



Studi Kelayakan Upaya Penghematan Energi pada Divisi *Workshop* dengan Pendekatan Sistem Dinamis

Cornelia Devita¹, Ahmad²

¹Program Studi Teknik Industri, Universitas Tarumanagara, Indonesia, cornelia.545210029@stu.untar.ac.id

²Program Studi Teknik Industri, Universitas Tarumanagara, Indonesia, ahmad@ft.untar.ac.id

Corresponding Author: cornelia.545210029@stu.untar.ac.id¹

Abstract: *This study assesses the technical, environmental, and financial feasibility of integrating a photovoltaic–battery energy storage system (PV–BESS) in an industrial workshop in Indonesia. We employed a three-tier methodology combining Life Cycle Assessment (LCA) to quantify carbon emissions before and after PV installation, Linear Programming (LP) to optimize panel configurations within rooftop constraints, and dynamic system modeling over a 13-year horizon. LCA results indicate that annual electricity consumption via PLN generates approximately 45.7 ton CO_{2e}, equivalent to emissions from 18.4 individuals, underscoring high carbon intensity. LP optimization recommends installing ninety 580 W panels, producing 5,622.6 kWh monthly while using only 55.9% of the 416 m² rooftop. Dynamic simulation reveals that the PV–BESS system can supply up to 99.98% of energy demand and avoid 99.99% of emissions in optimistic scenarios, maintaining robustness under pessimistic conditions. Financial analysis shows a Break-Even Point (BEP) at year 11, affirming economic viability. The findings demonstrate that PV–BESS integration effectively reduces carbon emissions, enhances energy security, and yields sustainable financial returns. Our combined methodology offers a reliable framework for renewable energy feasibility studies in industrial settings. Recommendations include expanding capacity across other industrial facilities and formulating policy incentives to accelerate adoption of clean energy in Indonesia.*

Keyword: *Feasibility Study, Energy Saving, Workshop Division, Dynamic System.*

Abstrak: Penelitian ini mengevaluasi kelayakan teknis, lingkungan, dan finansial dari integrasi sistem panel surya dan penyimpanan baterai (PV–BESS) pada sebuah workshop manufaktur di Indonesia. Metode penelitian menggabungkan tiga pendekatan: Life Cycle Assessment (LCA) untuk mengukur emisi karbon sebelum pemasangan PV; Linear Programming (LP) untuk optimasi konfigurasi panel sesuai batasan luas atap; dan pemodelan sistem dinamis selama 13 tahun. Hasil LCA menunjukkan bahwa konsumsi listrik PLN menghasilkan sekitar 45,7 ton CO_{2e} per tahun, setara emisi dari 18,4 orang, menegaskan intensitas karbon yang tinggi. Optimasi LP merekomendasikan pemasangan 90 panel 580 W, menghasilkan 5.622,6 kWh per bulan dan hanya memanfaatkan 55,9 % luas atap 416 m². Simulasi dinamis menunjukkan sistem PV–BESS dapat memenuhi hingga 99,98 %

kebutuhan energi dan menghindari 99,99 % emisi pada skenario optimis, serta tetap stabil pada kondisi pesimis. Analisis finansial memperlihatkan bahwa sistem mencapai titik impas (BEP) pada tahun ke-11, menegaskan kelayakan ekonomi. Temuan ini menunjukkan bahwa integrasi PV–BESS efektif dalam mengurangi emisi karbon, meningkatkan ketahanan energi, serta memberikan keuntungan finansial berkelanjutan. Metodologi gabungan ini menjadi kerangka kerja andal untuk studi kelayakan energi terbarukan di sektor industri. Rekomendasi mencakup perluasan kapasitas ke fasilitas industri lainnya dan penyusunan insentif kebijakan untuk mempercepat adopsi energi bersih di Indonesia.

Kata Kunci: Studi Kelayakan, Penghematan Energi, Divisi Workshop, Sistem Dinamis.

PENDAHULUAN

Industri manufaktur memegang peran krusial dalam perekonomian Indonesia, menyumbang sekitar 17,18% terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) pada kuartal III tahun 2024 [1]. Namun, di balik kontribusinya, sektor ini juga merupakan konsumen energi terbesar dengan porsi sekitar 32,42% dari total konsumsi listrik nasional. Mayoritas pasokan listrik tersebut masih berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu bara, yang diketahui menghasilkan emisi karbon tinggi serta biaya operasional yang meningkat seiring naiknya harga energi primer [2].

Secara global, sektor industri menyumbang sekitar 24,2% dari total emisi gas rumah kaca (GRK) [3]. Dalam konteks Indonesia, tekanan terhadap dekarbonisasi sektor energi semakin meningkat karena komitmen negara ini dalam Perjanjian Paris untuk menurunkan emisi dan membatasi kenaikan suhu global hingga 1,5°C [4]. Salah satu strategi penanggulangan yang relevan adalah penerapan *green manufacturing*, yakni sistem produksi yang mengutamakan efisiensi sumber daya dan penggunaan energi terbarukan [5]. Dalam praktiknya, integrasi sistem panel surya menjadi pendekatan yang banyak digunakan untuk menggantikan ketergantungan terhadap listrik konvensional [6]. Namun demikian, investasi awal sistem PV (photovoltaic) masih relatif tinggi di Indonesia, yakni berkisar antara Rp13 juta hingga Rp22 juta per kWp [7].

Studi terdahulu telah mengevaluasi aspek teknis maupun lingkungan dari instalasi PV, tetapi masih terbatas pada pendekatan parsial dan belum mengintegrasikan simulasi jangka panjang dalam konteks spesifik sektor manufaktur Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan kebaruan metodologis dengan menggabungkan tiga pendekatan ilmiah: Life Cycle Assessment (LCA) untuk menilai dampak lingkungan sebelum dan sesudah intervensi energi, Linear Programming (LP) untuk optimasi jumlah dan konfigurasi panel surya sesuai batasan kapasitas atap, serta pemodelan sistem dinamis untuk menganalisis dampak implementasi PV–BESS (battery energy storage system) dalam horizon 13 tahun ke depan.

