkan data konsumsi energi listrik yang digunakan dalam penelitian, rata-rata pemakaian listrik PT Polytama Propindo sebesar 6.485.920 kWh per bulan, dengan rata-rata biaya rekening listrik sebesar Rp7.273.671.830 per bulan, atau setara tingkat pemanfaatan daya sekitar 69,36% terhadap daya tersambung. Kondisi ini digunakan sebagai baseline dalam analisis before-after pemanfaatan PLTS Atap, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi Eksisting Konsumsi Energi dan Biaya Listrik

Parameter	Nilai
Sumber pasokan listrik	PLN
Tegangan pasokan	20 kV
Golongan tarif	I-3/TM
Daya tersambung	15.280 kVA (15,28 MVA)
Rata-rata konsumsi energi	6.485.920 kWh/bulan
Rata-rata rekening listrik	Rp7.273.671.830/bulan
Pemanfaatan daya rata-rata	69,36% (10.597,9 kVA)

Sumber: Data konsumsi energi listrik PT Polytama Propindo dan hasil pengolahan peneliti, 2026.

Spesifikasi dan Produksi Energi PLTS Atap

Sistem PLTS Atap yang dianalisis merupakan sistem on-grid dengan kapasitas terpasang 2.028,64 kWp pada sisi DC dan kapasitas inverter 1.750 kWac pada sisi AC. Spesifikasi utama sistem disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Utama PLTS Atap

Parameter	Spesifikasi
Jenis sistem	On-grid (Grid Connected)
Kapasitas PLTS (DC)	2.028,64 kWp
Kapasitas inverter (AC)	1.750 kWac
Jumlah modul fotovoltaik	3.272 unit
Kapasitas modul	620 Wp/unit
Jumlah inverter	14 unit
Tipe inverter	Sungrow SG125CX-P2

Sumber: Data spesifikasi teknis sistem PLTS Atap PT Polytama Propindo, 2026.

Berdasarkan hasil simulasi PVsyst, energi yang dihasilkan dan disalurkan sistem PLTS (E_Grid) selama satu tahun mencapai 2.928,6 MWh/tahun atau 2.928.600 kWh/tahun, dengan produksi bervariasi setiap bulan mengikuti kondisi radiasi matahari dan parameter lingkungan, sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Produksi Energi PLTS Atap Hasil Simulasi PVsyst

Bulan	Produksi Energi (MWh)	Produksi Energi (kWh)
Januari	212,1	212.100
Februari	194,4	194.400
Maret	256,4	256.400
April	235,7	235.700
Mei	239,9	239.900
Juni	222,9	222.900
Juli	247,7	247.700
Agustus	285,9	285.900
September	294,4	294.400
Oktober	284,8	284.800
November	240,5	240.500
Desember	213,8	213.800
Total	2.928,6	2.928.600

Sumber: Hasil simulasi produksi energi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Produksi energi tertinggi terjadi pada bulan September sebesar 294,4 MWh, sedangkan produksi terendah terjadi pada bulan Februari sebesar 194,4 MWh. Rata-rata produksi energi PLTS mencapai 244,05 MWh/bulan (244.050 kWh/bulan). Dibandingkan dengan konsumsi energi listrik rata-rata PT Polytama Propindo sebesar 6.485.920 kWh/bulan, maka rata-rata produksi energi PLTS secara teoritis memberikan kontribusi sebesar 3,76% terhadap kebutuhan energi listrik bulanan perusahaan, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (5).

$$\text{Kontribusi PLTS} = (244.050 / 6.485.920) \times 100\% = 3,76\% \quad (5)$$

Analisis Biaya Energi PLTS Berdasarkan LCOE

Sebelum dilakukan perhitungan LCOE, terlebih dahulu ditetapkan parameter ekonomi sebagai dasar perhitungan. Karena penelitian ini merupakan studi pra-implementasi, data biaya investasi dan operasional aktual belum tersedia, sehingga parameter ekonomi ditetapkan berdasarkan spesifikasi teknis, hasil simulasi, serta referensi ilmiah dan laporan resmi yang relevan [1],[17],[22], sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter Ekonomi yang Digunakan dalam Penelitian

