



Analisis Tekno-Ekonomi *PLTS on-Grid* dan *Battery Energy Storage System* untuk SPKLU di Rest Area Jalan Tol KM 57 dan KM 164b

Asep Akbar Azhari*, I Made Indradjaja Marcus Brunner

Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: ase2310006@itpln.ac.id*, imade.brunner@itpln.ac.id

Keywords:

PLTS on-grid; BESS; SPKLU;
zero export; *Electric Vehicle*.

Abstract

The growth of electric vehicles increases the need for reliable public electric vehicle charging stations, particularly at toll-road rest areas. This study evaluates on-grid solar photovoltaic (PV) and Battery Energy Storage System (BESS) utilization for charging stations at KM57 of the Jakarta–Cikampek Toll Road and KM164B of the Cikopo–Palimanan Toll Road. A quantitative-descriptive method integrates ArcGIS Pro spatial analysis, Global Solar Atlas solar-resource data, charging energy demand, PV and BESS sizing, zero-export operation, and economic assessment. Potential PV areas are 3,437.001 m² and 4,394.434 m². Annual charging demands are 84,279 and 37,979 kWh, with specific PV outputs of 1,447.2 and 1,481.7 kWh/kWp/year. Recommended PV capacities are 58.30 kWp (106 modules of 550 Wp) and 25.85 kWp (47 modules), producing 84,371.76 and 38,301.95 kWh/year. Recommended BESS ratings are 500 kW/700 kWh and 60 kW/100 kWh for backup and peak shaving. For a 25-year project life and 10% discount rate, PV-only configurations yield NPVs of IDR 46.11 million and IDR 25.84 million and IRRs of 10.95% and 11.20%. LCOEs are IDR 1,355.35/kWh and IDR 1,333.58/kWh, below the PLN tariff of IDR 1,444.70/kWh. PV+BESS is financially infeasible under the adopted assumptions due to dominant battery costs. Demand-based PV is therefore marginally feasible, while BESS is better justified by reliability, backup, and peak-shaving value.

Kata Kunci:

PLTS On-Grid; BESS; SPKLU;
Zero Export; Kendaraan Listrik.

Abstrak

Pertumbuhan kendaraan listrik meningkatkan kebutuhan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) yang andal, terutama pada rest area jalan tol. Penelitian ini menganalisis pemanfaatan *PLTS on-grid* dan *Battery Energy Storage System* (BESS) untuk mendukung operasional SPKLU di Rest Area KM 57 Jalan Tol Jakarta–Cikampek dan KM 164B Jalan Tol Cikopo–Palimanan. Metode kuantitatif-deskriptif mengintegrasikan analisis spasial ArcGIS Pro, data potensi energi surya Global Solar Atlas, kebutuhan energi SPKLU, penentuan kapasitas PLTS dan BESS, skema zero export, serta analisis ekonomi. Luasan potensial mencapai 3.437,001 m² di KM57 dan 4.394,434 m² di KM164B. Kebutuhan energi tahunan masing-masing 84.279 dan 37.979 kWh, sedangkan specific PV output sebesar 1.447,2 dan 1.481,7 kWh/kWp/tahun. Kapasitas PLTS yang direkomendasikan adalah 58,30 kWp (106 modul 550 Wp) dan 25,85 kWp (47 modul), menghasilkan 84.371,76 dan 38.301,95 kWh/tahun. BESS yang direkomendasikan sebesar 500

kW/700 kWh dan 60 kW/100 kWh untuk fungsi backup dan peak shaving. Dengan umur proyek 25 tahun dan discount rate 10%, skenario PLTS tanpa BESS menghasilkan NPV Rp46.113.530 dan IRR 10,95% di KM57 serta NPV Rp25.843.379 dan IRR 11,20% di KM164B. LCOE masing-masing Rp1.355,35/kWh dan Rp1.333,58/kWh, lebih rendah dari tarif PLN Rp1.444,70/kWh. Skenario PLTS+BESS belum layak secara finansial akibat dominasi biaya baterai. Hasil menunjukkan PLTS berbasis kebutuhan beban layak secara marginal, sedangkan BESS lebih tepat diposisikan sebagai investasi keandalan, backup, dan peak shaving.

