

Analisa Kelayakan Pemasangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Pada Gardu Induk Binjai

Gamaliel Pangeran Valentino Pardede* , Syamsir Abduh

Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: gamalielvalentino3@gmail.com*, syamsir@itpln.ac.id

Keywords :	Abstract
Rooftop Photovoltaic, Binjai Substation, PVsyst, Performance Ratio, Techno-Economic Analysis, Renewable Energy	<i>Utilization of solar energy through rooftop solar power plants (PLTS) is one effort to support the energy transition while reducing electricity consumption from the PLN grid. This study aims to analyze the technical and economic feasibility of installing rooftop PLTS at the Binjai Substation by comparing the use of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic modules in systems without batteries and with batteries. The analysis was conducted using PVsyst software based on solar radiation data, roof area, and the substation's own load profile. The technical evaluation includes energy production, Performance Ratio (PR), Solar Fraction, and system losses, while the economic analysis uses Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Return on Investment (ROI), and Payback Period (PBP) parameters. The results show that monocrystalline modules produce higher energy production and PR values than polycrystalline modules. From an economic aspect, the battery-free system provides a lower initial investment and a faster payback period, while the addition of batteries increases solar energy utilization and continuity of electricity supply, but requires a larger investment. Overall, the installation of rooftop solar power plants at the Binjai Substation is considered feasible as a more efficient alternative for energy supply and supports the increased use of new and renewable energy in electricity infrastructure.</i>
Kata kunci:	Abstrak
PLTS Atap, Gardu Induk Binjai, PVsyst, Performance Ratio, Kelayakan Ekonomi, Energi Baru Terbarukan.	<i>Pemanfaatan energi surya melalui Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap menjadi salah satu upaya untuk mendukung transisi energi sekaligus mengurangi konsumsi listrik dari jaringan PLN. Penelitian ini bertujuan menganalisis kelayakan teknis dan ekonomi pemasangan PLTS atap pada Gardu Induk Binjai dengan membandingkan penggunaan modul fotovoltaik monokristalin dan polikristalin pada sistem tanpa baterai maupun dengan baterai. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak PVsyst berdasarkan data radiasi matahari, luas atap, dan profil beban pemakaian sendiri gardu induk. Evaluasi teknis meliputi produksi energi, Performance Ratio (PR), Solar Fraction, dan rugi-rugi sistem, sedangkan analisis ekonomi menggunakan parameter Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Return on Investment (ROI), dan Payback Period (PBP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa modul monokristalin menghasilkan produksi energi dan nilai PR yang lebih tinggi dibandingkan modul polikristalin. Dari aspek ekonomi, sistem tanpa baterai memberikan investasi awal yang lebih rendah serta waktu pengembalian modal yang lebih cepat, sedangkan penambahan baterai meningkatkan pemanfaatan energi surya dan kontinuitas suplai listrik, tetapi membutuhkan investasi yang lebih besar. Secara keseluruhan, pemasangan PLTS atap pada Gardu</i>

PENDAHULUAN

Dewasa ini, energi memiliki peran penting dalam mendukung berbagai aktivitas manusia, baik dalam sektor rumah tangga, industri, perdagangan, maupun pelayanan publik. Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk, pertumbuhan ekonomi, serta perkembangan teknologi, kebutuhan energi di Indonesia terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun (Priyohutomo et al., 2021). Kondisi ini mencerminkan bahwa ketersediaan energi yang andal dan berkelanjutan menjadi faktor utama dalam menunjang pembangunan nasional serta meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Ketergantungan yang tinggi terhadap pasokan energi yang stabil menjadikan sektor energi sebagai salah satu pilar fundamental dalam menjaga stabilitas ekonomi dan sosial bangsa (Hardyanti et al., 2026; Jordan et al., 2022; Makhubele et al., 2025; Nugraha et al., 2024).

Hingga saat ini, sebagian besar kebutuhan energi nasional masih dipenuhi oleh sumber energi fosil. Meskipun sumber energi tersebut mampu menyediakan pasokan energi dalam jumlah besar, pemanfaatannya secara terus-menerus menimbulkan berbagai permasalahan, antara lain keterbatasan cadangan sumber daya, peningkatan emisi gas rumah kaca, serta dampak negatif terhadap lingkungan (Başaran et al., 2025). Fenomena perubahan iklim yang semakin nyata, seperti peningkatan suhu global dan cuaca ekstrem, telah mendorong berbagai negara untuk beralih dari energi fosil menuju sumber energi yang lebih ramah lingkungan (Ekacitta & Iyi, 2025). Oleh karena itu, diperlukan upaya diversifikasi energi melalui pengembangan sumber energi alternatif yang lebih bersih, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

Menurut data Kementerian ESDM Republik Indonesia, peran Energi Baru Terbarukan (EBT) dalam bauran energi nasional telah mencapai 14,68% pada tahun 2024 dengan target 19,5% di tahun yang sama. Sementara itu, Pemerintah telah menetapkan target EBT melalui Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 40 Tahun 2025 yakni sebesar 19%–23% pada Tahun 2025 dan 53%–55% pada Tahun 2050. Realisasi target tersebut masih menghadapi berbagai tantangan, antara lain keterbatasan infrastruktur, tingginya biaya investasi awal, serta kebijakan yang belum sepenuhnya mendukung percepatan transisi energi (Shahsavari & Akbari, 2018). Gambar 1 menunjukkan realisasi dan target bauran energi nasional di Indonesia sampai dengan tahun 2024.



Gambar 1. Target dan Realisasi Bauran Energi Nasional

Sumber Daya Mineral (ESDM), diolah peneliti (2026).

Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar namun pemanfaatannya masih belum optimal (Li et al., 2018). Potensi radiasi matahari di Indonesia cukup signifikan, yakni berkisar antara 3,8 hingga 4,6 kWh/m² per hari. Potensi tersebut dinilai sangat mendukung pengembangan PLTS baik dalam skala kecil maupun skala besar untuk mendukung transisi energi nasional (Rodríguez-Martínez & Rodríguez-Monroy, 2021). Beberapa kajian pada berbagai zona iklim menunjukkan bahwa sistem dengan kapasitas yang sama dapat menghasilkan produksi energi yang berbeda akibat variasi kondisi meteorologi setempat (Zhu et al., 2023). Hal ini menegaskan pentingnya studi kelayakan yang disesuaikan dengan karakteristik lokasi spesifik sebelum implementasi PLTS dilakukan.

Pemanfaatan atap bangunan memberikan peluang untuk menambah kapasitas energi terbarukan tanpa memerlukan pembebasan lahan baru. Selain menurunkan konsumsi listrik dari jaringan, sistem tersebut dapat meningkatkan pemanfaatan energi di lokasi pembangkitan apabila kapasitasnya dirancang sesuai pola konsumsi pengguna (Leeabai et al., 2025; Yoomak et al., 2019). Pemanfaatan PLTS atap menjadi salah satu alternatif yang efektif dipasang pada bangunan atau fasilitas eksisting, termasuk gardu induk. Sistem PLTS atap juga mampu membantu menurunkan konsumsi energi listrik dari jaringan utama sehingga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik secara keseluruhan (Tarigan, 2024). Berbagai studi menunjukkan bahwa instalasi PLTS atap pada fasilitas pendidikan, komersial, dan institusi publik mampu memberikan manfaat teknis maupun lingkungan secara signifikan (Falih et al., 2022).

Gardu induk merupakan bagian dari sistem transmisi tenaga listrik yang berfungsi sebagai pusat transformasi tegangan, pengaturan sistem, serta penghubung jaringan transmisi dan distribusi tenaga listrik. Operasional gardu induk membutuhkan pasokan energi listrik secara kontinu untuk mendukung sistem kontrol, proteksi, pendingin, penerangan, dan peralatan pendukung lainnya. Oleh karena itu, pemanfaatan PLTS atap pada gardu induk berpotensi menjadi solusi untuk mengurangi konsumsi energi internal dan meningkatkan efisiensi operasional sistem tenaga listrik. Gardu Induk (GI) Binjai merupakan salah satu Gardu Induk milik PT PLN (Persero) yang terletak di Provinsi Sumatera Utara yang memiliki

2 Trafo Pemakaian Sendiri (PS) dengan kapasitas 100 kVA dan 200 kVA. Gambar 2 menunjukkan kondisi bangunan dan switchyard pada Gardu Induk (GI) Binjai.