No	Parameter	Nilai	Acuan
1	Umur Proyek (Project Lifetime)	25 tahun	IEA (2020); NREL (1995)

No	Parameter	Nilai	Acuan
2	Tingkat Diskonto (Discount Rate)	8%	IESR (2023); Branker et al. (2011)
3	Biaya Operasi & Pemeliharaan (OPEX)	1,5% CAPEX/tahun	NREL (1995); IEA (2020)
4	Degradasi Modul Fotovoltaik	0,5%/tahun	Datasheet Modul PV
5	Biaya Investasi Spesifik	Rp9,056 juta/kWp	IESR (2023)

Sumber: Hasil kompilasi parameter ekonomi berdasarkan literatur dan referensi teknis terkait, 2026.

Perhitungan CAPEX menggunakan Persamaan (1) dengan kapasitas PLTS 2.028,64 kWp dan biaya investasi spesifik Rp9.056.000/kWp menghasilkan CAPEX sebesar Rp18.375.347.840 (sekitar Rp18,38 miliar), yang menjadi input dalam perhitungan LCOE. Nilai Capital Recovery Factor (CRF) dihitung menggunakan tingkat diskonto 8% dan umur proyek 25 tahun berdasarkan Persamaan (3), menghasilkan CRF sebesar 0,0937. Dengan CAPEX sebesar Rp18.375.347.840, OPEX sebesar Rp275.630.218/tahun, dan produksi energi tahunan 2.928.600 kWh/tahun, perhitungan LCOE menggunakan Persamaan (2) menghasilkan nilai Levelized Cost of Energy (LCOE) untuk rencana implementasi PLTS Atap sebesar Rp739,76/kWh.

Nilai LCOE tersebut lebih rendah dibandingkan tarif tenaga listrik PT PLN (Persero) untuk pelanggan industri sebesar Rp1.035,78/kWh, sebagaimana dibandingkan pada Tabel 5. Selisih biaya energi sebesar Rp296,02/kWh menunjukkan bahwa energi listrik yang dihasilkan PLTS memiliki biaya pembangkitan yang lebih rendah dibandingkan biaya pembelian energi listrik dari jaringan PLN, atau setara keunggulan biaya sebesar 28,58%.

Tabel 5. Perbandingan LCOE dan Tarif Dasar Listrik (TDL) PLN

Parameter	Nilai
LCOE PLTS Atap	Rp739,76/kWh
Tarif Tenaga Listrik PT PLN (Persero)	Rp1.035,78/kWh
Selisih	Rp296,02/kWh

Sumber: Hasil perhitungan LCOE dan data tarif listrik PT PLN (Persero), 2026.

Perbandingan Konsumsi Energi Sebelum dan Sesudah Pemanfaatan PLTS

Sebelum pemanfaatan PLTS Atap, kebutuhan energi listrik rata-rata perusahaan sebesar 6.485.920 kWh/bulan sepenuhnya dipenuhi dari jaringan PLN. Dengan asumsi produksi energi PLTS rata-rata sebesar 244.050 kWh/bulan dapat dimanfaatkan secara efektif oleh beban non-produksi, maka energi yang masih dipenuhi dari jaringan PLN menjadi 6.241.870 kWh/bulan, sebagaimana dirangkum pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Konsumsi Energi Sebelum dan Sesudah Pemanfaatan PLTS

Kondisi	Energi dari PLN (kWh/bulan)	Energi dari PLTS (kWh/bulan)	Total Kebutuhan Energi (kWh/bulan)
Sebelum PLTS	6.485.920	0	6.485.920
Sesudah PLTS	6.241.870	244.050	6.485.920
Perubahan	-244.050	+244.050	0

Sumber: Hasil analisis konsumsi energi listrik sebelum dan setelah integrasi PLTS Atap, 2026.