Penelitian ini dilakukan pada sebuah divisi workshop pabrik motor di Indonesia yang memiliki profil konsumsi energi tinggi untuk aktivitas produksi dan reparasi. Permasalahan yang diangkat mencakup (1) tingginya biaya operasional dan emisi karbon dari konsumsi listrik PLN, (2) keterbatasan kapasitas atap untuk instalasi PV, dan (3) ketidakpastian kelayakan lingkungan serta finansial dalam jangka panjang. Tujuan dari studi ini adalah menganalisis konsumsi energi dan emisi karbon sebelum implementasi PV menggunakan LCA, menentukan konfigurasi optimal panel surya dengan LP, serta mengevaluasi kelayakan jangka panjang dari sistem PV–BESS menggunakan simulasi sistem dinamis.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif terintegrasi yang mencakup empat metode utama. Pertama, Life Cycle Assessment (LCA) digunakan untuk menghitung emisi karbon dari konsumsi listrik PLN berbasis batubara, dengan cakupan cradle-to-gate dan unit

fungsional 1 kWh. Pendekatan ini mengacu pada standar ISO 14044 dan menggunakan faktor emisi nasional sebesar 0,7848 kg CO₂e/kWh sebagaimana dilaporkan dalam Climate Transparency Indonesia Report 2022 [8].

Kedua, Linear Programming (LP) diterapkan untuk menentukan jumlah panel surya optimal dengan batasan luas atap sebesar 416 m² dan kebutuhan energi minimum sebesar 5.514 kWh/bulan. Model disusun dengan fungsi objektif untuk meminimalkan total biaya investasi dan diselesaikan menggunakan Excel Solver.

Ketiga, sistem dinamis digunakan untuk mensimulasikan interaksi antar variabel energi, emisi, dan operasional dalam horizon waktu 13 tahun. Simulasi ini mempertimbangkan degradasi efisiensi panel surya sebesar 0,5% per tahun [9], serta variasi iradiasi matahari berdasarkan data Global Solar Atlas dan BMKG. Model dibangun dengan pendekatan stock and flow diagram menggunakan Powersim Studio.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengevaluasi kelayakan teknis, lingkungan, dan finansial dari penerapan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) berbasis panel fotovoltaik (PV) yang dikombinasikan dengan sistem penyimpanan energi baterai (BESS) pada salah satu divisi workshop industri manufaktur di Indonesia. Pendekatan yang digunakan mencakup *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk menilai emisi karbon sebelum implementasi, Linear Programming (LP) untuk menentukan konfigurasi panel optimal, serta simulasi sistem dinamis jangka panjang untuk mengevaluasi kinerja dan kelayakan investasi.

Life Cycle Assessment (LCA) Sebelum Penerapan Panel Surya

Evaluasi awal dilakukan untuk mengidentifikasi emisi karbon dari konsumsi listrik grid PLN yang digunakan secara eksklusif di workshop. Berdasarkan total konsumsi listrik tahunan sebesar 58.243 kWh dan faktor emisi nasional sebesar 0,7848 kg CO₂/kWh sebagaimana tercantum dalam Climate Transparency 2022 [8], total emisi karbon mencapai 45,7 ton CO₂/tahun. Angka 45,7 ton CO₂/kWh setara dengan sekitar 18 orang rata-rata di Indonesia (2,48 ton CO₂/orang/tahun) [10].

Temuan ini menjadi dasar yang penting dalam mengevaluasi urgensi transisi energi di sektor manufaktur Indonesia yang saat ini masih sangat bergantung pada pembangkit berbahan bakar fosil. Hasil LCA ini menunjukkan bahwa dengan hanya mengganti sumber energi dari PLN ke PV-BESS, potensi penurunan emisi dapat mencakup hampir seluruh *carbon footprint* dari konsumsi listrik *workshop*.

LCA ini menjadi dasar penting dalam menilai signifikansi emisi sebelum intervensi teknologi dilakukan. Temuan ini juga memperkuat urgensi strategi mitigasi karbon melalui audit energi, manajemen beban puncak, serta integrasi sumber energi terbarukan seperti panel surya dan sistem baterai.

Optimasi Panel Surya Menggunakan Linear Programming

Untuk menjamin bahwa investasi pada sistem panel surya memberikan efisiensi maksimum dalam batasan fisik yang ada, dilakukan optimasi konfigurasi sistem PV menggunakan model *Linear Programming* (LP). Model dirancang dengan fungsi objektif untuk meminimalkan total biaya investasi dengan batasan kebutuhan energi bulanan minimal 5.514 kWh dan batas maksimum luas atap sebesar 416 m². Hasil optimasi menunjukkan bahwa tipe panel 580 W adalah solusi paling efisien dengan efisiensi konversi sebesar 22%, luas permukaan 2,583 m², dan daya 580 watt per unit.

Diperoleh solusi optimal sebesar 89 unit panel yang kemudian dibulatkan menjadi 90 unit untuk kemudahan instalasi. Total output sistem diproyeksikan sebesar 5.622,57 kWh/bulan, melebihi batas kebutuhan. Luas atap yang digunakan hanya 232,47 m² (55,9% dari total kapasitas), sehingga masih menyisakan ruang untuk ekspansi sistem di masa depan.