Gambar 2. Gardu Induk Binjai

Sumber Daya Mineral (ESDM), diolah peneliti (2026).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji implementasi PLTS atap pada berbagai jenis bangunan dan fasilitas. (Tarigan, 2024) melakukan analisis tekno-ekonomi PLTS atap residensial di Indonesia berdasarkan regulasi ESDM 26/2021 dan menemukan bahwa sistem PLTS atap layak diterapkan dengan nilai investasi yang bervariasi tergantung pada kapasitas dan lokasi pemasangan. (Yoomak et al., 2019) mengevaluasi kinerja dan ekonomi sistem PLTS atap di berbagai wilayah Thailand dan menyimpulkan bahwa intensitas radiasi matahari yang tinggi dapat meningkatkan performa sistem PLTS sehingga menghasilkan energi listrik yang optimal. Sementara itu, penelitian di Indonesia oleh (Riawan et al., 2022) mengenai analisis performansi dan ekonomi PLTS atap 10 kWp pada bangunan rumah tangga di Desa Batuan Gianyar menunjukkan bahwa sistem PLTS atap mampu memberikan penghematan energi listrik yang signifikan serta layak diterapkan secara ekonomi dalam jangka panjang. Selain aspek teknis, implementasi PLTS atap juga perlu dianalisis dari sisi ekonomi dan investasi untuk mengetahui tingkat kelayakan proyek yang akan diterapkan. Analisis kelayakan investasi umumnya dilakukan menggunakan metode Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Return on Investment (ROI), dan Payback Period (PBP) untuk mengetahui tingkat keuntungan dan waktu pengembalian investasi suatu proyek energi terbarukan.

Meskipun berbagai penelitian tentang PLTS atap telah banyak dilakukan, masih terdapat kesenjangan penelitian (research gap) dalam hal analisis kelayakan PLTS atap pada infrastruktur ketenagalistrikan khususnya gardu induk di Indonesia. Sebagian besar studi yang ada berfokus pada bangunan residensial, komersial, atau industri, sementara penelitian mengenai penerapan PLTS atap pada fasilitas transmisi listrik seperti gardu induk masih sangat terbatas. Padahal, gardu induk memiliki karakteristik beban yang unik, yaitu kebutuhan energi internal yang berlangsung terus-menerus sepanjang hari untuk mendukung sistem proteksi,

kontrol, dan peralatan operasional lainnya. Oleh karena itu, urgensi penelitian ini terletak pada perlunya kajian komprehensif yang menggabungkan aspek teknis dan ekonomi untuk mengevaluasi kelayakan pemasangan PLTS atap pada gardu induk, yang hingga saat ini belum banyak dieksplorasi dalam literatur ilmiah.

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada analisis komparatif empat skenario sistem PLTS atap yang menggabungkan variasi jenis modul fotovoltaik (monokristalin dan polikristalin) dengan konfigurasi sistem (tanpa baterai dan dengan baterai) secara terintegrasi pada studi kasus gardu induk di Indonesia. Selain itu, penelitian ini menggunakan perangkat lunak PVsyst untuk simulasi teknis yang dikombinasikan dengan analisis kelayakan ekonomi menggunakan indikator CAPEX, OPEX, LCOE, NPV, ROI, IRR, dan PBP. Pendekatan holistik ini memberikan kontribusi signifikan dalam pengambilan keputusan investasi PLTS atap pada infrastruktur ketenagalistrikan.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis kelayakan teknis dan ekonomi pemasangan PLTS atap pada Gardu Induk Binjai melalui empat skenario sistem yang berbeda, serta menentukan rekomendasi skenario terbaik berdasarkan tujuan operasional yang diinginkan. Manfaat penelitian ini diharapkan dapat memberikan acuan bagi pemangku kepentingan, khususnya PT PLN (Persero), dalam mengimplementasikan PLTS atap pada gardu induk sebagai bagian dari upaya transisi energi dan peningkatan pemanfaatan energi baru terbarukan di Indonesia.

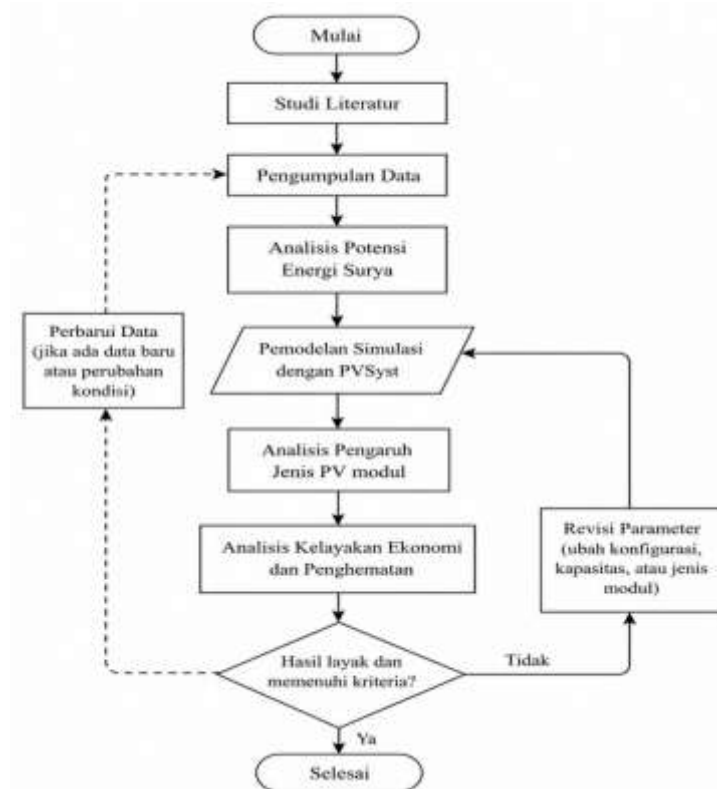
METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan studi kasus yang bertujuan menganalisis kelayakan pemasangan PLTS atap pada Gardu Induk Binjai. Lokasi penelitian berada di Gardu Induk (GI) Binjai, salah satu aset ketenagalistrikan yang dikelola oleh PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Transmisi (UPT) Medan, yang secara administratif terletak di Jl. MT Haryono, Jati Karya, Kecamatan Binjai Utara, Kota Binjai, Provinsi Sumatera Utara, pada koordinat 03.645159° LS, 098.506961° BT dengan luas area sekitar 510 m². Gardu Induk ini berperan strategis sebagai titik interkoneksi serta transformasi tegangan dalam sistem tenaga listrik dengan menerima pasokan energi dari SUTET 275 kV, menyalurkannya ke sistem tegangan tinggi 150 kV, kemudian meneruskannya melalui transformator tenaga ke sistem tegangan menengah 20 kV guna memenuhi kebutuhan pelanggan di Kota Binjai dan sekitarnya, sekaligus menjaga keandalan, kontinuitas, dan kualitas pasokan listrik pada sistem interkoneksi Sumatera Utara. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada karakteristik Gardu Induk Binjai yang memiliki kebutuhan energi internal (station service load) yang berlangsung terus-menerus untuk sistem proteksi, kontrol, SCADA, penerangan, pendingin ruangan, komunikasi, dan peralatan penunjang operasional lainnya, sehingga menjadikannya lokasi yang potensial untuk mengkaji penerapan PLTS Atap sebagai upaya peningkatan pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) sekaligus pengurangan konsumsi energi listrik dari jaringan utama. Waktu penelitian dilaksanakan selama periode yang mencakup pengumpulan data lapangan dan simulasi sistem menggunakan perangkat lunak PVsyst.