Pemanfaatan PLTS Atap tidak mengubah total kebutuhan energi listrik perusahaan, tetapi mengubah sumber pemenuhannya. Pengurangan energi dari jaringan PLN sebesar 244.050 kWh/bulan setara dengan 3,76% dari konsumsi energi listrik rata-rata perusahaan, atau 2.928.600 kWh/tahun secara kumulatif.

Analisis Penghematan Biaya Listrik dan Evaluasi Keekonomian

Biaya energi listrik PLN yang dapat dihindari dihitung menggunakan Persamaan (4). Sebagai contoh, pada bulan Januari produksi energi PLTS sebesar 212.100 kWh, sehingga dengan tarif PLN Rp1.035,78/kWh diperoleh biaya PLN yang dapat dihindari sebesar Rp219.641.538. Perhitungan yang sama dilakukan untuk setiap bulan berdasarkan produksi energi PLTS hasil simulasi PVsyst, sebagaimana dirangkum pada Tabel 7.

Tabel 7. Estimasi Penghematan Biaya Listrik Berdasarkan Produksi Energi PLTS

Bulan	Produksi PLTS (kWh)	Tarif PLN (Rp/kWh)	Biaya PLN yang Dapat Dihindari (Rp)
Januari	212.100	1.035,78	219.641.538
Februari	194.400	1.035,78	201.350.832
Maret	256.400	1.035,78	265.510.992
April	235.700	1.035,78	244.079.346
Mei	239.900	1.035,78	248.429.622
Juni	222.900	1.035,78	230.821.362
Juli	247.700	1.035,78	256.540.806
Agustus	285.900	1.035,78	296.082.402
September	294.400	1.035,78	304.889.872
Oktober	284.800	1.035,78	294.948.144
November	240.500	1.035,78	249.051.690
Desember	213.800	1.035,78	221.402.364
Total	2.928.600	—	3.532.749.978

Sumber: Hasil perhitungan penghematan biaya berdasarkan produksi energi PLTS hasil simulasi PVsyst dan tarif PLN, 2026.

Total energi PLTS yang dihasilkan selama satu tahun sebesar 2.928.600 kWh berpotensi menggantikan energi listrik dari PLN dalam jumlah yang sama, dengan nilai energi PLN yang dapat dihindari mencapai sekitar Rp3,533 miliar per tahun atau rata-rata Rp294.395.832 per bulan. Nilai tersebut merupakan penghematan bruto dan belum memperhitungkan biaya energi PLTS berdasarkan LCOE. Dengan mempertimbangkan selisih LCOE terhadap tarif PLN sebesar Rp296,02/kWh, diperoleh keunggulan biaya bersih PLTS terhadap PLN sebesar Rp867.006.372/tahun atau rata-rata Rp72.250.531/bulan, sebagaimana dirangkum pada Tabel 8.

Tabel 8. Ringkasan Hasil Evaluasi Keekonomian

Parameter	Nilai
LCOE PLTS	Rp739,76/kWh
Tarif PLN	Rp1.035,78/kWh
Selisih biaya energi	Rp296,02/kWh
Keunggulan biaya PLTS	28,58%
Produksi energi PLTS	2.928.600 kWh/tahun
Biaya PLN yang dapat dihindari	Rp3.532.749.978/tahun
Keunggulan biaya bersih berdasarkan LCOE	Rp867.006.372/tahun
Rata-rata keunggulan biaya	Rp72.250.531/bulan

Sumber: Hasil analisis ekonomi menggunakan metode Levelized Cost of Energy (LCOE), 2026.