PENDAHULUAN

Perkembangan kendaraan listrik merupakan bagian penting dari transisi menuju sistem transportasi rendah karbon. International Energy Agency (2024) menunjukkan bahwa elektrifikasi transportasi terus berkembang secara global, sehingga ketersediaan infrastruktur pengisian menjadi salah satu faktor pendukung utama. Di Indonesia, pengembangan SPKLU juga didukung oleh kebijakan penyediaan infrastruktur pengisian listrik untuk kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (Kementerian ESDM, 2020).

Rest area jalan tol mempunyai karakteristik strategis karena melayani perjalanan antarkota dan membutuhkan pengisian berdaya tinggi dengan tingkat keandalan yang memadai. *Fast charger* dan *ultra-fast charger* dapat meningkatkan beban sesaat jaringan, sementara pertumbuhan transaksi akan meningkatkan kebutuhan energi tahunan. Integrasi PLTS dapat mengurangi pembelian energi dari jaringan pada periode penyinaran, sedangkan BESS dapat menyediakan fungsi penyimpanan, backup dan peak shaving. IRENA (2017) menempatkan penyimpanan energi sebagai salah satu teknologi pendukung integrasi energi terbarukan, tetapi kelayakan ekonominya sangat dipengaruhi biaya investasi.

Urgensi penelitian ini didorong oleh meningkatnya adopsi kendaraan listrik di Indonesia yang menuntut ketersediaan infrastruktur pengisian yang andal dan berkelanjutan. Berdasarkan data *International Energy Agency* (2024), jumlah kendaraan listrik global terus meningkat, dan Indonesia menargetkan percepatan elektrifikasi transportasi sebagai bagian dari upaya penurunan emisi karbon. Rest area jalan tol merupakan lokasi strategis untuk pengembangan SPKLU karena melayani perjalanan antarkota yang membutuhkan pengisian daya cepat. Namun, ketergantungan penuh pada jaringan listrik PLN berisiko menimbulkan beban puncak tambahan dan meningkatkan emisi karbon, terutama jika sumber listrik masih berbasis fosil (Wirawan, 2025). Integrasi PLTS dan BESS menjadi alternatif untuk mengurangi ketergantungan pada jaringan dan meningkatkan keberlanjutan operasional SPKLU, namun kelayakan ekonominya perlu dikaji secara komprehensif sebelum implementasi.

Studi terdahulu telah membahas PLTS grid-interactive (Azzahra et al., 2019), pemodelan radiasi surya untuk perencanaan PLTS (Christiono et al., 2023), penerapan BESS pada sistem tenaga (Arifin et al., 2024), dan penggunaan BESS untuk menurunkan biaya produksi listrik pada sistem PLTS (Arifin & Fitri, 2023). Namun, kebutuhan praktis pada SPKLU rest area memerlukan analisis yang menghubungkan potensi spasial, sumber daya surya, profil kebutuhan energi charging station, sizing PLTS, sizing BESS, strategi zero export, dan indikator kelayakan ekonomi dalam satu kerangka.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan demand-based sizing untuk dua rest area dengan karakteristik charger dan tingkat kebutuhan energi berbeda. Kapasitas PLTS tidak dimaksimalkan berdasarkan seluruh luasan potensial, tetapi disesuaikan dengan kebutuhan energi SPKLU dalam skema zero export. Selain itu, penelitian membandingkan kelayakan PLTS tanpa BESS dan PLTS+BESS sehingga fungsi ekonomi BESS dapat dibedakan dari fungsi keandalannya.

Tujuan penelitian adalah menganalisis potensi area dan energi surya, menentukan kapasitas PLTS dan BESS, mengevaluasi integrasi PLTS–BESS–PLN, serta menilai kelayakan ekonomi pada Rest Area KM57 dan KM164B.

METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan desain kuantitatif-deskriptif pada Rest Area KM57 Jalan Tol Jakarta–Cikampek arah Cikampek dan Rest Area KM164B Jalan Tol Cikopo–Palimanan arah Jakarta. Tahapan penelitian terdiri atas: (1) analisis spasial lokasi; (2) analisis potensi energi surya; (3) analisis kebutuhan energi SPKLU; (4) sizing PLTS; (5) sizing BESS; (6) penyusunan mode operasi PLTS–BESS–PLN; dan (7) analisis ekonomi.

Analisis spasial dilakukan menggunakan ArcGIS Pro untuk mendigitasi area potensial pemasangan modul. Parameter energi surya menggunakan specific photovoltaic power output dari Global Solar Atlas. Kapasitas PLTS ditentukan dari kebutuhan energi tahunan dibagi specific PV output, kemudian disesuaikan dengan jumlah modul 550 Wp. Pendekatan ini digunakan karena sistem dirancang tanpa ekspor energi ke jaringan PLN.

Kapasitas BESS dirancang untuk mendukung backup dan peak shaving. Pada penelitian ini, dukungan operasional ditetapkan sekitar satu jam dengan mempertimbangkan daya charger yang akan didukung, kapasitas energi, State of Charge, dan kebutuhan cadangan. Alur operasi memprioritaskan energi PLTS untuk beban SPKLU, surplus untuk pengisian BESS, BESS untuk dukungan beban terpilih, dan PLN sebagai sumber penyeimbang. Apabila BESS penuh dan produksi PLTS melebihi beban, *zero-export controller* membatasi keluaran PLTS.

Kelayakan ekonomi dianalisis selama 25 tahun dengan tingkat diskonto 10%. Indikator yang digunakan adalah *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *simple payback period*, dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE). Tarif pembanding PLN yang digunakan dalam tesis adalah Rp1.444,70/kWh. Dua skenario dibandingkan, yaitu PLTS tanpa BESS dan PLTS+BESS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Potensi Spasial dan Energi Surya

Hasil digitasi menunjukkan area potensial sebesar 3.437,001 m² di KM57 dan 4.394,434 m² di KM164B. Specific PV output sebesar 1.447,2 kWh/kWp/tahun di KM57 dan 1.481,7 kWh/kWp/tahun di KM164B. Dengan demikian, KM164B mempunyai produktivitas energi surya spesifik sedikit lebih tinggi, sedangkan kedua lokasi memiliki area yang jauh lebih besar daripada kebutuhan aktual sistem yang dioptimalkan.

Kebutuhan SPKLU dan Kapasitas PLTS

Kebutuhan energi SPKLU diperkirakan sebesar 84.279 kWh/tahun di KM57 dan 37.979 kWh/tahun di KM164B. Berdasarkan kebutuhan tersebut, kapasitas aktual PLTS yang direkomendasikan adalah 58,30 kWp di KM57 atau 106 modul 550 Wp dan 25,85 kWp di

KM164B atau 47 modul. Produksi energi tahunan masing-masing diperkirakan 84.371,76 kWh dan 38.301,95 kWh.

Tabel 1. Ringkasan hasil teknis kedua lokasi.

Parameter	KM57	KM164B	Satuan	Makna
Area potensial	3.437,001	4.394,434	m ²	Area bukan kendala utama
Kebutuhan energi	84.279	37.979	kWh/tahun	Basis sizing PLTS
Specific PV output	1.447,2	1.481,7	kWh/kWp/tahun	KM164B sedikit lebih produktif
Kapasitas PLTS	58,30	25,85	kWp	Demand-based sizing
Produksi PLTS	84.371,76	38.301,95	kWh/tahun	Mendekati neraca energi tahunan
BESS	500/700	60/100	kW/kWh	Backup dan peak shaving

Produksi PLTS secara tahunan mendekati kebutuhan energi SPKLU. Namun, kesetaraan neraca energi tahunan tidak berarti seluruh kebutuhan SPKLU dapat dipenuhi PLTS setiap saat. Ketidaksamaan waktu antara produksi surya dan transaksi charging menyebabkan PLN tetap diperlukan pada malam hari, cuaca rendah iradiasi, atau ketika terjadi lonjakan daya.

Penentuan dan Peran BESS

BESS yang direkomendasikan adalah 500 kW/700 kWh untuk KM57 dan 60 kW/100 kWh untuk KM164B. Perbedaan kapasitas menunjukkan pentingnya desain spesifik lokasi. KM57 memiliki beban charging yang lebih besar sehingga memerlukan kapasitas daya dan energi BESS lebih tinggi. Secara teknis, BESS berfungsi sebagai sumber backup jangka pendek, media penyimpanan surplus PLTS, dan instrumen peak shaving. Arifin et al. (2024) juga menunjukkan bahwa BESS dapat mendukung aspek operasi sistem tenaga, sedangkan IRENA (2017) menekankan peran storage dalam integrasi energi terbarukan.