Penelitian ini menggunakan dua jenis sumber data utama, yaitu data primer dan data sekunder, yang digunakan untuk penyusunan simulasi kelayakan pemasangan PLTS Atap baik dari sisi teknis maupun ekonomis. Populasi data dalam penelitian ini mencakup seluruh data teknis dan operasional yang relevan dengan sistem PLTS atap di Gardu Induk Binjai. Sampel

data yang digunakan terdiri dari data iradiasi matahari tahunan, data temperatur, profil beban pemakaian sendiri gardu induk, serta spesifikasi teknis komponen PLTS. Data primer diperoleh melalui pengukuran dan pengamatan langsung di lapangan, meliputi luasan atap (pengukuran langsung), kondisi fisik bangunan dan lingkungan (pengamatan lapangan), daftar kebutuhan energi internal (pengamatan langsung), serta jam operasional luar waktu beban puncak (pengukuran lapangan). Sementara itu, data sekunder dikumpulkan dari sumber-sumber relevan, meliputi data beban Pemakaian Sendiri (PS) GI dari laporan perusahaan GI, data iradiasi matahari dan suhu tahunan dari basis data Meteonorm, spesifikasi teknis PV dan inverter dari Standar PLN (SPLN), serta biaya investasi awal (CAPEX), biaya operasional dan pemeliharaan (O&M), dan asumsi ekonomi yang seluruhnya diperoleh melalui studi literatur. Teknik pengambilan sampel yang digunakan adalah purposive sampling, di mana data dipilih berdasarkan kriteria relevansi terhadap tujuan penelitian dan ketersediaan informasi yang akurat.

Instrumen penelitian yang digunakan dalam studi ini terdiri dari perangkat lunak PVsyst untuk simulasi teknis, perangkat lunak Microsoft Excel untuk analisis ekonomi, serta peralatan pengukuran lapangan untuk verifikasi data fisik. Uji validitas data dilakukan melalui verifikasi silang antara data primer dan data sekunder, serta perbandingan dengan data dari sumber terpercaya seperti Meteonorm dan SPLN. Uji reliabilitas dilakukan dengan melakukan simulasi berulang pada PVsyst untuk memastikan konsistensi hasil yang diperoleh. Penelitian ini dilaksanakan melalui tiga tahapan utama. Pertama, perancangan sistem PLTS Atap dan estimasi produksi energi listrik di Gardu Induk (GI) Binjai dilakukan dengan mengumpulkan data primer dan data sekunder, yang kemudian diolah menggunakan PVsyst untuk memperoleh parameter teknis seperti produksi energi tahunan, Performance Ratio, rugi-rugi sistem, dan tingkat pemenuhan kebutuhan energi internal. Kedua, dilakukan analisis pengaruh jenis modul fotovoltaik (monokristalin dan polikristalin) dengan dan tanpa baterai terhadap kinerja sistem melalui empat skenario simulasi, yang dievaluasi berdasarkan luas area pemasangan, produksi energi tahunan, Performance Ratio, dan specific yield untuk menentukan konfigurasi modul terbaik. Ketiga, dilakukan analisis kelayakan ekonomi dan potensi penghematan berdasarkan hasil simulasi PVsyst. Pada kondisi on-grid dengan baterai, energi digunakan untuk memenuhi kebutuhan pada periode WBP dan LWBP, sedangkan tanpa baterai hanya pada periode LWBP, dengan penghematan biaya dihitung berdasarkan energi yang disuplai PLTS menggantikan konsumsi dari jaringan PLN mengikuti struktur tarif WBP-LWBP. Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah PVsyst versi 7.4 untuk simulasi teknis dan Microsoft Excel untuk analisis ekonomi. Teknik analisis data yang digunakan meliputi analisis deskriptif kuantitatif untuk data teknis dan analisis finansial untuk data ekonomi, dengan evaluasi investasi menggunakan parameter ekonomi seperti biaya investasi awal, biaya operasi dan pemeliharaan, umur proyek, inflasi, tingkat diskonto, dan laju degradasi modul untuk menentukan tingkat keuntungan, periode pengembalian modal, dan kelayakan finansial sistem PLTS yang direncanakan. Detail tahapan penelitian disajikan pada Gambar 3 berikut ini:



Gambar 3. Alur Kerangka Penelitian

Sumber: Diolah peneliti (2026).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi Produksi Energi

Hasil simulasi yang dilakukan pada seluruh skenario menunjukkan bahwa variasi komposisi penggunaan modul fotovoltaik (PV) monokristalin dan polikristalin memberikan pengaruh terhadap besarnya energi listrik yang dapat dihasilkan oleh sistem PLTS atap. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan setiap skenario berdasarkan parameter utama berupa produksi energi tahunan, *solar fraction*, dan *Performance Ratio* (PR). Ketiga parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi tingkat kinerja sistem serta efektivitas masing-masing konfigurasi modul dalam memanfaatkan potensi radiasi matahari di lokasi penelitian.

Berdasarkan hasil simulasi yang disajikan pada Tabel 1, terlihat bahwa skenario yang menggunakan modul monokristalin menghasilkan produksi energi listrik paling tinggi dibandingkan modul polikristalin. Pola ini menunjukkan bahwa karakteristik teknis masing-masing jenis modul memiliki pengaruh terhadap kemampuan sistem. Pada Skenario 1 (monokristalin tanpa baterai) dengan kapasitas 10,5 kWp, produksi energi tahunan mencapai 15,051 MWh/tahun dengan specific yield sebesar 1.433 kWh/kWp/tahun. Sementara itu, Skenario 2 (polikristalin tanpa baterai) dengan kapasitas yang sama menghasilkan produksi energi tahunan sebesar 14,685 MWh/tahun dengan specific yield 1.399 kWh/kWp/tahun. Perbedaan tersebut terutama dipengaruhi oleh tingkat efisiensi modul. Modul monokristalin pada umumnya memiliki efisiensi konversi yang lebih tinggi dibandingkan modul polikristalin sehingga mampu menghasilkan energi listrik yang lebih besar pada

kapasitas terpasang yang sama. Oleh karena itu, konfigurasi yang didominasi oleh modul monokristalin mampu memberikan hasil produksi energi yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi yang menggunakan modul polikristalin.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan baterai pada sistem menyebabkan penurunan specific yield, di mana Skenario 3 (monokristalin dengan baterai) menghasilkan specific yield sebesar 1.353 kWh/kWp/tahun dan Skenario 4 (polikristalin dengan baterai) sebesar 1.349 kWh/kWp/tahun. Penurunan ini disebabkan oleh adanya rugi-rugi tambahan selama proses pengisian dan pelepasan energi pada baterai, yang mengakibatkan sebagian energi yang dihasilkan modul tidak dapat dimanfaatkan secara langsung oleh beban. Meskipun demikian, sistem dengan baterai mampu meningkatkan solar fraction secara signifikan, dari 23,68% pada Skenario 1 menjadi 70,05% pada Skenario 3, dan dari 23,56% pada Skenario 2 menjadi 70,53% pada Skenario 4. Nilai *solar fraction* menunjukkan persentase kebutuhan energi gedung yang dapat dipenuhi oleh sistem PLTS. Peningkatan solar fraction ini mengindikasikan bahwa penggunaan baterai memungkinkan pemanfaatan energi surya yang lebih besar karena energi yang dihasilkan pada siang hari dapat disimpan dan digunakan pada malam hari, sehingga mengurangi ketergantungan terhadap pasokan listrik dari jaringan utama secara lebih signifikan.

Meskipun demikian, evaluasi terhadap parameter Performance Ratio (PR) memperlihatkan bahwa seluruh skenario memiliki nilai yang relatif stabil, yaitu berada pada kisaran 78,99% hingga 83,95%. Nilai PR tertinggi diperoleh pada Skenario 1 (83,95%), diikuti oleh Skenario 2 (81,91%), Skenario 3 (79,25%), dan Skenario 4 (78,99%). Nilai tersebut menunjukkan bahwa perubahan jenis modul tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi operasional sistem secara keseluruhan. Dengan kata lain, seluruh konfigurasi masih mampu bekerja secara optimal dengan tingkat kehilangan energi (*system losses*) yang relatif seragam. Namun demikian, terlihat bahwa penambahan baterai menyebabkan penurunan PR karena adanya rugi-rugi pada proses pengisian dan pengosongan baterai, sedangkan perbedaan PR antara modul monokristalin dan polikristalin relatif kecil (sekitar 2% pada sistem tanpa baterai dan 0,26% pada sistem dengan baterai).