Distribusi Pemanfaatan Energi PLTS pada Beban Non-Produksi

Pemanfaatan PLTS Atap diarahkan untuk memenuhi sebagian kebutuhan energi pada beban non-produksi, yaitu Cooling Water dan utilitas air, Pneumatic Conveying, Blower Silo dan Dehumidifier Granula, laboratorium QC/QA dan R&D Polimer, Central Control Room (CCR) dan Data Center, serta sistem Packaging dan Charging Logistik, sedangkan beban produksi utama tetap dipenuhi dari jaringan PLN. Estimasi distribusi pemanfaatan energi PLTS berdasarkan proporsi masing-masing fasilitas disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Distribusi Beban Non-Produksi sebagai Sasaran Pemanfaatan PLTS

Fasilitas/Area	Nilai Tengah Porsi	Estimasi Energi PLTS (kWh/bulan)
Cooling Water & Utilitas Air	45%	109.822,5
Pneumatic Conveying, Blower Silo & Dehumidifier Granula	22,5%	54.911,3
Laboratorium QC/QA & R&D Polimer	12,5%	30.506,3
Central Control Room (CCR) & Data Center	12,5%	30.506,3

Fasilitas/Area	Nilai Tengah Porsi	Estimasi Energi PLTS (kWh/bulan)
Sistem Packaging Otomatis & Charging Logistik	7,5%	18.303,8
Total	100%	244.050

Sumber: Hasil estimasi distribusi energi PLTS berdasarkan proporsi beban non-produksi PT Polytama Propindo, 2026.

Alokasi terbesar berada pada Cooling Water dan utilitas air dengan estimasi energi sebesar 109.822,5 kWh/bulan, sedangkan alokasi terkecil terdapat pada sistem Packaging otomatis dan Charging Logistik sebesar 18.303,8 kWh/bulan. Perlu ditegaskan bahwa pembagian energi tersebut merupakan estimasi berdasarkan proporsi beban, karena penelitian tidak menggunakan data pengukuran energi secara individual pada masing-masing fasilitas, sehingga nilai tersebut digunakan sebagai pendekatan untuk menggambarkan distribusi pemanfaatan energi PLTS, bukan sebagai nilai konsumsi aktual masing-masing fasilitas.

Verifikasi Teknis dan Evaluasi Kapasitas Penetrasi PLTS Atap

Penentuan kapasitas penetrasi PLTS Atap dilakukan dengan mengevaluasi hubungan antara kapasitas PLTS yang diterapkan, kemampuan produksi energi, kebutuhan energi listrik sistem, serta hasil evaluasi ekonomi yang telah diperoleh. Sistem kelistrikan PT Polytama Propindo memiliki daya kontrak PLN sebesar 15,28 MVA, dengan konsumsi energi listrik rata-rata sebesar 6.485.920 kWh/bulan. Setelah dilakukan evaluasi konsumsi energi, produksi PLTS, dan keekonomian, dilakukan verifikasi teknis secara umum untuk memastikan bahwa kapasitas PLTS Atap yang ditetapkan tetap berada dalam batas operasi sistem kelistrikan yang dipersyaratkan, dengan mempertimbangkan profil tegangan, pembebanan peralatan, arus hubung singkat, serta hasil evaluasi keekonomian berdasarkan nilai LCOE, sebagaimana dirangkum pada Tabel 10.

Tabel 10. Matriks Evaluasi Kapasitas Penetrasi PLTS Atap

No	Parameter Evaluasi	Batas Toleransi/Standar	Hasil Evaluasi
1	Profil Tegangan Bus	0,95–1,05 p.u. (SPLN)	1,012 p.u. (20,25 kV)
2	Loading Peralatan	< 80% Kapasitas Nominal	Maksimum 64,2%
3	Arus Hubung Singkat	< Interrupting Rating CB	Tidak melampaui rating CB
4	Kelayakan Ekonomi	LCOE < Tarif Listrik PLN	Rp739,76 < Rp1.035,78/kWh

Sumber: Hasil evaluasi teknis dan ekonomi sistem kelistrikan PT Polytama Propindo, 2026.