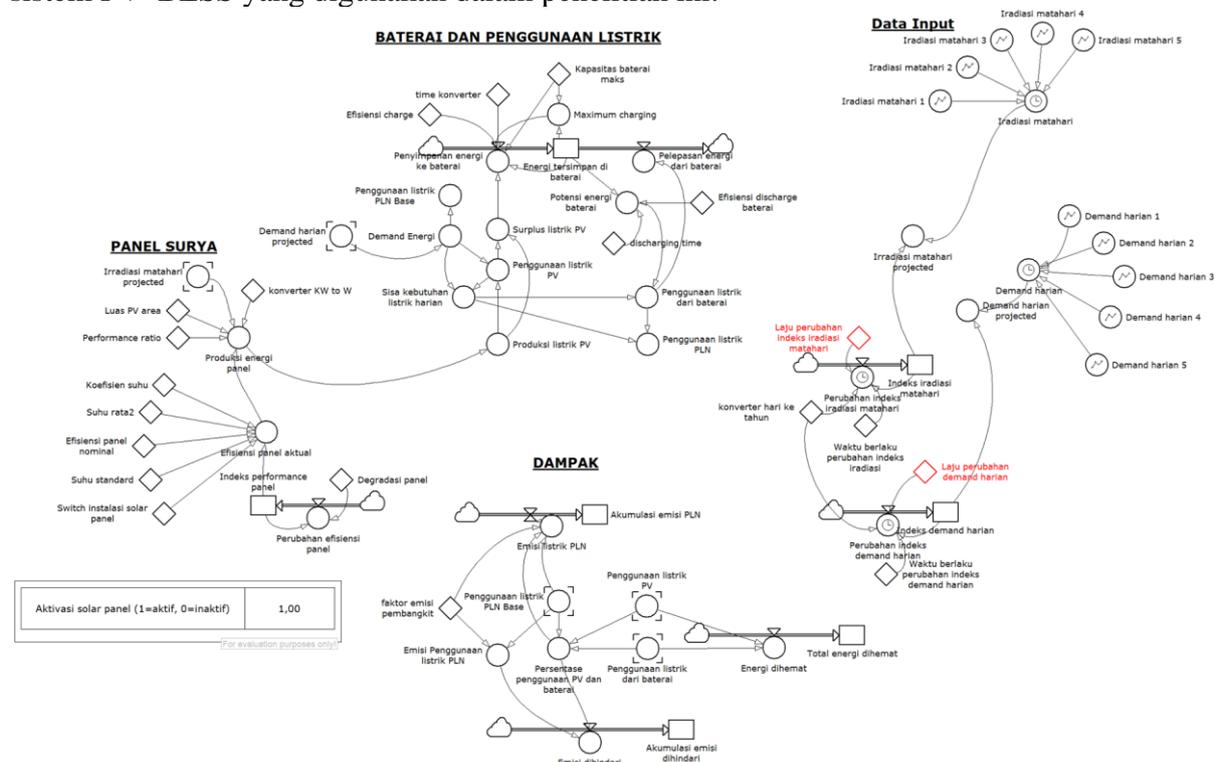
Biaya tambahan akibat pembulatan unit panel hanya sekitar 1,1% dari total biaya dan dianggap insignifikan dari perspektif keekonomian proyek.

Desain sistem memperhatikan kaidah teknis di wilayah tropis, termasuk orientasi panel menghadap utara (azimuth 0°) dan kemiringan 8°, sesuai dengan rekomendasi pengoptimalan iradiasi matahari tahunan di Jakarta.

Pemodelan Sistem Dinamis dan Simulasi Jangka Panjang

Model sistem dinamis disusun menggunakan pendekatan Stock and Flow Diagram (SFD) untuk mensimulasikan dinamika interaksi antara produksi energi dari PV, penyimpanan baterai, konsumsi energi harian, dan potensi penghindaran emisi karbon. Model terdiri dari empat submodel utama: Data Input, Baterai dan Penggunaan Listrik, Panel Surya, dan Dampak. Komponen penting dalam SFD mencakup stock seperti "energi tersimpan di baterai" dan "emisi kumulatif yang dihindari", serta flow seperti "pengisian baterai", "konsumsi harian", dan "iradiasi matahari". Model ini dibangun dan dijalankan pada perangkat lunak Powersim Studio.

Visualisasi utama dari sistem ini menggunakan pendekatan Stock and Flow Diagram (SFD), yang merupakan metode grafis untuk menggambarkan aliran dan akumulasi variabel dalam sistem dinamis. Gambar berikut menunjukkan dari struktur *Stock and Flow Diagram* sistem PV-BESS yang digunakan dalam penelitian ini:



Gambar 1. Stock and Flow Diagram Sistem PV-BESS

Dalam diagram ini, komponen utama seperti “energi tersimpan di baterai”, “akumulasi emisi dihindari”, dan “produksi energi dari PV” direpresentasikan sebagai stock (penampung akumulasi), sedangkan komponen seperti “pengisian baterai”, “penggunaan listrik dari PLN”, dan “pelepasan energi baterai” digambarkan sebagai flow (arus). SFD digunakan dalam perangkat lunak Powersim Studio sebagai alat bantu untuk merancang simulasi dengan resolusi harian selama periode 13 tahun.

Simulasi dijalankan dalam resolusi harian selama 13 tahun. Input model mencakup degradasi efisiensi panel (0,5%/tahun), serta perubahan intensitas matahari berdasarkan data rata-rata bulanan Global Horizontal Irradiance (GHI) dari website Photovoltaic Geographical Information System yang dikelola oleh European Commission Joint Research Centre (JRC)

[11]. Model juga mempertimbangkan efisiensi sistem baterai, kapasitas baterai 200 kWh, serta permintaan listrik yang diasumsikan tumbuh hingga 0.5%/tahun.

Skenario Simulasi Jangka Panjang

Untuk menguji ketahanan sistem terhadap ketidakpastian operasional dan eksternal, simulasi dilakukan dalam tiga skenario:

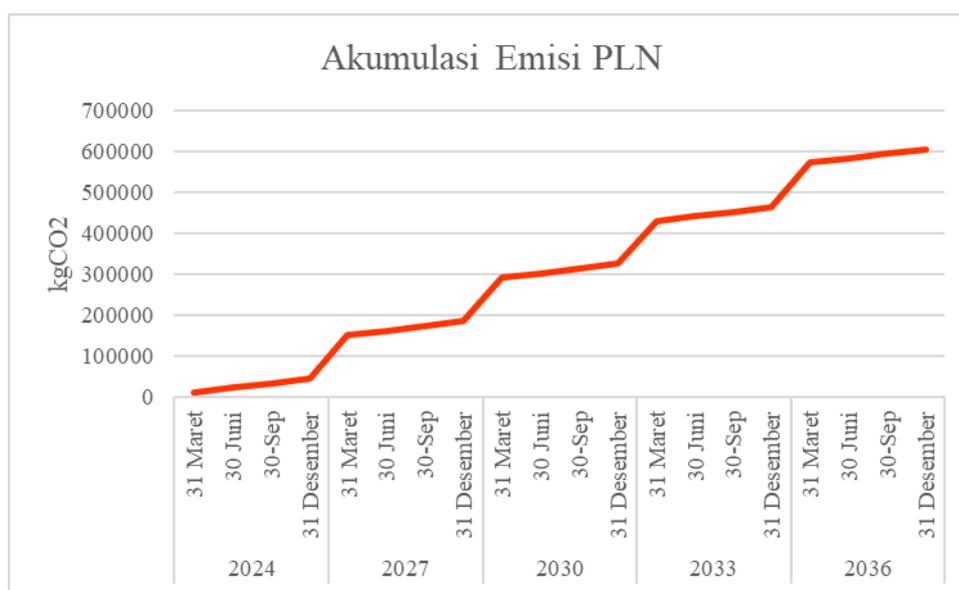
1. Baseline: GHI tidak berubah $\pm 0\%$, kenaikan permintaan listrik tahunan sebesar $+0\%$, dan degradasi panel surya sebesar $-0,5\%$ per tahun. Skenario ini merepresentasikan kondisi netral di mana tidak ada peningkatan ekstrim pada sumber atau beban.
2. Optimis: Iradiasi matahari meningkat $+2\%$ dibanding rata-rata historis, permintaan listrik tumbuh lambat sebesar $+0,2\%$ karena produksi efisien, dan degradasi panel lebih rendah yaitu $-0,2\%$ per tahun. Ini menggambarkan kondisi ideal dengan potensi energi lebih tinggi dan penurunan efisiensi yang minimal.
3. Pesimis: Iradiasi menurun -2% , pertumbuhan permintaan paling tinggi di $+1\%$, dan degradasi panel lebih buruk sebesar $-0,7\%$ per tahun. Skenario ini dirancang untuk mensimulasikan kondisi buruk, termasuk cuaca mendung berkelanjutan dan penurunan performa komponen yang lebih cepat.

Skenario-skenario tersebut dipilih untuk mencerminkan variasi nyata dalam fenomena cuaca, pola konsumsi, dan penurunan performa panel, yang merupakan aspek penting dalam simulasi sistem dinamis. Pendekatan ini mendukung validitas eksternal model dan keandalannya dalam mengakomodasi ketidakpastian lingkungan dan operasional, sebagaimana praktek umum dalam model hybrid BESS–PV yang juga mempertimbangkan skenario-skenario dan variabel ketidakpastian kuantitatif lainnya

Setelah melalui proses verifikasi dan validasi, model sistem dinamis dijalankan selama 13 tahun dengan resolusi harian untuk mengevaluasi kinerja teknis dan lingkungan dari sistem PV–BESS. Simulasi menggunakan pendekatan bundled scenario yang menggabungkan perubahan GHI, permintaan energi, dan degradasi panel dalam empat skenario: Business as Usual (BAU), baseline, optimis, dan pesimis. Fokus analisis ditujukan pada indikator energi dihemat, emisi dihindari, energi tersimpan, dan produksi panel.

1. Skenario BAU (Business as Usual)

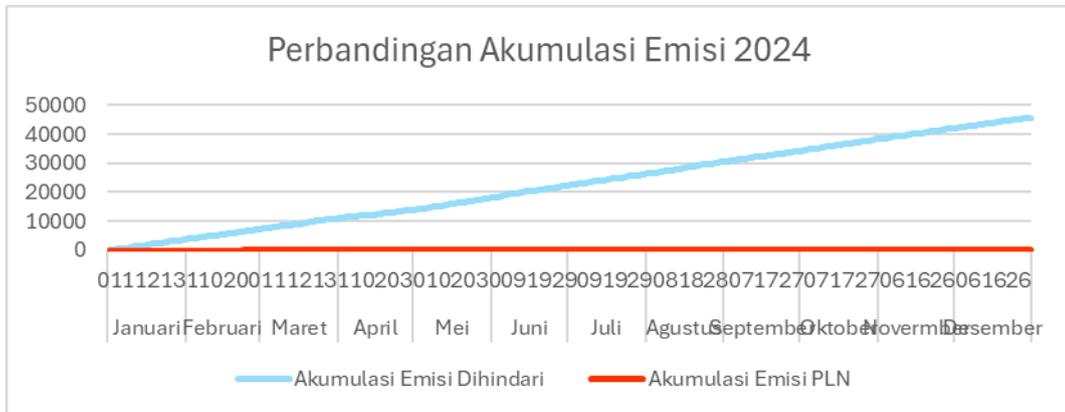
Tanpa intervensi energi terbarukan, seluruh konsumsi listrik workshop dipenuhi oleh PLN. Emisi karbon meningkat secara linear seiring akumulasi konsumsi tahunan.



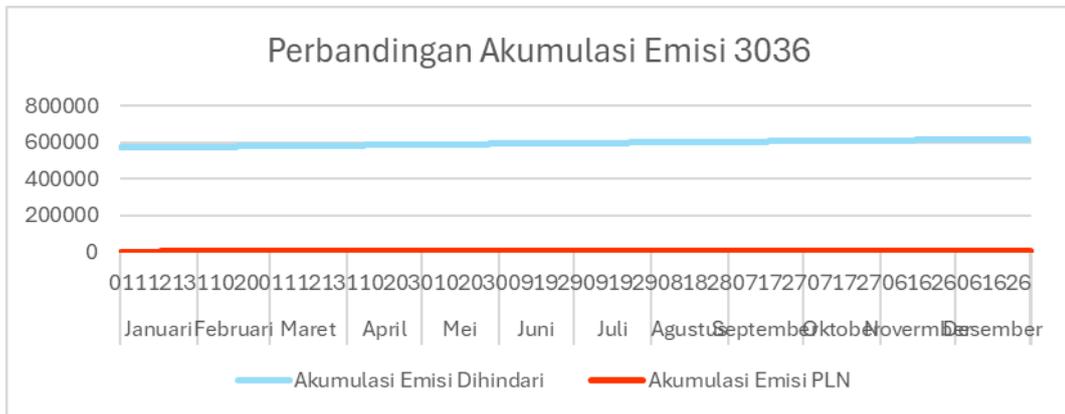
Gambar 2. Akumulasi Emisi Karbon per Kuartal 2024-3036, Skenario BAU

2. Skenario Baseline

Implementasi sistem PLTS–BESS sejak 2024 menunjukkan kontribusi signifikan dalam pengurangan emisi. Emisi dihindari terus meningkat, sementara ketergantungan pada PLN berkurang drastis.