Berdasarkan kriteria yang dikemukakan oleh penelitian sebelumnya, sistem PLTS dikatakan memiliki kinerja yang baik apabila nilai *Performance Ratio* berada pada rentang 70% hingga 90% [13]. Oleh karena itu, seluruh skenario yang diuji dalam penelitian ini dapat dikategorikan layak untuk diterapkan karena memenuhi standar performa sistem fotovoltaik yang umum digunakan dalam berbagai penelitian maupun implementasi lapangan.

Walaupun seluruh konfigurasi memenuhi kriteria kelayakan, terdapat perbedaan performa yang cukup jelas apabila ditinjau dari produktivitas energi. Skenario dengan menggunakan modul monokristalin menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan skenario menggunakan modul polikristalin. Hal ini terlihat dari nilai *Performance Ratio* yang sedikit lebih tinggi, serta produksi energi spesifik (*specific energy yield*) yang mencapai lebih dari 1.433 kWh/kWp/tahun pada konfigurasi modul monokristalin tanpa baterai.

Fenomena tersebut dapat dijelaskan oleh karakteristik operasi modul yang lebih seragam pada konfigurasi homogen. Penggunaan modul dengan spesifikasi teknis yang sama menyebabkan karakteristik tegangan, arus, koefisien temperatur, serta respons terhadap perubahan intensitas radiasi matahari menjadi lebih seragam. Hal ini sejalan dengan temuan Jordan et al. [14] yang menyatakan bahwa mismatch loss pada sistem fotovoltaik dapat

diminimalkan dengan penggunaan modul yang memiliki karakteristik homogen. Kondisi ini mampu meminimalkan rugi-rugi akibat *mismatch* antar modul, sehingga sistem bekerja lebih efisien dan menghasilkan energi listrik yang lebih tinggi.

Secara keseluruhan, pemilihan jenis modul fotovoltaik merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap kinerja PLTS atap, khususnya dalam aspek produksi energi tahunan dan kontribusi terhadap pemenuhan kebutuhan energi bangunan. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, konfigurasi modul monokristalin dengan baterai menjadi alternatif yang paling optimal karena menghasilkan produksi energi tertinggi, nilai *solar fraction* terbesar, serta *Performance Ratio* yang tinggi. Dengan demikian, konfigurasi tersebut direkomendasikan sebagai pilihan yang paling sesuai untuk implementasi PLTS atap pada Gardu Induk Binjai, terutama apabila tujuan utama pengembangan sistem adalah memaksimalkan produksi energi listrik dengan penentuan kapasitas yang sesuai dengan kebutuhan dan ketersediaan luas atap pada Gardu Induk (GI) Binjai. Hasil dari simulasi teknis keempat skenario disajikan pada Tabel 1 di bawah ini:

Tabel 1. Hasil Simulasi Produksi Energi PLTS Atap Setiap Skenario

Skenario	Daya PLTS	<i>E_{pv}</i>	Output Energy	SF	PR
	kWp	MWh/ Tahun	kWh/ kWp/ tahun	%	%
1	10,5	15,051	1.433	23,68	83,95
2	10,5	14,685	1.399	23,56	81,91
3	25,2	34,100	1.353	70,05	79,25
4	25,2	34	1.349	70,53	78,99

Sumber: Hasil simulasi PVsyst, diolah peneliti (2026).

Hasil Simulasi *Losses*

Berdasarkan hasil simulasi, setiap skenario menunjukkan karakteristik kerugian energi (*losses*) yang berbeda sesuai dengan jenis modul fotovoltaik dan penggunaan sistem penyimpanan energi. Secara umum, komponen kerugian yang diamati meliputi kerugian optik akibat sudut datang radiasi matahari (*IAM Factor on Global*), pengaruh intensitas radiasi, temperatur modul, kualitas modul, ketidakseragaman karakteristik modul (*module mismatch*), rugi-rugi penghantar, rugi-rugi inverter, konsumsi daya pada malam hari, serta kerugian tambahan yang timbul akibat proses pengisian dan pelepasan energi pada baterai.

Nilai IAM Factor on Global pada seluruh skenario memiliki besaran yang sama, yaitu - 3,31%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan modul monokristalin maupun polikristalin, serta penambahan baterai, tidak memberikan pengaruh terhadap besarnya kerugian optik akibat sudut datang cahaya. Kondisi tersebut disebabkan karena seluruh skenario menggunakan orientasi, kemiringan modul, dan kondisi radiasi matahari yang sama sehingga kehilangan energi akibat refleksi pada permukaan kaca modul juga relatif identik.

Kerugian akibat variasi intensitas radiasi (*PV Loss due to Irradiance*) menunjukkan perbedaan yang sangat kecil. Skenario 1 dan Skenario 3 yang menggunakan modul monokristalin masing-masing mengalami kerugian sebesar -0,86%, sedangkan Skenario 2 dan Skenario 4 yang menggunakan modul polikristalin sebesar -0,84%. Selisih tersebut relatif tidak

signifikan, sehingga disimpulkan bahwa jenis modul tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap kemampuan sistem dalam memanfaatkan variasi intensitas radiasi matahari selama periode simulasi.

Perbedaan yang lebih nyata terlihat pada kerugian akibat temperatur modul (PV Loss due to Temperature). Modul monokristalin pada Skenario 1 dan Skenario 3 mengalami kehilangan energi sebesar -8,40%, sedangkan modul polikristalin pada Skenario 2 dan Skenario 4 mencapai -10,37%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa modul polikristalin lebih sensitif terhadap peningkatan temperatur operasi dibandingkan modul monokristalin. Akibatnya, penurunan daya keluaran yang disebabkan oleh kenaikan temperatur menjadi lebih besar pada sistem yang menggunakan modul polikristalin. Temuan ini sejalan dengan karakteristik modul fotovoltaik, di mana koefisien temperatur modul monokristalin umumnya lebih rendah sehingga mampu mempertahankan performa yang lebih baik pada kondisi operasi bersuhu tinggi. Hal ini mengkonfirmasi hasil penelitian (Zhu et al., 2023) yang menyatakan bahwa modul monokristalin memiliki kinerja yang lebih unggul pada kondisi temperatur operasi tinggi dibandingkan modul polikristalin.

Pada parameter Module Quality Loss, Skenario 1 dan Skenario 3 memperoleh nilai +1,25%, sedangkan Skenario 2 dan Skenario 4 hanya sebesar +0,75%. Nilai positif tersebut mengindikasikan bahwa performa aktual modul yang digunakan sedikit lebih baik dibandingkan nilai nominal yang diasumsikan dalam simulasi. Besarnya nilai pada modul monokristalin menunjukkan bahwa kualitas modul tersebut memberikan kontribusi energi yang lebih tinggi dibandingkan modul polikristalin, sehingga secara keseluruhan mampu meningkatkan produksi energi sistem. Nilai Module Quality Loss yang positif ini menunjukkan bahwa modul yang digunakan memiliki kualitas di atas standar minimum yang diasumsikan dalam database PVsyst.

Nilai Module Array Mismatch Loss pada seluruh skenario sama, yaitu -2,00%. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat ketidaksesuaian karakteristik listrik antar modul relatif seragam pada seluruh konfigurasi sistem. Dengan demikian, perubahan jenis modul maupun penggunaan baterai tidak memberikan pengaruh terhadap rugi-rugi akibat *mismatch* modul.

Kerugian pada penghantar (*Ohmic Wiring Loss*) juga memperlihatkan perbedaan yang relatif kecil. Sistem yang menggunakan modul monokristalin memiliki rugi-rugi sebesar -0,98%, sedangkan sistem dengan modul polikristalin sebesar -1,01%. Selisih yang sangat kecil tersebut menunjukkan bahwa desain penghantar pada seluruh skenario telah memenuhi kriteria yang baik sehingga rugi-rugi akibat hambatan kabel dapat diminimalkan.