Berdasarkan Tabel 10, hasil evaluasi menunjukkan bahwa kapasitas PLTS Atap sebesar 2.028,64 kWp dapat ditinjau dari aspek teknis dan ekonomi secara simultan. Dari sisi teknis, profil tegangan bus hasil evaluasi sebesar 1,012 p.u. (20,25 kV) masih berada dalam rentang toleransi yang digunakan, sedangkan pembebanan peralatan maksimum sebesar 64,2% masih

berada di bawah batas evaluasi 80% kapasitas nominal, dan hasil evaluasi arus hubung singkat menunjukkan bahwa kondisi gangguan tidak melampaui kemampuan interrupting rating circuit breaker yang digunakan pada sistem. Dari sisi ekonomi, nilai LCOE sebesar Rp739,76/kWh lebih rendah dibandingkan tarif listrik PLN sebesar Rp1.035,78/kWh. Dengan demikian, berdasarkan hasil evaluasi teknis dan ekonomi secara simultan, kapasitas 2.028,64 kWp dapat ditetapkan sebagai kapasitas penetrasi yang dievaluasi dalam penelitian ini, dengan kontribusi energi sekitar 3,76% terhadap konsumsi energi rata-rata perusahaan sekaligus memberikan keunggulan ekonomi berdasarkan nilai LCOE. Penetapan tersebut tidak dimaksudkan sebagai batas maksimum teknis absolut sistem, melainkan sebagai kapasitas penetrasi yang menjadi objek evaluasi berdasarkan kondisi sistem, kebutuhan energi, pemanfaatan beban non-produksi, hasil simulasi, dan parameter keekonomian yang digunakan.

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Fatima et al. [13] yang menyatakan bahwa kapasitas penetrasi PLTS pada sistem distribusi sangat dipengaruhi oleh karakteristik sistem, profil beban, dan parameter operasi. Penelitian tersebut juga menekankan pentingnya evaluasi menyeluruh terhadap aspek teknis dan ekonomi sebelum menentukan kapasitas penetrasi PLTS. Selain itu, hasil penelitian ini juga mendukung temuan Baroni dan Bruno [3] yang menunjukkan bahwa integrasi PLTS pada sistem distribusi dapat dilakukan tanpa melanggar batas operasi sistem, sepanjang kapasitas yang diintegrasikan dievaluasi secara cermat dengan mempertimbangkan kondisi sistem yang ada.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa PLTS Atap berkapasitas 2.028,64 kWp pada sistem kelistrikan PT Polytama Propindo memiliki LCOE sebesar Rp739,76/kWh, yang lebih rendah dibandingkan tarif listrik PLN sebesar Rp1.035,78/kWh. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Santoso et al. [25] yang menganalisis kinerja dan keekonomian PLTS Atap 1,82 kWp di Indonesia dan menemukan bahwa LCOE PLTS Atap di Indonesia berkisar antara Rp700–Rp900/kWh, tergantung pada lokasi, biaya investasi, dan tarif listrik yang berlaku. Penelitian tersebut juga menekankan bahwa PLTS Atap di Indonesia memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan, terutama pada sektor industri yang memiliki konsumsi energi listrik tinggi dan tarif listrik yang relatif mahal.

Selain itu, hasil penelitian ini juga sejalan dengan temuan Khan dan Rana [28] yang menganalisis PLTS Atap 100 kW on-grid menggunakan perangkat lunak HOMER dan menemukan bahwa PLTS Atap memiliki kelayakan ekonomi yang baik untuk sektor industri, dengan LCOE yang lebih rendah dibandingkan tarif listrik dari jaringan. Penelitian tersebut juga menekankan pentingnya evaluasi teknis dan ekonomi secara terintegrasi dalam menentukan kapasitas PLTS yang optimal. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bukti empiris bahwa PLTS Atap merupakan solusi yang layak secara teknis dan ekonomi untuk mengurangi biaya listrik dan meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan pada sektor industri.