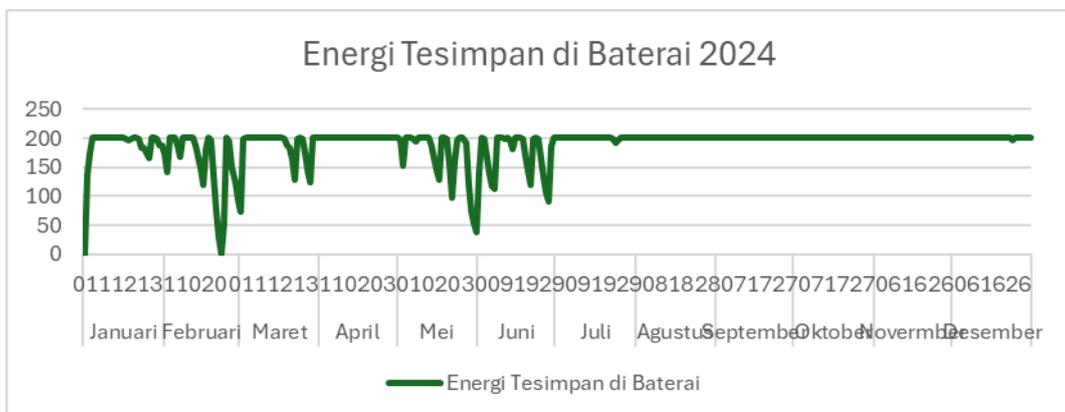


Gambar 3. Emisi Dihindari vs Emisi PLN Tahun 2024, Skenario Baseline

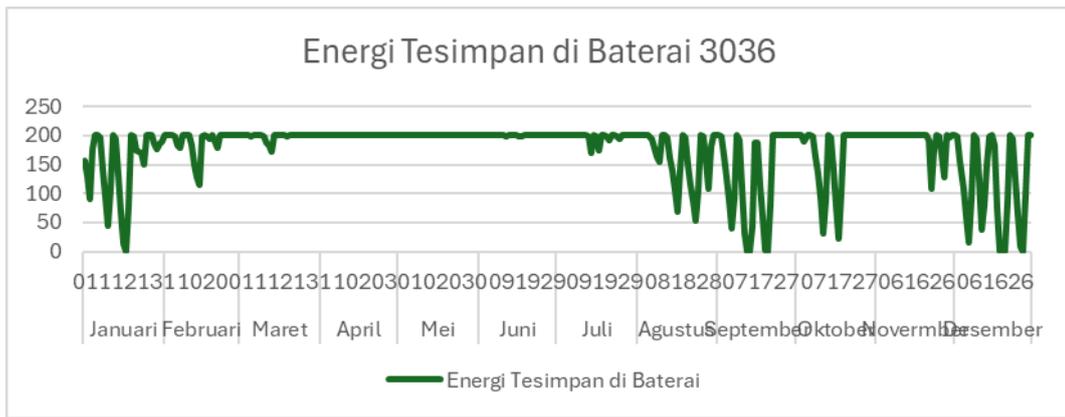


Gambar 4. Emisi Dihindari vs Emisi PLN Tahun 2023, Skenario Baseline

Stabilitas baterai terlihat dari fluktuasi energi tersimpan yang cenderung tinggi, meskipun mengalami sedikit penurunan kapasitas pada musim hujan dan akhir dekade.



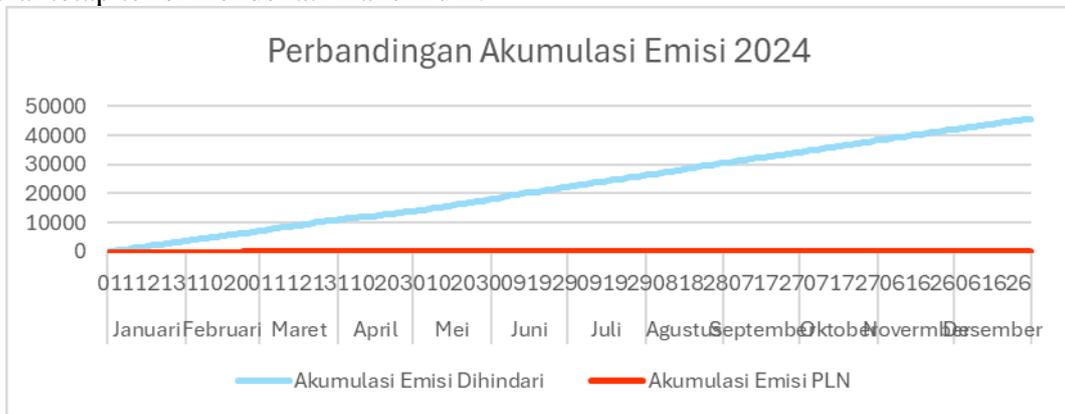
Gambar 5. Energi Tersimpan Harian Tahun 2024, Skenario Baseline



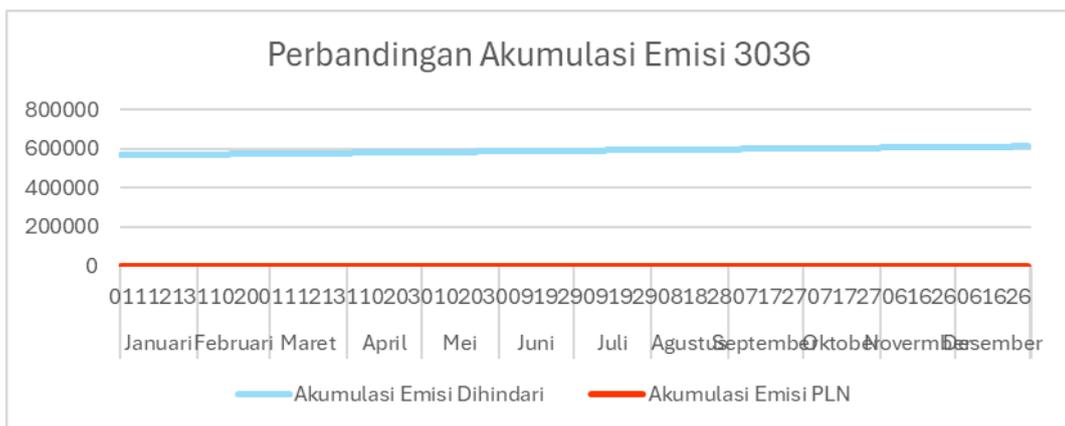
Gambar 6. Energi Tersimpan Harian Tahun 2033, Skenario Baseline