Perbedaan menarik terlihat pada Inverter Loss. Skenario 1 menunjukkan rugi-rugi inverter terbesar, yaitu -2,55%, diikuti oleh Skenario 2 sebesar -2,36%, Skenario 3 sebesar -2,05%, dan nilai terkecil terdapat pada Skenario 4 sebesar -1,91%. Penurunan nilai rugi-rugi inverter pada sistem yang menggunakan baterai menunjukkan bahwa pola operasi inverter menjadi lebih stabil karena sebagian energi dialirkan melalui sistem penyimpanan sebelum disuplai ke beban. Dengan demikian, efisiensi konversi energi pada sistem dengan baterai cenderung sedikit lebih baik daripada tanpa baterai.

Nilai Night Consumption juga menunjukkan kecenderungan yang hampir serupa. Skenario tanpa baterai memiliki konsumsi energi malam sebesar -0,16%, sedangkan pada sistem dengan baterai nilainya sedikit lebih rendah, yaitu -0,13%. Perbedaan ini relatif tidak memberikan dampak yang besar terhadap produksi energi tahunan.

Komponen kerugian tambahan hanya muncul pada sistem yang menggunakan baterai, yaitu Skenario 3 dan Skenario 4. Selama proses pengisian baterai terjadi Battery IN, Charger Loss masing-masing sebesar -1,80% dan -1,79%. Selanjutnya, Battery Global Loss tercatat sebesar -2,81% pada modul monokristalin dan -2,69% pada modul polikristalin, sedangkan Battery Out, Inverter Loss masing-masing sebesar -1,77% dan -1,75%. Meskipun penggunaan baterai menambah komponen kerugian pada sistem, keberadaan baterai memberikan keuntungan berupa kemampuan menyimpan kelebihan energi yang dihasilkan PLTS untuk dimanfaatkan ketika produksi energi surya menurun atau tidak tersedia. Selain itu, nilai Battery Stored Energy Balance yang bernilai positif, yaitu +0,15% pada Skenario 3 dan +0,17% pada Skenario 4, menunjukkan bahwa pada akhir periode simulasi masih terdapat energi yang tersimpan di dalam baterai sehingga sistem penyimpanan masih memiliki cadangan energi yang dapat dimanfaatkan.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa temperatur modul merupakan komponen kerugian terbesar pada seluruh skenario, terutama pada sistem yang menggunakan modul polikristalin. Sebaliknya, kerugian akibat intensitas radiasi, penghantar, *module mismatch*, dan konsumsi energi malam relatif kecil. Penggunaan modul monokristalin terbukti menghasilkan kerugian temperatur yang lebih rendah serta nilai *Module Quality Loss* yang lebih tinggi dibandingkan modul polikristalin, sehingga memberikan kinerja sistem yang lebih baik. Di sisi lain, penambahan baterai memang meningkatkan total kerugian sistem karena adanya proses pengisian, penyimpanan, dan pelepasan energi, namun konfigurasi tersebut memberikan fleksibilitas operasi yang lebih tinggi. Temuan ini menjelaskan bahwa rugi-rugi sistem PLTS merupakan akumulasi dari kerugian optik, temperatur, *module mismatch*, penghantar, inverter, dan sistem penyimpanan energi [14]. Secara keseluruhan, total rugi-rugi sistem bervariasi antara 17% hingga 22% dari energi potensial yang tersedia, di mana sistem dengan baterai menunjukkan total rugi-rugi yang lebih besar dibandingkan sistem tanpa baterai. Detail hasil *losses* disajikan pada Tabel 2 di bawah ini:

Tabel 2. Total *Losses* Setiap Skenario

Komponen & Faktor Kerugian	Satuan	Skenario			
		1	2	3	4
IAM Factor on Global	%	-3,31	-3,31	-3,31	- 3,31
PV Loss due to Irradiance	%	-0,86	-0,84	-0,86	- 0,84
PV Loss due to Temperature	%	-8,40	-10,37	-8,40	-10,37
Module Quality Loss	%	+1,25	+0,75	+1,25	+0,75
Module Array Mismatch Loss	%	-2	-2	-2	-2
Ohmic Wiring Loss	%	-0,98	-1,01	-0,98	-1,01
Inverter Loss	%	-2,55	-2,36	-2,05	-1,91
Night Consumption	%	-0,16	-0,16	-0,13	-0,13
Battery IN, Charger Loss	%	0	0	-1,80	-1,79
Battery Stored Energy Balance	%	0	0	+0,15	+0.17
Battery Global Loss	%	0	0	-2,81	-2,69
Battery Out, Inverter Loss	%	0	0	-1,77	-1,75

Sumber: Hasil simulasi PVsyst, diolah peneliti (2026).

Asumsi Finansial

Analisis kelayakan ekonomi pada penelitian ini dilakukan berdasarkan hasil simulasi sistem PLTS atap dengan mempertimbangkan bahwa seluruh investasi yang dikeluarkan ditujukan untuk memenuhi kebutuhan listrik konsumsi internal (*self-consumption*) Gardu Induk Binjai. Penerapan konsep ini diharapkan mampu mengurangi ketergantungan terhadap pasokan listrik dari jaringan PLN sekaligus meningkatkan pemanfaatan energi baru terbarukan sebagai pengganti sebagian energi fosil. Dengan demikian, implementasi PLTS atap tidak hanya memberikan manfaat dari sisi ekonomi melalui penghematan biaya energi, tetapi juga mendukung upaya peningkatan keberlanjutan sistem ketenagalistrikan.

Agar analisis kelayakan investasi dapat dilakukan secara sistematis dan menghasilkan hasil yang representatif, penelitian ini menetapkan sejumlah asumsi teknis dan finansial sebagai dasar perhitungan. Asumsi-asumsi tersebut disusun dengan mempertimbangkan karakteristik sistem PLTS, kondisi operasional Gardu Induk Binjai, serta parameter ekonomi yang relevan selama umur proyek. Penggunaan asumsi yang konsisten bertujuan untuk meminimalkan ketidakpastian dalam proses evaluasi sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan investasi.

Dalam perancangan kapasitas sistem, salah satu aspek yang menjadi perhatian utama adalah kesesuaian antara kapasitas PLTS dengan profil beban aktual. Kapasitas pembangkit dirancang agar sedekat mungkin dengan kebutuhan energi yang terjadi, sehingga energi listrik yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara maksimal oleh beban internal gardu induk. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi potensi kelebihan produksi (*excess energy*) yang tidak termanfaatkan, sekaligus meningkatkan tingkat pemanfaatan energi hasil pembangkitan (*self-consumption ratio*) sehingga investasi yang dilakukan menjadi lebih efektif dan memberikan manfaat ekonomi yang optimal.

Berdasarkan asumsi teknis tersebut, selanjutnya disusun asumsi finansial yang meliputi sumber pendanaan investasi, umur ekonomis proyek, tingkat diskonto, tingkat inflasi, tarif listrik, biaya pengadaan komponen utama, biaya instalasi, serta biaya operasi dan pemeliharaan selama masa operasi sistem. Seluruh parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam perhitungan indikator kelayakan ekonomi, seperti NPV, ROI, IRR, PBP dan LCOE. Rincian asumsi finansial yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3. dibawah ini :

Tabel 3. Asumsi Finansial

Parameter	Value	Unit	Source
Sumber modal	Modal mandiri (tidak pinjaman)		
Umur proyek	20	years	Estimasi
Diskonto	8	%/year	
Inflasi	1	%/year	Estimation
Tarif Listrik	1,444.7	IDR/kWh	(PT PLN Persero, 2026)
Biaya Inverter			
-Sun2000-8 kWac	29.700.000	Rp	(Tokopedia, 2026)
-Sun2000-10 kWac	51.000.000	Rp	
Biaya PV Module			
-JA Solar monokristalin 350 Wp	1.800.000	Rp	(alsolarstore, 2026)

-JA Solar polykristalin 350 Wp	2.200.000	Rp
Komponen Instalasi		
- Aksesoris Instalasi	1.000.000	Rp
- Combiner box	5.000.000	Rp
- Wiring	2.000.000	Rp
Instalasi		
- Instalasi per modul	50.000	Rp
- Instalasi per inverter	1.000.000	Rp
Pemeliharaan		
- Cleaning	2.000.000	Rp/year

Sumber: Data sekunder dan asumsi penelitian, diolah peneliti (2026).

Nilai Fixed-Feed-In-Tariff tidak dimasukkan dalam asumsi ekonomi. Hal ini sejalan dengan Peraturan Pemerintah yakni melalui kebijakan Permen ESDM Nomor 2 Tahun 2024, yang mengatur bahwa implementasi PLTS atap pada pelanggan yang terhubung dengan jaringan PLN diarahkan untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi listrik yang dihasilkan untuk kebutuhan sendiri (*self-consumption*), bukan untuk menyalurkan kelebihan energi ke jaringan melalui mekanisme ekspor-impor sebagaimana diatur pada regulasi sebelumnya. Dalam peraturan tersebut, mekanisme ekspor-impor energi listrik telah dihapus sehingga kelebihan energi yang tidak dimanfaatkan pelanggan tidak diperhitungkan sebagai pengurang tagihan listrik. Sehingga simulasi kelayakan ekonomi dilakukan berdasarkan hasil dari potensi *Self-Consumption Saving* yang didapatkan selama umur proyek yakni, 20 Tahun.

Hasil Simulasi Kelayakan Ekonomi

Analisis yang dilakukan untuk mengevaluasi tingkat keuntungan investasi pembangunan PLTS atap pada Gardu Induk Binjai berdasarkan beberapa indikator ekonomi, yaitu Capital Expenditure (CAPEX), Operational Expenditure (OPEX), Levelized Cost of Energy (LCOE), NPV, PBP, IRR. Evaluasi dilakukan terhadap empat skenario sistem, yaitu Skenario 1 (modul monokristalin tanpa baterai), Skenario 2 (modul polikristalin tanpa baterai), Skenario 3 (modul monokristalin dengan baterai), dan Skenario 4 (modul polikristalin dengan baterai). Seluruh perhitungan didasarkan pada umur proyek selama 20 tahun dengan tingkat diskonto sebesar 8%, sehingga hasil yang diperoleh dapat menggambarkan kelayakan investasi selama masa operasi sistem.

Hasil analisis menunjukkan bahwa konfigurasi sistem berpengaruh besar terhadap besarnya biaya investasi maupun tingkat keuntungan yang dihasilkan. Dari sisi Capital Expenditure (CAPEX), sistem tanpa baterai membutuhkan investasi yang jauh lebih rendah dibandingkan sistem yang menggunakan baterai. Skenario 2 memiliki kebutuhan investasi paling kecil, yaitu sebesar Rp98,2 juta, sedangkan Skenario 1 memerlukan investasi sebesar Rp110,2 juta. Perbedaan tersebut terutama dipengaruhi oleh harga modul monokristalin yang relatif lebih tinggi dibandingkan modul polikristalin. Sebaliknya, penggunaan baterai menyebabkan peningkatan investasi yang sangat signifikan. Skenario 3 membutuhkan investasi sebesar Rp439,434 juta, sedangkan Skenario 4 sebesar Rp410,634 juta. Peningkatan investasi tersebut disebabkan oleh tambahan biaya pengadaan baterai, *battery charger*, sistem

proteksi, perangkat pengendali baterai, serta komponen instalasi lainnya yang diperlukan pada sistem penyimpanan energi.

Perbedaan investasi awal tersebut diikuti oleh perubahan pada Operational Expenditure (OPEX). Sistem tanpa baterai hanya membutuhkan biaya operasi dan pemeliharaan sekitar Rp2,0–2,2 juta per tahun, sedangkan sistem yang menggunakan baterai memerlukan biaya operasi yang lebih tinggi, yaitu antara Rp2,20–2,42 juta per tahun. Walaupun peningkatan biaya operasi tidak sebesar peningkatan CAPEX, keberadaan baterai tetap menambah kebutuhan inspeksi berkala, pemeliharaan sistem pengisian, pemantauan kondisi baterai, serta kemungkinan penggantian komponen selama umur proyek.

Jika ditinjau dari Levelized Cost of Energy (LCOE), kedua skenario tanpa baterai menghasilkan biaya produksi energi yang lebih rendah dibandingkan sistem dengan baterai. Nilai LCOE terendah diperoleh pada Skenario 2, yaitu sebesar Rp827,398/kWh, kemudian diikuti oleh Skenario 1 sebesar Rp902,749/kWh. Sebaliknya, penggunaan baterai menyebabkan biaya pembangkitan meningkat menjadi Rp1.382/kWh pada Skenario 3 dan Rp1.294/kWh pada Skenario 4. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa investasi tambahan pada sistem penyimpanan energi serta adanya rugi-rugi selama proses pengisian dan pelepasan energi menyebabkan biaya produksi listrik menjadi lebih tinggi. Meskipun demikian, seluruh nilai LCOE masih berada di bawah tarif listrik PLN sebesar Rp1.444,7/kWh, sehingga energi yang dihasilkan PLTS masih lebih ekonomis dibandingkan pembelian energi dari jaringan PLN.

Dari aspek keuntungan investasi, seluruh skenario menghasilkan NPV yang bernilai positif. Hal ini menunjukkan bahwa manfaat ekonomi yang diperoleh selama umur proyek masih lebih besar dibandingkan total biaya investasi dan biaya operasional setelah memperhitungkan faktor nilai waktu uang (*time value of money*). Nilai NPV tertinggi diperoleh pada Skenario 4, yaitu sebesar Rp41,723 juta, diikuti oleh Skenario 2 sebesar Rp38,702 juta. Selanjutnya, Skenario 1 menghasilkan NPV sebesar Rp25,396 juta, sedangkan Skenario 3 memiliki NPV sebesar Rp7,606 juta. Nilai tersebut menunjukkan bahwa seluruh alternatif investasi layak secara ekonomi, meskipun tingkat keuntungan bersih yang diperoleh pada masing-masing skenario berbeda.

Hasil yang berbeda terlihat pada indikator Return on Investment (ROI). Skenario 2 menghasilkan ROI tertinggi sebesar 39,4%, diikuti oleh Skenario 1 sebesar 23%. Sementara itu, penggunaan baterai menyebabkan ROI menurun cukup signifikan, yaitu menjadi 10,2% pada Skenario 4 dan hanya 1,7% pada Skenario 3. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan biaya investasi akibat penggunaan baterai belum sepenuhnya diimbangi oleh peningkatan manfaat ekonomi yang dihasilkan selama umur proyek. Dengan kata lain, dari sudut pandang keuntungan investasi, konfigurasi tanpa baterai memberikan pengembalian yang lebih menarik dibandingkan sistem yang menggunakan baterai.

Kondisi tersebut juga tercermin pada Payback Period (PBP). Skenario 2 memiliki waktu pengembalian investasi tercepat, yaitu 10,7 tahun, kemudian diikuti oleh Skenario 1 selama 13,1 tahun. Sebaliknya, konfigurasi dengan baterai membutuhkan waktu pengembalian yang lebih panjang, yaitu 16,2 tahun pada Skenario 4 dan 19,1 tahun pada Skenario 3. Walaupun seluruh skenario masih mampu mengembalikan investasi sebelum umur proyek berakhir, penambahan baterai menyebabkan periode pengembalian modal menjadi lebih lama karena tingginya biaya investasi awal.

Hasil evaluasi menggunakan Internal Rate of Return (IRR) juga menunjukkan bahwa seluruh skenario memenuhi kriteria kelayakan investasi. Nilai IRR masing-masing adalah 10,99% pada Skenario 1, 13% pada Skenario 2, 8,24% pada Skenario 3, dan 9,35% pada Skenario 4. Seluruh nilai tersebut berada di atas tingkat diskonto sebesar 8%, sehingga investasi pada keempat konfigurasi masih dapat dinyatakan layak secara finansial.

Jika seluruh indikator dianalisis secara bersamaan, terlihat bahwa Skenario 2 (PLTS atap menggunakan modul polikristalin tanpa baterai) memberikan kinerja ekonomi yang paling baik. Hal tersebut ditunjukkan oleh nilai CAPEX yang paling rendah, biaya pembangkitan energi (LCOE) yang paling kecil, ROI dan IRR yang paling tinggi, serta waktu pengembalian investasi yang paling singkat. Meskipun nilai NPV tertinggi diperoleh pada Skenario 4, selisihnya terhadap Skenario 2 relatif kecil dibandingkan tambahan investasi yang harus dikeluarkan untuk sistem baterai. Oleh karena itu, dari sudut pandang efisiensi investasi, konfigurasi tanpa baterai masih menjadi alternatif yang lebih menguntungkan.

Sebaliknya, Skenario 3 (modul monokristalin dengan baterai) menunjukkan performa ekonomi yang paling rendah. Tingginya biaya investasi menyebabkan nilai LCOE meningkat, ROI menjadi paling kecil, serta waktu pengembalian investasi hampir mendekati umur proyek. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan baterai belum mampu memberikan manfaat ekonomi yang sebanding dengan tambahan investasi.

Walaupun demikian, sistem dengan baterai tetap memiliki keunggulan dari sisi operasional. Keberadaan baterai memungkinkan energi listrik yang dihasilkan PLTS disimpan terlebih dahulu sebelum digunakan, sehingga dapat meningkatkan kontinuitas pasokan listrik ketika intensitas radiasi matahari menurun. Pemilihan konfigurasi sistem tidak hanya dipengaruhi oleh indikator ekonomi, tetapi juga kebutuhan keandalan.

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa keempat skenario memenuhi kriteria kelayakan investasi, karena seluruhnya menghasilkan NPV bernilai positif, IRR lebih besar daripada tingkat diskonto 8%, LCOE lebih rendah daripada tarif listrik PLN, serta Payback Period lebih pendek daripada umur proyek selama 20 tahun. Hasil ekonomi disajikan pada Tabel 4. dibawah ini :

Tabel 4. Hasil Simulasi Kelayakan Ekonomi Setiap Skenario

Parameter	Satuan	Skenario			
		1	2	3	4
CAPEX	Ribu Rp	110.200	98.200	439.434	410.634
OPEX	Ribu Rp/tahun	2.200	2.000	2.422	2.202
LCOE	Rp/kWh	902,749	827,398	1.382	1.294
NPV	Ribu Rp	25.396	38.702	7.606	41.723
ROI	%	23	39,4	1,7	10,2
PBP	Tahun	13,1	10,7	19,1	16,2
IRR	%	10,99	13	8,24	9,35

Sumber: Hasil analisis ekonomi, diolah peneliti (2026).

Rekomendasi Skenario Terbaik

Berdasarkan hasil simulasi teknis dan analisis kelayakan ekonomi, keempat skenario menunjukkan karakteristik operasi yang berbeda. Skenario 1, yaitu modul monokristalin tanpa

baterai, dan Skenario 2, yaitu modul polikristalin tanpa baterai, merupakan sistem PLTS atap on-grid yang beroperasi untuk memenuhi kebutuhan listrik Gardu Induk Binjai pada periode LWBP. Energi yang dihasilkan pada siang hari digunakan secara langsung oleh beban internal, sedangkan kebutuhan listrik di luar waktu produksi PLTS tetap dipenuhi dari jaringan PLN. Sebaliknya, Skenario 3 dan Skenario 4 dilengkapi sistem penyimpanan energi sehingga energi listrik dapat disimpan dan digunakan kembali pada malam hari. Dengan demikian, kedua skenario berbaterai dirancang untuk mendukung kebutuhan energi selama satu hari penuh.

Perbedaan pola operasi tersebut menyebabkan hasil ekonomi tidak dapat dibandingkan hanya berdasarkan besarnya investasi awal. Skenario tanpa baterai mempunyai CAPEX dan OPEX yang lebih rendah karena tidak memerlukan baterai, *battery charger*, perangkat pengendali, serta sistem proteksi tambahan. Oleh sebab itu, Skenario 1 dan 2 menghasilkan nilai LCOE yang lebih rendah, ROI dan IRR yang lebih tinggi, serta periode pengembalian modal yang lebih singkat. Namun, manfaat yang diberikan terbatas pada pengurangan konsumsi listrik dari jaringan selama periode LWBP dan tidak menyediakan suplai energi mandiri pada malam hari.

Sementara itu, Skenario 3 dan 4 membutuhkan investasi yang jauh lebih besar karena kapasitas PLTS tidak hanya dipakai untuk menyuplai beban siang hari, tetapi juga untuk mengisi baterai yang akan digunakan ketika PLTS tidak berproduksi. Konfigurasi ini menambah komponen rugi-rugi berupa *Battery IN Charger Loss*, *Battery Global Loss*, dan *Battery Out Inverter Loss*. Akibatnya, nilai LCOE meningkat dan waktu pengembalian investasi menjadi lebih panjang. Walaupun demikian, sistem berbaterai memiliki manfaat operasional yang lebih luas karena dapat menyediakan energi selama 24 jam, mengurangi konsumsi listrik dari jaringan pada malam hari, dan memberikan cadangan energi ketika suplai dari jaringan mengalami gangguan.

Dari sisi teknis, modul monokristalin pada Skenario 1 dan 3 menunjukkan kehilangan akibat temperatur sebesar 8,40%, lebih rendah daripada modul polikristalin pada Skenario 2 dan 4 yang mencapai 10,37%. Hal ini menunjukkan bahwa modul monokristalin mampu mempertahankan performa yang lebih baik pada temperatur operasi yang tinggi. Akan tetapi, dari sisi ekonomi, modul polikristalin tetap memberikan keuntungan karena biaya investasinya lebih rendah.

Pada konfigurasi dengan baterai, Skenario 4 memberikan hasil ekonomi yang lebih baik daripada Skenario 3. Skenario 4 membutuhkan CAPEX sebesar Rp410,634 juta, lebih rendah dibandingkan Skenario 3 sebesar Rp439,434 juta. Selain itu, Skenario 4 memiliki LCOE sebesar Rp1.294/kWh, ROI sebesar 10,2%, IRR sebesar 9,35%, dan Payback Period selama 16,2 tahun. Hasil tersebut lebih baik dibandingkan Skenario 3 yang memiliki LCOE sebesar Rp1.382/kWh, ROI sebesar 5,7%, IRR sebesar 8,24%, dan periode pengembalian selama 19,1 tahun. Oleh karena itu, apabila sistem harus melayani kebutuhan listrik selama satu hari penuh, maka Skenario 4 merupakan konfigurasi berbaterai yang lebih layak secara ekonomi.

Dengan demikian, rekomendasi tidak hanya menghasilkan satu pilihan, tetapi perlu disesuaikan dengan tujuan pengoperasian sistem. Apabila sasaran utama penelitian adalah mengurangi biaya listrik pada periode LWBP dengan investasi yang rendah dan tingkat pengembalian yang lebih cepat, maka Skenario 2 modul polikristalin tanpa baterai merupakan alternatif terbaik (Kondisi 1). Konfigurasi ini sesuai untuk sistem on-grid berbasis *self-*

consumption, karena energi PLTS langsung digunakan oleh beban pada saat pembangkitan berlangsung.