Keterkaitan dengan Teori

Hasil penelitian ini dapat dijelaskan melalui kerangka teori ekonomi teknik dan analisis sistem tenaga listrik. Dalam konteks ekonomi teknik, metode LCOE merupakan pendekatan yang secara luas digunakan untuk mengevaluasi biaya energi dari suatu pembangkit selama umur proyek. Teori ini menekankan bahwa keputusan investasi energi harus mempertimbangkan seluruh biaya siklus hidup (life-cycle cost) dan energi yang dihasilkan,

bukan hanya biaya investasi awal. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dengan mempertimbangkan CAPEX, OPEX, tingkat diskonto, umur proyek, dan produksi energi tahunan, PLTS Atap memiliki LCOE yang lebih rendah dibandingkan tarif listrik PLN, sehingga secara ekonomi layak untuk diimplementasikan.

Dalam konteks analisis sistem tenaga listrik, teori aliran daya (load flow) dan analisis hubung singkat (short circuit) digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem setelah integrasi PLTS. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi PLTS Atap sebesar 2.028,64 kWp tidak melanggar batas operasi sistem, dengan profil tegangan bus yang masih dalam rentang toleransi, pembebanan peralatan yang masih di bawah batas nominal, dan arus hubung singkat yang tidak melampaui kemampuan interrupting rating circuit breaker. Temuan ini mendukung teori bahwa integrasi pembangkit terdistribusi seperti PLTS dapat dilakukan secara aman pada sistem kelistrikan industri, sepanjang kapasitas yang diintegrasikan dievaluasi secara cermat dengan mempertimbangkan karakteristik sistem dan profil beban.

Implikasi Praktis

Hasil penelitian ini memberikan beberapa implikasi praktis bagi PT Polytama Propindo dan perusahaan industri lainnya yang memiliki karakteristik serupa. Pertama, PLTS Atap berkapasitas 2.028,64 kWp dapat diimplementasikan pada sistem kelistrikan PT Polytama Propindo tanpa melanggar batas operasi sistem, dengan kontribusi energi sekitar 3,76% terhadap konsumsi energi rata-rata perusahaan. Kedua, pemanfaatan PLTS Atap dapat memberikan penghematan biaya listrik yang signifikan, dengan potensi pengurangan biaya PLN yang dapat dihindari sebesar Rp3,53 miliar per tahun dan keunggulan biaya bersih berdasarkan LCOE sebesar Rp867,01 juta per tahun. Ketiga, perusahaan dapat memprioritaskan pemanfaatan PLTS pada beban non-produksi yang memiliki karakteristik konsumsi energi relatif stabil, sehingga fluktuasi produksi energi PLTS tidak mengganggu keberlangsungan operasi produksi. Keempat, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi perusahaan industri lain yang ingin mengimplementasikan PLTS Atap, khususnya dalam menentukan kapasitas penetrasi yang layak secara teknis dan ekonomi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai rencana implementasi PLTS Atap berkapasitas 1,75 MWp pada sistem kelistrikan PT Polytama Propindo, dapat disimpulkan bahwa konsumsi energi listrik perusahaan rata-rata sebesar 6.485.920 kWh per bulan, sehingga terdapat peluang pemanfaatan PLTS Atap untuk memenuhi sebagian kebutuhan energi, khususnya beban non-produksi. Hasil simulasi produksi energi menggunakan PVsyst menunjukkan bahwa sistem PLTS Atap berkapasitas 2.028,64 kWp menghasilkan energi sebesar 2.928,6 MWh per tahun, atau rata-rata 244.050 kWh per bulan, dengan kontribusi sekitar 3,76% terhadap konsumsi energi listrik bulanan perusahaan. Dari aspek teknis, integrasi PLTS Atap tersebut tetap berada dalam batas operasi sistem kelistrikan yang dipersyaratkan, dengan profil tegangan bus sebesar 1,012 p.u. (20,25 kV) yang masih berada dalam rentang toleransi 0,95–1,05 p.u., pembebanan peralatan maksimum sebesar 64,2% yang masih di bawah batas 80% kapasitas nominal, serta arus hubung singkat yang tidak melampaui kemampuan interrupting rating circuit breaker yang digunakan pada sistem. Dari aspek ekonomi, analisis menggunakan metode Levelized Cost of Energy (LCOE) menghasilkan nilai sebesar Rp739,76 per kWh, lebih rendah dibandingkan tarif listrik PLN sebesar Rp1.035,78 per kWh, sehingga energi PLTS memiliki biaya yang lebih