Dalam skema zero export, keberadaan BESS dapat meningkatkan fleksibilitas pemanfaatan energi surya, tetapi tidak menghilangkan kemungkinan curtailment. Ketika SOC baterai mencapai batas atas dan beban SPKLU lebih kecil dari produksi PLTS, output inverter perlu dibatasi agar energi tidak diekspor ke jaringan.

Analisis Kelayakan Ekonomi

Tabel 2. Perbandingan kelayakan ekonomi PLTS dan PLTS+BESS.

Lokasi	Skenario	NPV	IRR	Payback	LCOE
KM57	PLTS	Rp46.113.530	10,95%	±9 tahun	Rp1.355,35/kWh
KM57	PLTS+BESS	-Rp8.663.526.265	Tidak terbentuk	>25 tahun	Rp14.500,63/kWh
KM164B	PLTS	Rp25.843.379	11,20%	±9 tahun	Rp1.333,58/kWh
KM164B	PLTS+BESS	-Rp1.113.602.857	-9,78%	>25 tahun	Rp5.168,78/kWh

Skenario PLTS tanpa BESS pada kedua lokasi menghasilkan NPV positif dan IRR sedikit di atas discount rate 10%. LCOE juga lebih rendah daripada tarif PLN Rp1.444,70/kWh. Dengan margin tersebut, kelayakan PLTS dapat dikategorikan positif tetapi marginal. KM164B memiliki IRR lebih tinggi dan LCOE lebih rendah, konsisten dengan specific PV output yang lebih tinggi.

Sebaliknya, penambahan BESS menyebabkan NPV negatif dan LCOE meningkat secara signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa pada asumsi biaya yang digunakan, penghematan energi belum mampu menutup CAPEX dan penggantian baterai. Karena itu, keputusan investasi BESS tidak tepat apabila hanya didasarkan pada penghematan kWh. Manfaat pengurangan beban puncak, peningkatan keandalan, pengurangan downtime, dan potensi kehilangan pendapatan SPKLU akibat gangguan perlu dimonetisasi agar evaluasi BESS lebih komprehensif.

Implikasi dan Kebaruan Hasil

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa luasan potensial yang besar tidak secara otomatis harus diterjemahkan menjadi kapasitas PLTS maksimum. Untuk sistem zero export dengan beban khusus SPKLU, kapasitas yang mengikuti kebutuhan energi lebih rasional karena mengurangi risiko oversizing dan curtailment. Temuan kedua adalah pemisahan fungsi PLTS dan BESS dalam keputusan investasi: PLTS berperan sebagai sumber energi yang dapat dinilai langsung melalui penghematan dan LCOE, sedangkan BESS pada kondisi saat ini lebih dominan sebagai aset keandalan dan manajemen daya.

Secara praktis, implementasi dapat dilakukan bertahap. Tahap awal memprioritaskan PLTS on-grid berbasis kebutuhan SPKLU. BESS dapat ditambahkan atau diperbesar ketika utilisasi charger meningkat, kebutuhan backup menjadi lebih kritis, manfaat peak shaving dapat dimonetisasi, atau harga baterai turun.

Keterbatasan Penelitian

Analisis menggunakan neraca energi tahunan dan belum menggunakan simulasi time-series interval 15 menit atau satu jam untuk seluruh transaksi charger. Oleh karena itu, nilai self-consumption aktual, energi yang benar-benar disimpan dan dilepas BESS, curtailment, perubahan SOC, serta pengurangan impor PLN per interval belum dapat dihitung secara presisi. Penelitian lanjutan perlu memasukkan profil beban aktual, degradasi baterai dan modul, batas daya jaringan, data gangguan, serta analisis sensitivitas CAPEX, tarif, discount rate, pertumbuhan transaksi, dan harga baterai.