Namun, apabila tujuan utama adalah meningkatkan kemandirian energi dan memenuhi kebutuhan listrik selama 24 jam, maka Skenario 4 modul polikristalin dengan baterai lebih direkomendasikan dibandingkan Skenario 3 (Kondisi 2). Meskipun investasi awalnya lebih tinggi daripada sistem tanpa baterai, Skenario 4 menawarkan kontinuitas pemanfaatan energi PLTS hingga malam hari dengan hasil kelayakan ekonomi yang masih memenuhi kriteria, yaitu NPV positif dan IRR di atas tingkat diskonto 8%. Detail Rekomendasi disajikan pada Tabel 5 berikut :

Tabel 5. Hasil Simulasi Kelayakan Ekonomi Setiap Skenario

Parameter	Jumlah / Satuan	Kondisi 1	Kondisi 2
Kapasitas Sistem (Pnom)	kWp	10,5	25,2
Modul PV	120 unit	JA Solar Polycrystalin (350 Wp)	JA Solar Polycrystalin (350 Wp)
Inverter	1-2 unit	Huawei SUN2000 8 KTL	Huawei SUN2000 10 KTL
Performance Ratio(PR)	%	81,91	78,99
Solar Fraction (SF)	%	23,56	70,53
CAPEX	Ribu Rp	98.200	410.634
OPEX	Ribu Rp/tahun	2.000	2.202
LCOE	Rp/kWh	827,398	1.294
NPV	Ribu Rp	38.702	41.723
ROI	%	39,4	10,2
PBP	Tahun	10,7	16,2
IRR	%	13	9,35

Sumber: Hasil analisis ekonomi, diolah peneliti (2026).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi teknis serta analisis kelayakan ekonomi terhadap pemasangan PLTS Atap pada Gardu Induk (GI) Binjai, dapat disimpulkan bahwa secara keseluruhan penerapan PLTS atap pada Gardu Induk Binjai layak secara teknis, baik menggunakan modul monokristalin maupun polikristalin, dengan maupun tanpa baterai. Modul monokristalin menghasilkan produksi energi dan Performance Ratio yang sedikit lebih tinggi dibandingkan modul polikristalin, dengan selisih PR sekitar 2% pada sistem tanpa baterai dan 0,26% pada sistem dengan baterai, sedangkan modul polikristalin memberikan kinerja yang kompetitif dengan biaya investasi yang lebih rendah sekitar 10,9% dibandingkan modul monokristalin untuk sistem tanpa baterai. Kapasitas optimum PLTS sendiri bergantung pada tujuan operasional sistem, di mana untuk sistem on-grid tanpa baterai yang beroperasi pada periode Luar Waktu Beban (LWBP) diperoleh kapasitas optimum sebesar 10,5 kWp, sementara untuk sistem yang mampu menyuplai beban selama 24 jam diperlukan kapasitas sekitar 25,2 kWp yang dilengkapi baterai sehingga pemanfaatan energi surya (solar fraction) menjadi lebih tinggi (meningkat dari 23,56% menjadi 70,53% pada konfigurasi polikristalin). Dari sisi kelayakan ekonomi, seluruh skenario dinyatakan layak karena memiliki NPV positif

dan IRR di atas tingkat diskonto (8%), dengan Skenario 2 (modul polikristalin tanpa baterai) menjadi alternatif paling ekonomis karena memiliki CAPEX terendah (Rp98,2 juta), LCOE terendah (Rp827,398/kWh), ROI tertinggi (39,4%), IRR tertinggi (13%), dan Payback Period terbaik (10,7 tahun), sedangkan Skenario 4 (modul polikristalin dengan baterai) lebih sesuai apabila prioritas utamanya adalah kontinuitas suplai energi selama 24 jam dengan solar fraction mencapai 70,53%. Berdasarkan evaluasi teknis dan ekonomi tersebut, konfigurasi PLTS atap menggunakan modul polikristalin merupakan alternatif yang paling direkomendasikan, di mana sistem tanpa baterai lebih tepat digunakan untuk penghematan biaya dan pemenuhan beban pada periode LWBP, sedangkan sistem dengan baterai lebih sesuai untuk meningkatkan kemandirian energi dan kontinuitas pasokan. Hasil penelitian ini turut mendukung implementasi PLTS atap berbasis self-consumption sejalan dengan ketentuan Permen ESDM Nomor 2 Tahun 2024.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan analisis sensitivitas terhadap perubahan parameter ekonomi seperti tingkat diskonto, inflasi, dan harga komponen, serta mempertimbangkan skenario integrasi PLTS atap dengan sistem penyimpanan energi yang lebih besar atau teknologi baterai yang lebih canggih seperti baterai lithium-ion dengan siklus hidup yang lebih panjang. Selain itu, penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi potensi pengurangan emisi karbon dari implementasi PLTS atap pada gardu induk serta menganalisis pengaruh variasi iklim dan perubahan pola beban terhadap kinerja sistem dalam jangka panjang. Kajian komparatif dengan gardu induk lain di berbagai wilayah Indonesia juga direkomendasikan untuk memperoleh generalisasi hasil yang lebih luas.

REFERENSI

- Başaran, K., Özdemir, M. T., & Bayrak, G. (2025). Sizing and Techno-Economic Analysis of Utility-Scale PV Systems with Energy Storage Systems in Factory Buildings: An Application Study. *Applied Sciences*, 15(7), 3876. <https://doi.org/10.3390/app15073876>
- Ekacitta, P. C., & Iyi, D. (2025). Feasibility Study of the Development of Ground-Mounted Solar Plants. *Indonesian Journal of Energy*, 8(1), 87–102. <https://doi.org/10.33116/ije.v8i1.269>
- Falih, H., Hamed, A. J., & Khalifa, A. H. N. (2022). Techno-economic assessment of a hybrid connected PV solar system. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 30(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s44189-022-00003-7>
- Hardyanti, A. D. H., Koerniawan, T., Fsj, M. F., Sukmajati, S., Pahiyanti, N. G., & Nayusrizal, N. (2026). Prediksi Energi Dan Performance Ratio PLTS On-Grid 21 kWp Pada Perumahan Di Lampung Menggunakan PVsyst. *Journal of Authentic Research*, 5(1), 132–146. <https://doi.org/10.36312/5vb50p39>
- Jordan, D. C., Anderson, K., Perry, K., Muller, M., Deceglie, M., White, R., & Deline, C. (2022). Photovoltaic fleet degradation insights. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(10), 1166–1175. <https://doi.org/10.1002/pip.3566>
- Leeabai, N., Sakaraphantip, N., Kunbuala, N., Roongrueng, K., & Nukunudompanich, M. (2025). Integrated Assessment of Rooftop Photovoltaic Systems and Carbon Footprint for Organization: A Case Study of an Educational Facility in Thailand. *Energies*, 18(10), 2485. <https://doi.org/10.3390/en18102485>
- Li, C., Zhou, D., & Zheng, Y. (2018). Techno-economic comparative study of grid-connected PV power systems in five climate zones, China. *Energy*, 165, 1352–1369. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.062>

- Makhubele, W. J., Thango, B. A., & Ogudo, K. A. (2025). Evaluating Rooftop Solar Photovoltaics and Battery Storage for Residential Energy Sustainability in Benoni, South Africa. *Processes*, 13(6), 1828. <https://doi.org/10.3390/pr13061828>
- Nugraha, R. A., Facta, M., & Syakur, A. (2024). Analisis Perancangan dan Pemasangan PLTS Kapasitas 1,1 MWp pada Pabrik Farmasi di Kota Semarang. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, Dan Teknik Elektronika*, 12(2), 378. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v12i2.378>
- Priyohutomo, A., Riawan, D. C., & Soedibyo, S. (2021). Studi Kelayakan Water Pumped Energy Storage Sebagai Penyimpanan Energi PLTS Mandiri Pada Daerah Terisolir. *Jurnal FORTECH*, 2(1), 9–18. <https://doi.org/10.32492/fortech.v2i1.234>
- Riawan, G., Kumara, I. N. S., & Ariastina, W. G. (2022). Analisis Performansi dan Ekonomi PLTS Atap 10 kWp pada Bangunan Rumah Tangga di Desa Batuan Gianyar. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 21(1), 63. <https://doi.org/10.24843/MITE.2022.v21i01.P09>
- 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>
- Shahsavari, A., & Akbari, M. (2018). Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 275–291. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065>
- Tarigan, E. (2024). 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*, 14(1), 412–417. <https://doi.org/10.32479/ijeep.15277>
- Yoomak, S., Patcharoen, T., & Ngaopitakkul, A. (2019). Performance and Economic Evaluation of Solar Rooftop Systems in Different Regions of Thailand. *Sustainability*, 11(23), 6647. <https://doi.org/10.3390/su11236647>
- Zhu, X., Lv, Y., Bi, J., Jiang, M., Su, Y., & Du, T. (2023). Techno-Economic Analysis of Rooftop Photovoltaic System under Different Scenarios in China University Campuses. *Energies*, 16(7), 3123. <https://doi.org/10.3390/en16073123>