kompetitif dengan keunggulan sebesar 28,58% atau setara Rp296,02 per kWh. Pemanfaatan PLTS Atap juga berpotensi mengurangi konsumsi energi dari jaringan PLN sebesar 244.050 kWh per bulan dan menghasilkan potensi penghematan biaya energi PLN yang dapat dihindari sebesar Rp3,53 miliar per tahun, dengan keunggulan biaya bersih berdasarkan LCOE sebesar Rp867,01 juta per tahun atau rata-rata Rp72,25 juta per bulan. Berdasarkan evaluasi teknis dan ekonomi secara simultan, kapasitas PLTS Atap 2.028,64 kWp (1,75 MWp) ditetapkan sebagai kapasitas penetrasi yang dievaluasi pada sistem kelistrikan PT Polytama Propindo. Penetapan ini tidak dimaksudkan sebagai batas maksimum teknis absolut sistem, melainkan sebagai kapasitas penetrasi yang menjadi objek evaluasi berdasarkan kondisi sistem, kebutuhan energi, pemanfaatan beban non-produksi, hasil simulasi, dan parameter keekonomian yang digunakan.

Penelitian ini memberikan implikasi teoretis dan praktis yang signifikan. Secara teoretis, penelitian ini memperkaya literatur mengenai evaluasi tekno-ekonomi PLTS Atap pada sistem kelistrikan industri, khususnya dalam konteks integrasi pembangkit terdistribusi dengan mempertimbangkan kondisi operasi sistem dan kelayakan ekonomi secara simultan. Pendekatan terintegrasi yang digunakan dalam penelitian ini dapat menjadi kerangka acuan bagi penelitian selanjutnya dalam mengevaluasi kapasitas penetrasi PLTS Atap pada sistem kelistrikan industri. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengambilan keputusan bagi PT Polytama Propindo dalam mengimplementasikan PLTS Atap, serta menjadi referensi bagi perusahaan industri lain yang memiliki karakteristik serupa. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan analisis beberapa skenario kapasitas PLTS secara bertahap untuk memperoleh batas penetrasi maksimum yang lebih komprehensif, mengembangkan analisis ekonomi menggunakan indikator kelayakan investasi lain seperti Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period (PP) apabila data investasi aktual tersedia, mempertimbangkan pemanfaatan Battery Energy Storage System (BESS) untuk meningkatkan fleksibilitas dan self-consumption energi PLTS, serta melaksanakan implementasi PLTS Atap secara bertahap dengan mempertimbangkan karakteristik konsumsi energi, kondisi operasi sistem, dan parameter ekonomi agar kapasitas yang diterapkan memberikan manfaat optimal.

REFERENSI

- Baroni, D., & Bruno, R. (2026). Assessment of Photovoltaic Hosting Capacity in Distribution Systems Considering Battery Energy Storage Systems and Voltage Regulators. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. <https://doi.org/10.1007/s40313-026-01296-4>
- Blank, L., & Tarquin, A. (2018). *Engineering Economy* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Branker, M. J. M., Pathak, M. J. M., & Pearce, J. M. (2011). A Review of Solar Photovoltaic Levelized Cost of Electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4470–4482. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). Wiley.
- Elphick, S. (2025). Data-Driven Assessment of the Impact of Solar Photovoltaic Generation on Distribution Network Harmonic Distortion. *Solar*, 5(4), 57. <https://doi.org/10.3390/solar5040057>
- Fatima, S., Püvi, V., & Lehtonen, M. (2020). Review on the PV Hosting Capacity in Distribution Networks. *Energies*, 13(18), 4756. <https://doi.org/10.3390/en13184756>
- Fehr, R. E. (2016). *Industrial Power Distribution* (2nd ed.). Wiley-IEEE Press.