3. Skenario Optimis

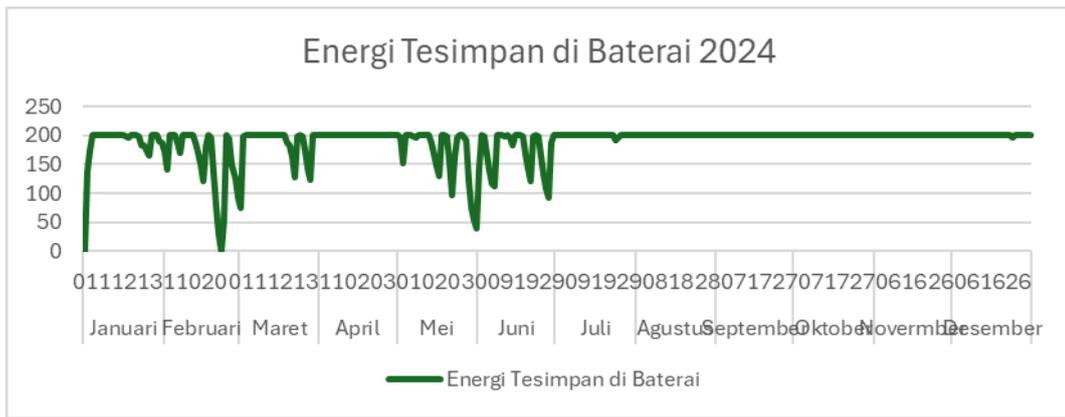
Dengan peningkatan GHI (+2%) dan pertumbuhan demand rendah (+0,2%), sistem mampu menggantikan hampir seluruh kebutuhan listrik. Emisi dari PLN sangat minim dan baterai tetap terisi mendekati maksimum.



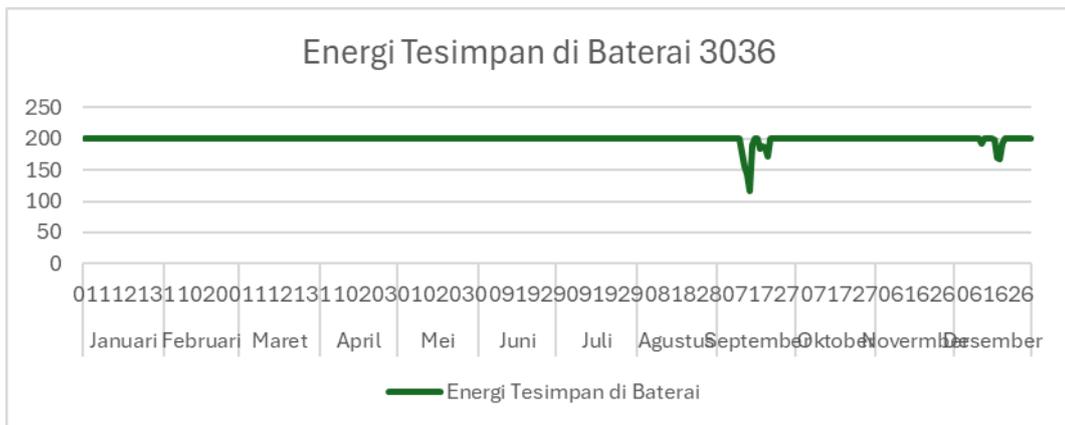
Gambar 7. Emisi Dihindari vs Emisi PLN Tahun 2024, Skenario Optimis



Gambar 8. Emisi Dihindari vs Emisi PLN Tahun 2036, Skenario Optimis



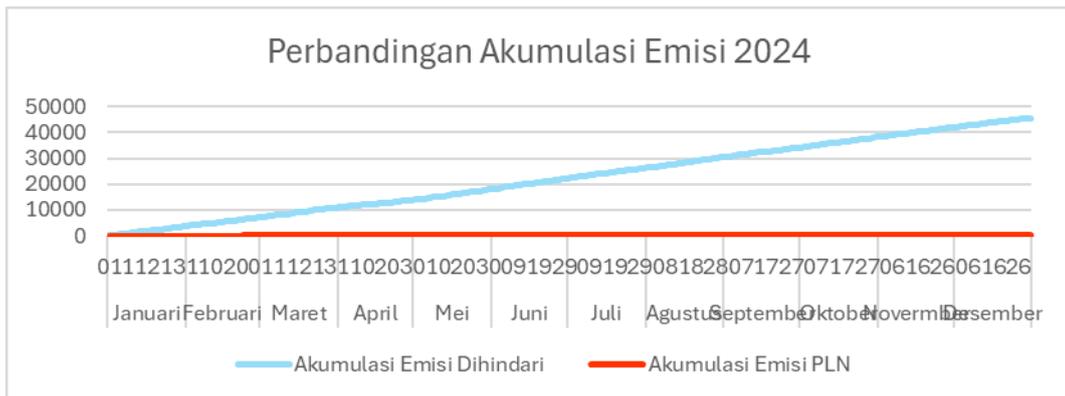
Gambar 9. Energi Tersimpan Harian Tahun 2024, Skenario Optimis