KESIMPULAN

Analisis menunjukkan bahwa kedua rest area mempunyai area dan potensi surya yang memadai. Kapasitas PLTS berbasis kebutuhan yang direkomendasikan adalah 58,30 kWp di KM57 dan 25,85 kWp di KM164B, dengan produksi 84.371,76 dan 38.301,95 kWh/tahun. BESS sebesar 500 kW/700 kWh dan 60 kW/100 kWh direkomendasikan untuk fungsi backup dan peak shaving. Secara ekonomi, PLTS tanpa BESS layak secara marginal dengan NPV positif, IRR 10,95% dan 11,20%, payback sekitar sembilan tahun, serta LCOE di bawah tarif PLN. Penambahan BESS belum layak secara finansial akibat tingginya biaya investasi dan penggantian baterai. Strategi implementasi yang direkomendasikan adalah pembangunan PLTS on-grid demand-based sebagai tahap awal dan pengembangan BESS secara bertahap berdasarkan peningkatan utilisasi, kebutuhan keandalan, nilai peak shaving, dan perkembangan biaya teknologi.

REFERENSI

- Arifin, Z., Firmanto, A., Dwirawan, S., & Alwani, D. (2024). Battery energy storage system (bess) as a voltage control at substation based on the defense scheme mechanism. *SINERGI*, 28, 209–218.
- Arifin, Z., & Fitri, L. (2023). Implementation of battery energy storage system at Cirata PV solar floating for reducing the electricity cost production on Jamali grid. *AIP Conference Proceedings*, 2517(1), 030003.
- Azzahra, S., Pujotomo, I., & Qosim, M. N. (2019). Solar power plant grid interactive and building integration photovoltaic. *E3S Web of Conferences*, 125, 14007.
- Basnet, S., Timilsina, R., & Pant, B. (2024). Grid integration challenges and solutions for renewable energy systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 114005. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114005>
- Chen, W., Cao, X., & Zhang, R. (2024). Optimal sizing and operation strategy of battery energy storage system for solar PV integration in microgrids. *Applied Energy*, 365, 123089. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123089>
- Christiono, Fikri, M., Samsurizal, & Mauriraya, K. T. (2023). Modelling the characteristics of solar irradiation for solar power plant construction planning at PLN Institute of Technology. *AIP Conference Proceedings*, 2680(1), 020166.
- Da Silva, F. P., de Oliveira, A. M., & Santos, R. C. (2024). Advanced control strategies for BESS in renewable energy systems: A systematic literature review. *Journal of Energy Storage*, 86, 111302. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111302>
- Demirbas, M. F., Balat, M., & Balat, H. (2023). Perspectives on solar energy applications with recent advances. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 171, 112970. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112970>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Gao, H., Liu, J., & Wang, S. (2024). Energy management system for hybrid renewable energy and storage: A comprehensive review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 158, 109897. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109897>
- Hidayat, I. P., Nugroho, A., & Hartono. (2023). Performance evaluation of solar photovoltaic system integrated with battery energy storage in tropical climate. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi*, 11(4), 445–456. <https://doi.org/10.21111/jtek.v11i4.7842>
- International Energy Agency. (2024). *Global EV outlook 2024: Moving towards increased affordability*. IEA.
- International Renewable Energy Agency. (2017). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. IRENA.
- International Renewable Energy Agency. (2024). *Renewable power generation costs in 2023*. IRENA.
- Jaenuddin, M. R., Prabowo, E., & Jaenuddin, N. (2025). Studi kelayakan pemasangan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) di wilayah Kota Makassar. *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*, 10(12).
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2020). *Peraturan Menteri ESDM Republik Indonesia Nomor 13 Tahun 2020 tentang Penyediaan Infrastruktur Pengisian Listrik untuk Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai*.
- Krishnan, V., Sahoo, A., & Desai, S. B. (2024). Techno-economic assessment of distributed energy resources and battery storage systems in smart grids. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 64, 103749. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103749>
- Lee, C. T., Chuah, S. C., & Lim, Y. S. (2024). Voltage stability improvement in distribution systems with high penetration of photovoltaic generation and battery storage. *Renewable Energy*, 223, 120234. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120234>

- Srinivasan, R., Kumar, A., & Deepak, K. (2024). Battery energy storage system scheduling optimization for frequency regulation and demand response. *Energy*, 287, 130952. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130952>
- World Bank Group, ESMAP, & Solargis. (n.d.). *Global solar atlas*. Data potensi sumber daya surya dan specific photovoltaic power output yang digunakan dalam penelitian.