- Ferede Abebe, A., Bizzotto, S., & Molina, P. (2021). *Techno-Economic Assessment Report*.
- Galevien, A. P., Ridwan, M. K., & Wardana, A. N. I. (2025). Assessing the Viability of Rooftop Solar PV in Energy-Intensive Industries: A Techno-Economic and Safety Framework for the Indonesian FMCG Sector. *Energies*, 18(21), 5859. <https://doi.org/10.3390/en18215859>
- Gönen, T. (2015). *Electric Power Distribution Engineering* (3rd ed.). CRC Press.
- Green, M. A. (1982). *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Prentice-Hall.
- Illerhaus, S. W., & Verstege, J. (2000). Optimal operation of industrial IPPs considering load management strategies. In *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1109/IAS.2000.881939>
- International Electrotechnical Commission. (2021). *Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring*. International Electrotechnical Commission. <https://webstore.iec.ch/en/publication/65561>
- International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. (2017). *PV Performance Modeling Methods and Practices*. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/T13_Report_PV_Performance_Modeling_Methods_and_Practices_FINAL_March_2017.pdf
- International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. (2024). *Trends in Photovoltaic Applications 2024*. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/10/IEA-PVPS-Task-1-Trends-Report-2024.pdf>
- International Renewable Energy Agency. (2023). *Renewable Power Generation Costs in 2022*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org>
- International Renewable Energy Agency. (2025). *Renewable Generation Costs in 2024*. International Renewable Energy Agency.
- Khan, A., & Rana, K. B. (2019). Techno-Economic Analysis of 100 kW Rooftop Photovoltaic Grid-Type System Based on Actual Performance through HOMER Software. In *Proceedings of the 2019 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT)* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/ICICT46931.2019.8977701>
- Marion, B. (2005). Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. In *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (pp. 1601–1606). <https://doi.org/10.1109/PVSC.2005.1488451>
- Masters, G. M. (2013). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. Wiley.
- Messenger, R. A., & Abtahi, A. (2017). *Photovoltaic Systems Engineering* (4th ed.). CRC Press.
- Najafi, M., Mobarez, M. D., Vahidi, B., Hosseinian, S. H., & Gharehpetian, G. B. (2025). Stochastic techno-economic assessment of a grid-connected rooftop photovoltaic in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 219, 115808. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115808>
- Newnan, D. G., Eschenbach, T. G., & Lavelle, J. P. (2017). *Engineering Economic Analysis* (13th ed.). Oxford University Press.
- Nour, A. M. M. (2020). Voltage violation in four-wire distribution networks integrated with rooftop PV systems. *IET Renewable Power Generation*, 14, 2395–2405. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0174>
- Rodríguez-Martínez, Á., & Rodríguez-Monroy, C. (2021). Economic Analysis and Modelling of Rooftop Photovoltaic Systems in Spain for Industrial Self-Consumption. *Energies*, 14(21), 7307. <https://doi.org/10.3390/en14217307>

- Santoso, R. W. (2026). Performance and Techno-economic Analysis of a 1.82 kWp Rooftop PV System in the Tropical Climate of Indonesia: A Simulation vs Reality Approach. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 15(1). <https://doi.org/10.25077/jnte.v15n1.1427.2026>
- Short, W., Packey, D. J., & Holt, T. (1995). *A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies*. National Renewable Energy Laboratory.
- Smain, M., & Fatiha, Y. (2026). Techno-economic and environmental optimisation of photovoltaic systems based on self-consumption with surplus grid injection for industrial buildings. *Journal of Renewable Energies*, 29(4), 5–20. <https://doi.org/10.54966/jreen.v29i4.1786>