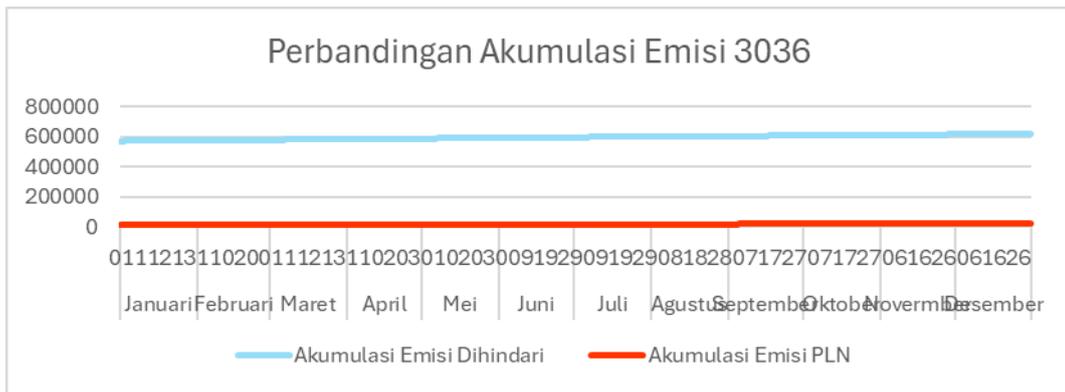
Gambar 10. Energi Tersimpan Harian Tahun 2036, Skenario Optimis

4. Skenario Pesimis

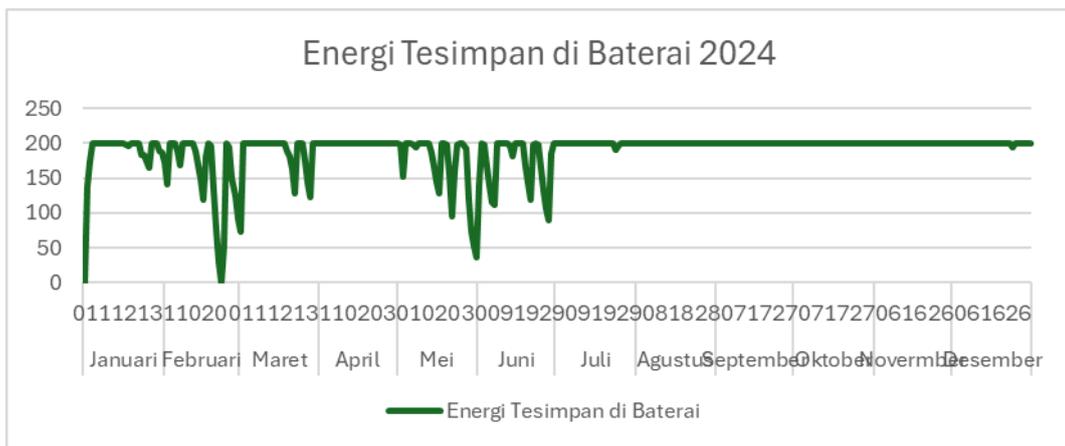
Penurunan GHI (-2%) dan degradasi panel yang lebih cepat (-0,7%) menyebabkan peningkatan ketergantungan pada PLN. Emisi tetap dapat ditekan, tetapi kontribusi PLN terhadap total energi meningkat signifikan.



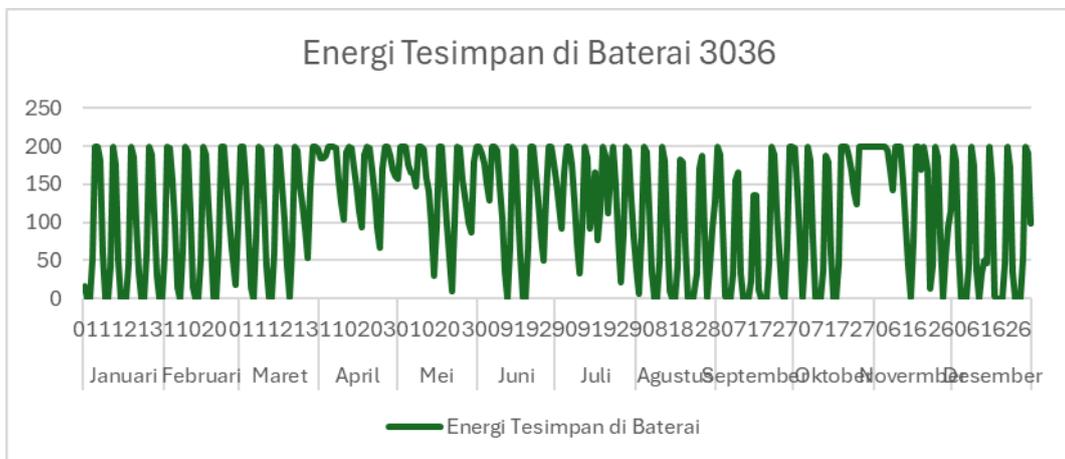
Gambar 11. Emisi Dihindari vs Emisi PLN Tahun 2024, Skenario Pesimis



Gambar 12. Emisi Dihindari vs Emisi PLN Tahun 2036, Skenario Pesimis



Gambar 13. Energi Tersimpan Harian Tahun 2024, Skenario Pesimis



Gambar 14. Energi Tersimpan Harian Tahun 2036, Skenario Pesimis

Hasil simulasi menunjukkan performa sistem sebagai berikut:

Tabel 1. Performa Sistem PV-BESS

Indikator	Baseline	Optimis	Pesimis
Demand terpenuhi	99.74%	99.98%	98.48%
Ketergantungan PLN	0.26%	0.02%	1.52%
Emisi dihindari	99.74%	99.99%	98.41%

Tabel 1 menunjukkan bahwa sistem PLTS–BESS mampu menggantikan hampir seluruh kebutuhan listrik workshop pada semua skenario. Tingkat pemenuhan demand mencapai lebih dari 98%, dengan ketergantungan terhadap PLN yang sangat rendah—

terendah pada skenario optimis (0,02%) dan tertinggi pada skenario pesimis (1,52%). Hal ini menunjukkan bahwa sistem bekerja secara teknis dengan baik. Selain itu, emisi yang dihindari juga sangat signifikan, dengan nilai tertinggi mencapai 99,99% pada skenario optimis. Stabilitas baterai dinilai cukup baik pada semua skenario, menandakan bahwa sistem penyimpanan energi mampu menyeimbangkan fluktuasi supply dan demand harian. Hasil ini mengindikasikan bahwa sistem layak secara teknis dan lingkungan untuk diimplementasikan.

Analisis Finansial

Estimasi total biaya investasi sistem PV–BESS adalah Rp 666.548.500, yang mencakup panel surya, sistem baterai, inverter hybrid, serta biaya instalasi dan BOS (Balance of System). Detail komponen sebagai berikut:

- Panel surya (90 unit): Rp 154.548.500
- BESS 200 kWh: Rp 400.000.000
- Inverter hybrid: Rp 51.000.000
- BOS & instalasi: Rp 120.000.000

Perhitungan Break Even Point (BEP) menunjukkan bahwa sistem dapat mengembalikan investasi pada tahun ke-11 untuk seluruh skenario:

Tabel 2. Perhitungan Break Even Point (BEP)

Skenario	Tahun BEP	Akumulasi Penghematan Tahun ke-11
Baseline	11	Rp 684.502.096,16
Optimis	11	Rp 666.410.346,79
Pesimis	11	Rp 673.442.203,10

Dari keseluruhan hasil, dapat disimpulkan bahwa implementasi sistem PLTS–BESS layak dilakukan dari sisi teknis, lingkungan, dan finansial. Sistem menunjukkan performa yang stabil bahkan dalam skenario pesimis sekalipun, dengan tingkat penghindaran emisi dan penghematan energi yang signifikan serta waktu pengembalian modal dalam batas wajar usia sistem.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah mengevaluasi kelayakan teknis, lingkungan, dan finansial dari integrasi sistem panel surya dan baterai (PV–BESS) pada sebuah workshop manufaktur di Indonesia. Dengan menggabungkan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA), Linear Programming (LP), dan pemodelan sistem dinamis, penelitian ini memberikan gambaran komprehensif terhadap potensi manfaat implementasi energi terbarukan dalam sektor industri.

Pertama, hasil LCA menunjukkan bahwa konsumsi listrik berbasis PLN di workshop menghasilkan emisi sebesar 45,7 ton CO_{2e} per tahun, atau setara dengan emisi tahunan 18,4 individu. Nilai ini menegaskan pentingnya transisi energi untuk mengurangi jejak karbon sektor manufaktur, terutama di Indonesia yang pasokan listriknya masih didominasi PLTU berbahan bakar fosil.

Kedua, melalui optimasi Linear Programming, diperoleh konfigurasi optimal sebanyak 90 unit panel dengan 580 W yang mampu menghasilkan 5.622,57 kWh per bulan dengan pemanfaatan atap hanya 55,9%. Hal ini membuktikan bahwa dengan desain sistem yang tepat, keterbatasan ruang tidak menjadi penghambat utama dalam adopsi teknologi PV di lingkungan industri.

Ketiga, simulasi sistem dinamis selama 13 tahun menunjukkan bahwa sistem PV–BESS mampu memenuhi hingga 99,98% kebutuhan energi workshop dan menghindari emisi hingga 99,99% pada skenario optimis. Sistem juga terbukti stabil dalam menghadapi skenario pesimis dengan permintaan meningkat dan iradiasi menurun. Validasi model

menunjukkan bahwa simulasi dapat merepresentasikan perilaku sistem dengan baik dan responsif terhadap perubahan variabel input.

Keempat, dari sisi finansial, sistem menunjukkan kelayakan yang kuat dengan Break-Even Point (BEP) pada tahun ke-11 untuk semua skenario, yang konsisten dengan studi payback period serupa di sektor PV-BESS selama sekitar 11 tahun pada sistem hybrid PV dan BESS lainnya [2].

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa integrasi sistem PV-BESS tidak hanya efektif dalam menurunkan emisi karbon dan meningkatkan ketahanan energi, tetapi juga menguntungkan secara finansial dalam jangka panjang. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa kombinasi LCA, LP, dan sistem dinamis dapat menjadi pendekatan metodologis yang solid untuk studi kelayakan energi terbarukan di sektor manufaktur. Rekomendasi lanjutan mencakup penerapan pada sektor industri lain, perluasan kapasitas sistem, serta pengkajian insentif kebijakan guna mempercepat adopsi energi bersih di Indonesia.

REFERENSI

- [1] “Indonesia.go.id - Pendorong Utama Pertumbuhan Ekonomi yang Stabil.” Diakses: 21 Juni 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://indonesia.go.id/kategori/editorial/8770/pendorong-utama-pertumbuhan-ekonomi-yang-stabil?lang=1>
- [2] “Kementerian ESDM: Konsumsi listrik naik jadi bukti ekonomi tumbuh baik - ANTARA News Makassar.” Diakses: 21 Juni 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://makassar.antaranews.com/berita/457605/kementerian-esdm-konsumsi-listrik-naik-jadi-bukti-ekonomi-tumbuh-baik>
- [4] “The Paris Agreement | UNFCCC.” Diakses: 21 Juni 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [5] A. M. Deif, “A system model for green manufacturing,” *J Clean Prod*, vol. 19, no. 14, hlm. 1553–1559, Sep 2011, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2011.05.022.
- [6] J. L.V. Teixeira and F. R. Pinto, “Solar Panel: A Sustainable Development Alternative for Industries,” *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, vol. 7, no. 12, pp. 160-163, Dec. 2020f.
- [7] PT. Reja Aton Energi (Atonergi), “Biaya Pasang Panel Surya 1 kWp: Tabel Harga Terbaru,” Atonergi, 2023. [Online]. Available: <https://atonergi.com/biaya->
- [8] Gütschow et al, “Climate Transparency Report 2022,” 2022.
- [9] D. C. Jordan dan S. R. Kurtz, “Photovoltaic Degradation Rates -- An Analytical Review: Preprint,” 2012, Diakses: 22 Juni 2025. [Daring]. Tersedia pada: <http://www.osti.gov/bridge>
- [10] “CO2 Emissions per Capita - Worldometer.” Diakses: 22 Juni 2025. [Daring]. Tersedia pada: https://srv1.worldometers.info/co2-emissions/co2-emissions-per-capita/?utm_source=chatgpt.com
- [11] “JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission.” Diakses: 22 Juni 2025. [Daring]. Tersedia pada: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVP