



Analisis dan Strategi Pengurangan Emisi Gas Karbon di lingkungan Bandara Angkasa Pura Indonesia

Sasmito Dwisatyo¹ Rubby Soebiantoro² Fahroji³

Program Studi Diploma IV Teknik Listrik Bandara, Jurusan Teknik Penerbangan, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Tangerang, Banten, Indonesia

Email : sasmitodwisatyo@injourneyairports.id¹ rubby605@gmail.com²
fahrojie.lili@gmail.com³

Abstract

The background of this study is the high electricity consumption of airport operations, which has the potential to generate carbon emissions, requiring energy efficiency and renewable energy utilization as part of PT Angkasa Pura Indonesia (Persero)'s decarbonization efforts. The purpose of this study is to analyze energy consumption and the carbon emission baseline, evaluate the contribution of existing solar power plants (PLTS), assess the potential for PLTS development using PVsyst, and formulate an emission reduction strategy through energy efficiency, replacement of non-LED lamps with LED lamps, and PLTS development. The research method used is a quantitative approach with a descriptive-analytical method using electricity consumption, PLTS production, technical data, rooftop potential, grid emission factors, and solar radiation data. The discussion includes the analysis of electricity consumption at eight airports totaling 418,446,063 kWh/year, with a carbon emission baseline of 329,541.75 tons CO₂/year; evaluation of existing PLTS with a capacity of 4,294 kWp, resulting in emission reductions of 3,998.16 tons CO₂/year; and simulation of PLTS development with a capacity of 8,064.2 kWp using PVsyst, with estimated energy production of 12,402.14 MWh/year and emission reduction potential of 9,997.5 tons CO₂/year. The conclusion of this study is that the integration of energy efficiency, LED replacement, optimization of existing PLTS, and PLTS development has the potential to reduce emissions by 16,379.19 tons CO₂/year or 4.97% of the baseline and can be implemented gradually.

Keywords: Angkasa Pura Indonesia, Carbon Emissions, Decarbonization, Green Airport, PVsyst, Solar Power Plant

Abstrak

Latar belakang penelitian ini adalah tingginya konsumsi energi listrik pada operasional bandar udara yang berpotensi menghasilkan emisi karbon, sehingga diperlukan efisiensi energi dan pemanfaatan energi terbarukan sebagai bagian dari upaya dekarbonisasi PT Angkasa Pura Indonesia (Persero). Tujuan penelitian ini adalah menganalisis konsumsi energi dan baseline emisi karbon, mengevaluasi kontribusi PLTS eksisting, menganalisis potensi pengembangan PLTS menggunakan PVsyst, serta menyusun strategi pengurangan emisi melalui efisiensi energi, penggantian lampu non-LED menjadi LED, dan pengembangan PLTS. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif dengan metode deskriptif-analitis menggunakan data konsumsi energi, produksi PLTS, data teknis, potensi rooftop, faktor emisi jaringan listrik, dan data radiasi matahari. Pembahasan penelitian meliputi analisis konsumsi energi delapan bandar udara sebesar 418.446.063 kWh/tahun dengan baseline emisi 329.541,75 ton CO₂/tahun; evaluasi PLTS eksisting berkapasitas 4.294 kWp yang menghasilkan reduksi emisi 3.998,16 ton CO₂/tahun; serta simulasi pengembangan PLTS sebesar 8.064,2 kWp menggunakan PVsyst dengan potensi produksi 12.402,14 MWh/tahun dan reduksi emisi 9.997,5 ton CO₂/tahun. Kesimpulan penelitian ini adalah integrasi efisiensi energi, penggantian LED, optimalisasi PLTS eksisting, dan pengembangan PLTS berpotensi mengurangi emisi sebesar 16.379,19 ton CO₂/tahun atau 4,97% dari baseline dan dapat diterapkan secara berkelanjutan.

Kata kunci: Angkasa Pura Indonesia, Dekarbonisasi, Emisi Gas Karbon, Efisiensi Energi, PLTS, Pvsyst



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Bandar udara merupakan infrastruktur transportasi yang beroperasi secara kontinu dan membutuhkan energi listrik dalam jumlah besar untuk mendukung terminal penumpang, sistem pendingin udara, penerangan, navigasi, keamanan, keselamatan, baggage handling system, serta berbagai fasilitas penunjang lainnya. Tingginya kebutuhan energi tersebut menyebabkan konsumsi listrik menjadi salah satu aspek penting dalam pengelolaan keberlanjutan bandar udara, khususnya ketika pasokan listrik masih didominasi oleh energi dari jaringan PLN. Pada PT Angkasa Pura Indonesia (Persero), konsumsi energi listrik pada 35 bandar udara mencapai rata-rata 680.309.507,95 kWh per tahun pada periode 2024–2025, sedangkan delapan bandar udara yang menjadi objek penelitian memiliki konsumsi sebesar 418.446.063 kWh pada tahun 2025. Kondisi tersebut menunjukkan adanya peluang yang signifikan untuk menurunkan emisi melalui peningkatan efisiensi energi dan pemanfaatan energi terbarukan, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) (Kurniawan & Feinnudin, 2021; Bamisile et al., 2025). Penelitian mengenai implementasi PLTS, analisis konsumsi energi, dan pengurangan emisi karbon telah banyak dilakukan pada berbagai sektor. Maulana et al. (2026) mengevaluasi kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan PLTS on-grid rooftop pada IGD RSUD dr. Soedomo Trenggalek dengan memanfaatkan PVsyst, analisis konsumsi energi, serta indikator ekonomi seperti Levelized Cost of Energy (LCOE) dan Payback Period (PP). Saputra et al. (2025) menggunakan PVsyst untuk menentukan konfigurasi PLTS dengan produksi energi dan Performance Ratio terbaik melalui beberapa variasi modul. Kedua penelitian tersebut memperlihatkan peran PVsyst dalam evaluasi dan optimasi teknis sistem PLTS, namun objek kajiannya masih terbatas pada satu lokasi.

Tukan et al. (2023) merancang PLTS on-grid pada Gedung LPPM Universitas Kristen Indonesia Jakarta dengan menilai aspek teknis, ekonomi, penghematan biaya listrik, dan pengurangan emisi karbon. Sementara itu, Aldo et al. (2025) merencanakan PLTS on-grid zero-export di Kantor BPPD Provinsi Kalimantan Barat menggunakan PVsyst 7.4 untuk menentukan kapasitas sistem, konfigurasi modul, dan inverter. Secara umum, penelitian terdahulu berfokus pada optimasi desain, evaluasi performa PLTS, analisis keekonomian, atau reduksi emisi pada satu bangunan/lokasi. Kajian yang mengintegrasikan konsumsi energi aktual, baseline emisi, PLTS eksisting, simulasi pengembangan PLTS, efisiensi energi, dan strategi implementasi pada jaringan beberapa bandar udara masih terbatas. Kesenjangan penelitian terletak pada belum tersedianya pendekatan yang secara komprehensif menghubungkan konsumsi energi listrik aktual, baseline emisi karbon, evaluasi PLTS eksisting, potensi pengembangan PLTS rooftop berbasis PVsyst, dan efisiensi energi melalui penggantian lampu non-LED menjadi LED sebagai satu dasar pengambilan keputusan dekarbonisasi pada beberapa bandar udara. Kebaruan penelitian ini adalah integrasi seluruh aspek tersebut pada delapan bandar udara PT Angkasa Pura Indonesia (Persero), sehingga hasil penelitian tidak hanya memberikan estimasi teknis potensi energi terbarukan, tetapi juga membandingkan kontribusi reduksi emisi dari masing-masing program dan menyusunnya menjadi strategi implementasi dekarbonisasi secara bertahap (Kurniawan & Feinnudin, 2021; Sitorus et al., 2023). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsumsi energi listrik dan menentukan baseline emisi karbon pada delapan bandar udara PT Angkasa Pura Indonesia (Persero); menganalisis kontribusi PLTS eksisting terhadap pemenuhan kebutuhan energi dan pengurangan emisi; menganalisis potensi pengembangan PLTS rooftop menggunakan PVsyst beserta produksi energi dan reduksi emisinya; serta menyusun strategi pengurangan emisi melalui integrasi efisiensi energi, penggantian lampu non-LED menjadi LED, optimalisasi PLTS eksisting, pengembangan PLTS, dan implementasi program secara bertahap.

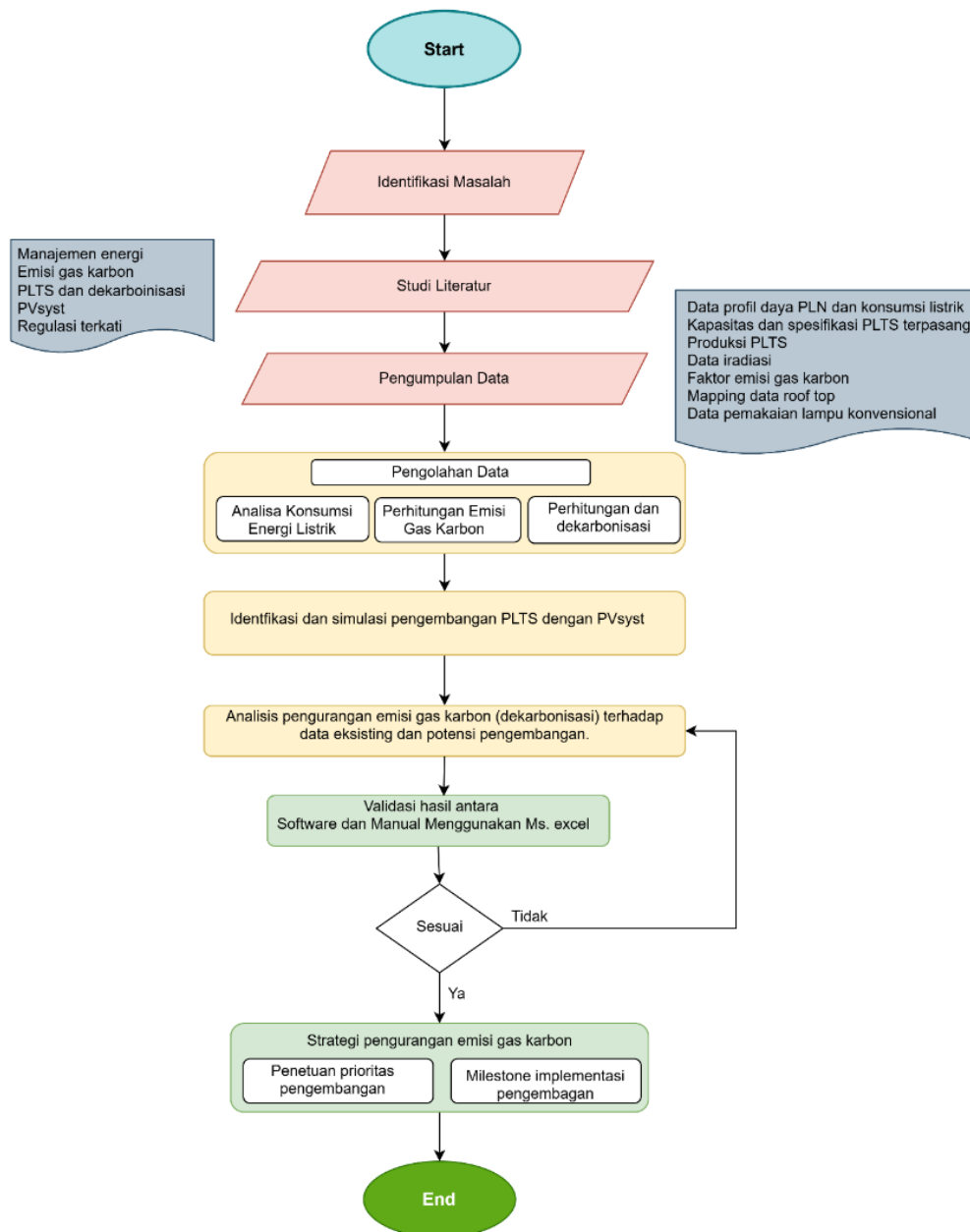
Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/ Tahun	Judul	Tujuan	Metode	Hasil	Kontribusi dan Relevansi
1	Maulana et al. (2026)	Analisis tekno-ekonomi implementasi PLTS on-grid rooftop pada IGD RSUD dr. Soedomo Trenggalek	Mengevaluasi kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan PLTS eksisting serta membandingkan sistem on-grid dengan skenario penambahan baterai.	Analisis konsumsi energi dan konfigurasi PLTS; simulasi PVsyst; evaluasi LCOE dan Payback Period; perbandingan performa sistem eksisting dan skenario baterai.	PLTS eksisting menghasilkan 79,04 MWh/tahun dengan PR 81,22%; hasil PVsyst 83,322 MWh/tahun dengan PR 84,44%. Penghematan sekitar Rp114.195.445/tahun dan reduksi emisi $\pm 1.323,6$ ton CO ₂ selama 25 tahun. Penambahan baterai dinilai kurang ekonomis.	Memberikan dasar evaluasi teknis-ekonomi-lingkungan PLTS. Relevan karena sama-sama menggunakan PVsyst dan menilai reduksi emisi, tetapi hanya pada satu bangunan rumah sakit dan belum menyusun strategi multi-lokasi.
2	Saputra et al. (2025)	Analisis dan perencanaan kapasitas optimal PLTS menggunakan PVsyst pada Gedung PT Kerantek Indonesia	Menentukan konfigurasi PLTS paling optimal berdasarkan variasi jenis dan kapasitas modul untuk memperoleh produksi energi dan Performance Ratio terbaik.	Empat variasi konfigurasi PLTS off-grid 10,94 kWp menggunakan modul monokristalin dan polikristalin 250 Wp dan 350 Wp; seluruh konfigurasi disimulasikan dengan PVsyst.	Variasi kedua dengan modul polikristalin 350 Wp menghasilkan performa terbaik: produksi 16,27 MWh/tahun dan PR 79,40%.	Menunjukkan efektivitas PVsyst untuk optimasi konfigurasi sebelum implementasi. Relevan untuk metode simulasi teknis, namun belum mengaitkan hasil dengan konsumsi energi aktual, baseline emisi, dan strategi dekarbonisasi.
3	Tukan et al. (2023)	Perancangan PLTS on-grid pada Gedung LPPM Universitas Kristen Indonesia Jakarta menggunakan PVsyst	Merancang PLTS optimal dari aspek teknis dan ekonomi sekaligus mengevaluasi penghematan biaya listrik dan kontribusi pengurangan emisi karbon.	Perancangan sistem PLTS on-grid dan simulasi PVsyst; analisis produksi energi, radiasi matahari, penghematan biaya, Break Even Point, dan reduksi emisi.	Kapasitas 10,675 kWp menghasilkan 17.726 kWh/tahun pada radiasi 1.654,1 kWh/m ² /tahun; penghematan Rp15.953.400/tahun; BEP 9,64 tahun; reduksi emisi 158,1 ton CO ₂ selama 25 tahun; biaya energi turun sekitar 50%.	Membuktikan manfaat teknis, ekonomi, dan lingkungan PLTS on-grid. Relevan karena menghubungkan PVsyst dengan carbon saving, tetapi masih satu lokasi dan belum mengembangkan tahapan strategi implementasi pada beberapa objek.
4	Aldo et al. (2025)	Perencanaan PLTS on-grid zero-export di Kantor BPPD Provinsi Kalimantan Barat menggunakan PVsyst 7.4	Menentukan kapasitas sistem, konfigurasi modul dan inverter, serta desain zero-export agar energi PLTS digunakan untuk memenuhi kebutuhan gedung tanpa ekspor ke jaringan PLN.	Perencanaan teknis PLTS on-grid; pemilihan modul dan inverter; simulasi PVsyst 7.4; evaluasi produksi energi, pemenuhan beban, dan Performance Ratio.	Kapasitas optimal 16,2 kWp dengan 27 modul 600 Wp dan inverter 15 kW; produksi 23.110 kWh/tahun; memenuhi sekitar 20,69% kebutuhan gedung; PR 84,37%; tidak ada surplus energi ke jaringan PLN.	Memberikan acuan desain zero-export dan optimasi kapasitas sesuai profil beban. Relevan dengan pengembangan PLTS rooftop, tetapi belum mengevaluasi reduksi emisi karbon dan belum menyusun strategi dekarbonisasi skala kawasan/multi-bandara.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode deskriptif-analitis pada delapan bandar udara PT Angkasa Pura Indonesia (Persero). Data penelitian terdiri atas data primer hasil observasi dan survei teknis serta data sekunder berupa konsumsi energi listrik tahun 2025, produksi PLTS eksisting, data teknis bangunan, radiasi matahari, dan faktor emisi jaringan listrik. Analisis meliputi perhitungan konsumsi energi dan baseline emisi karbon, evaluasi produksi serta carbon saving PLTS eksisting, dan simulasi pengembangan PLTS rooftop menggunakan PVsyst. Simulasi PVsyst menghasilkan kapasitas PLTS, produksi energi tahunan,

Performance Ratio (PR), dan potensi reduksi emisi. Analisis efisiensi energi melalui penggantian lampu non-LED menjadi LED juga dilakukan untuk menentukan potensi tambahan pengurangan emisi. Seluruh hasil analisis kemudian digunakan sebagai dasar penyusunan strategi pengurangan emisi berdasarkan potensi reduksi emisi, kondisi teknis, dan prioritas implementasi (Ebhotu & Tabakov, 2022; Saputra et al., 2025; Sitorus et al., 2023).



HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Konsumsi Energi Listrik dan Baseline Emisi Karbon

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa konsumsi energi listrik pada delapan bandar udara pada tahun 2025 mencapai 418.446.063 kWh/tahun. Konsumsi terbesar terdapat di Bandara Soekarno-Hatta (CGK) sebesar 295.885.620 kWh/tahun, sedangkan konsumsi terendah terdapat di Bandara Banyuwangi (BWX) sebesar 425.648 kWh/tahun. Data konsumsi tersebut digunakan sebagai dasar penentuan baseline emisi karbon.

Tabel 1. Konsumsi Energi dan Baseline Emisi Karbon Tahun 2025

No.	Bandara	Konsumsi Energi (kWh/tahun)	Faktor Emisi (kg CO ₂ /kWh)	Emisi CO ₂ (ton/tahun)
1	Soekarno-Hatta (CGK)	295.885.620	0,84	248.543,92
2	I Gusti Ngurah Rai (DPS)	85.749.189	0,52	44.589,58
3	Minangkabau (PDG)	7.622.344	0,86	6.555,22
4	Jenderal Ahmad Yani (SRG)	12.140.320	0,84	10.197,87
5	Sultan Mahmud Badaruddin II (PLM)	7.296.503	0,86	6.274,99
6	Supadio (PNK)	6.331.504	1,65	10.446,98
7	Sultan Iskandar Muda (BTJ)	2.994.935	0,86	2.575,64
8	Banyuwangi (BWX)	425.648	0,84	357,54
	Total	418.446.063	-	329.541,75

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian

Berdasarkan Tabel 1, total konsumsi energi listrik menghasilkan baseline emisi sebesar 329.541,75 ton CO₂/tahun. Bandara Soekarno-Hatta menjadi penyumbang emisi terbesar dengan 248.543,92 ton CO₂/tahun, diikuti I Gusti Ngurah Rai sebesar 44.589,58 ton CO₂/tahun. Distribusi emisi antarbandar udara menunjukkan perbedaan yang berkaitan dengan besarnya konsumsi energi listrik (Erawan et al., 2023; Ngurah et al., 2025).

Kontribusi PLTS Eksisting terhadap Pengurangan Emisi

Hasil pengolahan data produksi PLTS menunjukkan bahwa total energi yang dimanfaatkan secara langsung (self-consumption) dari PLTS eksisting mencapai 3.960.744 kWh/tahun. Energi tersebut menghasilkan reduksi emisi sebesar 4.005,89 ton CO₂/tahun (Sitorus et al., 2023; Tukan et al., 2023).

Tabel 2. Kontribusi PLTS Eksisting terhadap Pengurangan Emisi

No.	Bandara	Emisi PLN (ton CO ₂ /tahun)	Self-Consumption PLTS (kWh/tahun)	Reduksi Emisi (ton CO ₂ /tahun)	Kontribusi
1	Soekarno-Hatta (CGK)	248.543,92	1.651.000	1.386,84	0,56%
2	I Gusti Ngurah Rai (DPS)	44.589,58	272.287	141,59	0,32%
3	Minangkabau (PDG)	6.555,22	315.112,20	271,00	4,13%
4	Jenderal Ahmad Yani (SRG)	10.197,87	132.780	111,54	1,09%
5	Sultan Mahmud Badaruddin II (PLM)	6.274,99	559.153	473,13	7,66%
6	Supadio (PNK)	10.446,98	922.380	1.521,93	14,57%
7	Sultan Iskandar Muda (BTJ)	2.575,64	68.998,40	59,34	2,30%
8	Banyuwangi (BWX)	357,54	39.034	32,79	9,17%
	Total	329.541,74	3.960.744	4.005,89	1,22%

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian

Kontribusi PLTS eksisting terhadap total emisi listrik mencapai 1,22%. Kontribusi terbesar berdasarkan persentase terdapat di Bandara Supadio sebesar 14,57%. Secara absolut, reduksi emisi terbesar juga terdapat di Bandara Supadio sebesar 1.521,93 ton CO₂/tahun, diikuti Soekarno-Hatta sebesar 1.386,84 ton CO₂/tahun.

Potensi Pengembangan PLTS Berdasarkan Simulasi Pvsyst

Hasil simulasi PVsyst menunjukkan total potensi pengembangan PLTS sebesar 8.064,2 kWp dengan estimasi produksi energi sebesar 12.402,14 MWh/tahun dan potensi reduksi emisi

sebesar 9.997,58 ton CO₂/tahun (Bamisile et al., 2025; Ebhota & Tabakov, 2022; Saputra et al., 2025).

Tabel 3. Potensi Pengembangan PLTS Berdasarkan Simulasi PVsyst

No.	Bandara/Lokasi	Kapasitas (kWp)	Produksi Energi (MWh/tahun)	Specific Yield (kWh/kWp/tahun)	PR (%)	Reduksi Emisi (ton CO ₂ /tahun)
1	CGK – IAC	143	210,51	1.472	85,30	176,8
2	CGK – Depo Kalayang	726	1.062,60	1.464	84,81	892,6
3	CGK – Terminal 1	363	535,08	1.474	85,41	449,5
4	CGK – Terminal 2	814	1.194,30	1.467	85,01	1.003,2
5	CGK – Terminal 2	2.343	3.436,60	1.467	84,99	2.886,8
6	DPS – Terminal Domestik	726	1.286,40	1.772	85,00	668,9
7	DPS – Interdom	264	467,37	1.770	84,92	243,0
8	DPS – Pier	715	1.258,10	1.760	85,02	654,2
9	PDG – Terminal	265	378,13	1.427	86,28	325,2
10	PDG – Terminal	343	501,88	1.462	86,75	431,6
11	SRG – Chiller Plant	35,2	54,49	1.548	84,88	45,8
12	SRG – Terminal	125	194,43	1.550	85,01	163,3
13	SRG – Terminal	110	170,73	1.552	85,10	143,4
14	SRG – WTP	146	226,03	1.545	84,71	189,9
15	PLM – Terminal	319	461,42	1.446	84,79	396,8
16	PNK – Terminal	418	629,63	1.506	84,52	1.038,9
17	BTJ – Terminal	209	334,44	1.600	84,55	287,6
	Total	8.064,2	12.402,14	–	–	9.997,58

Sumber: Hasil simulasi PVsyst 8.0.6

Potensi terbesar terdapat pada kelompok lokasi Bandara Soekarno-Hatta, terutama Terminal 2 dengan kapasitas pengembangan 2.343 kWp, produksi energi 3.436,6 MWh/tahun, dan potensi reduksi emisi 2.886,8 ton CO₂/tahun. Secara keseluruhan, hasil PVsyst menghasilkan potensi produksi energi terbarukan sebesar 12.402,14 MWh/tahun dengan potensi pengurangan emisi sekitar 9.997,5 ton CO₂/tahun.

Efisiensi Energi melalui Penggantian Lampu Non-LED

Analisis efisiensi energi melalui simulasi penggantian lampu non-LED dengan lampu LED menunjukkan konsumsi energi sebelum penggantian sebesar 6.268.381,16 kWh/tahun dan turun menjadi 3.717.447,36 kWh/tahun setelah penggantian. Pengurangan konsumsi energi mencapai 2.550.933,80 kWh/tahun, sedangkan reduksi emisi mencapai 1.570,50 ton CO₂/tahun.

Tabel 4. Hasil Simulasi Penggantian Lampu Non-LED Menjadi LED

No.	Bandara	Energi Sebelum LED (kWh/tahun)	Energi Setelah LED (kWh/tahun)	Reduksi Emisi (ton CO ₂ /tahun)
1	Soekarno-Hatta (CGK)	701.743,68	326.177,28	315,48
2	I Gusti Ngurah Rai (DPS)	4.148.374,65	2.342.571,83	939,02
3	Minangkabau (PDG)	121.338,00	31.204,00	77,52
4	Jenderal Ahmad Yani (SRG)	615.012,23	523.869,90	76,56
5	Sultan Mahmud Badaruddin II (PLM)	183.600,00	73.440,00	94,74
6	Supadio (PNK)	498.312,60	420.184,35	67,19
	Total	6.268.381,16	3.717.447,36	1.570,50

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian

Penghematan energi terbesar terdapat di Bandara I Gusti Ngurah Rai sebesar 1.805.802,83 kWh/tahun atau 43,53%. Reduksi emisi pada lokasi tersebut mencapai 939,02 ton CO₂/tahun. Pada Bandara Soekarno-Hatta, penggantian lampu menghasilkan penghematan energi sebesar 375.566,40 kWh/tahun atau 53,52%, dengan reduksi emisi sebesar 315,48 ton CO₂/tahun.

Integrasi Program Pengurangan Emisi

Hasil rekapitulasi menunjukkan bahwa integrasi PLTS eksisting, pengembangan PLTS, dan penggantian lampu LED menghasilkan total potensi pengurangan emisi sebesar 16.379,19 ton CO₂/tahun atau sekitar 4,97% dari baseline emisi. Tambahan reduksi dari pengembangan PLTS dan program LED mencapai 12.381,03 ton CO₂/tahun.

Tabel 5. Rekapitulasi Potensi Pengurangan Emisi

Program	Potensi Reduksi Emisi (ton CO ₂ /tahun)
PLTS eksisting	4.005,89
Pengembangan PLTS	9.997,50
Penggantian lampu non-LED menjadi LED	Termasuk dalam tambahan potensi 12.381,03
Total potensi reduksi	16.379,19
Persentase terhadap baseline	4,97%

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian

Pengembangan PLTS memberikan kontribusi terbesar terhadap tambahan reduksi emisi. Program penggantian lampu LED memberikan kontribusi melalui penurunan konsumsi energi, sedangkan PLTS eksisting memberikan kontribusi melalui pemanfaatan energi surya untuk memenuhi kebutuhan beban lokal. Ketiga program membentuk kombinasi antara efisiensi energi dan substitusi energi jaringan dengan energi terbarukan (Kurniawan & Feinnudin, 2021; Erawan et al., 2023).

Prioritas Pengembangan dan Strategi Implementasi

Hasil analisis menempatkan Soekarno-Hatta (CGK) dan I Gusti Ngurah Rai (DPS) sebagai prioritas awal pengembangan PLTS, kemudian Supadio (PNK), Minangkabau (PDG), Sultan Mahmud Badaruddin II (PLM), Jenderal Ahmad Yani (SRG), dan Sultan Iskandar Muda (BTJ). Bandara Banyuwangi (BWG) memiliki potensi pengembangan PLTS sebesar 0 kWp pada hasil simulasi.

Tabel 6. Tahapan Strategi Implementasi Dekarbonisasi

Tahap	Periode	Fokus	Target Reduksi Kumulatif (ton CO ₂ / tahun)
Stage 1 – Preparation & Early Bird	2026	Baseline emisi, audit energi, EnPI, pemetaan LED, verifikasi PLTS dan penetapan prioritas	2.456,88
Stage 2 – Initial Deployment	2027	Implementasi LED prioritas dan optimalisasi PLTS eksisting	5.732,72
Stage 3 – Acceleration	2028	Perluasan PLTS, percepatan LED, integrasi monitoring energi dan emisi	10.646,48
Stage 4 – Full Deployment & Optimization	2029	Penyelesaian PLTS dan LED, optimalisasi energi serta integrasi EMS/monitoring	16.379,19
Continuous Improvement	2030 dan seterusnya	Monitoring, evaluasi EnPI, kinerja PLTS, LED, maintenance dan PDCA	≥16.379,19

Sumber: Hasil analisis penelitian

Strategi implementasi disusun dalam empat tahap dengan skema 15%-20%-30%-35% dari total potensi teknis PLTS sebesar 8.064,2 kWp. Tahap awal berfokus pada pengukuran dan validasi data, dilanjutkan dengan efisiensi energi dan optimalisasi PLTS eksisting, kemudian perluasan PLTS dan integrasi monitoring energi dan emisi, serta tahap akhir berupa optimalisasi dan peningkatan berkelanjutan. Target reduksi kumulatif meningkat dari 2.456,88 ton CO₂/tahun pada 2026 menjadi 16.379,19 ton CO₂/tahun pada 2029.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsumsi energi listrik pada delapan bandar udara mencapai 418,45 GWh/tahun dengan baseline emisi sebesar 329.541,75 ton CO₂/tahun. Distribusi konsumsi dan emisi menunjukkan dominasi Bandara Soekarno-Hatta dan I Gusti Ngurah Rai. Kondisi tersebut menempatkan pengelolaan energi pada bandar udara dengan konsumsi tinggi sebagai bagian utama dalam strategi pengurangan emisi (Kurniawan & Feinnudin, 2021; Ngurah et al., 2025). PLTS eksisting menghasilkan reduksi emisi sebesar 4.005,89 ton CO₂/tahun melalui self-consumption sebesar 3.960.744 kWh/tahun. Hasil simulasi pengembangan PLTS menunjukkan tambahan potensi produksi energi sebesar 12.402,14 MWh/tahun dan reduksi emisi sekitar 9.997,5 ton CO₂/tahun. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pengembangan PLTS memberikan potensi reduksi emisi yang lebih besar dibandingkan kontribusi PLTS eksisting (Maulana et al., 2026; Tukan et al., 2023). Program efisiensi penerangan menghasilkan pengurangan konsumsi energi sebesar 2.550.933,80 kWh/tahun dan reduksi emisi sebesar 1.570,50 ton CO₂/tahun. Integrasi efisiensi energi dengan pengembangan PLTS menghasilkan total potensi reduksi emisi sebesar 16.379,19 ton CO₂/tahun atau 4,97% dari baseline. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa strategi dekarbonisasi terdiri atas tiga instrumen utama, yaitu optimalisasi PLTS eksisting, pengembangan PLTS rooftop, dan efisiensi energi melalui penggantian lampu non-LED menjadi LED. Ketiga instrumen tersebut ditempatkan dalam tahapan implementasi yang terukur melalui Preparation & Early Bird, Initial Deployment, Acceleration, Full Deployment & Optimization, dan Continuous Improvement (Kurniawan & Feinnudin, 2021; Sitorus et al., 2023).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis dan strategi pengurangan emisi gas karbon di lingkungan bandar udara PT Angkasa Pura Indonesia (Persero), dapat disimpulkan bahwa konsumsi energi listrik pada delapan bandar udara yang menjadi objek penelitian masih memiliki kontribusi yang signifikan terhadap pembentukan emisi karbon. Konsumsi energi listrik tahun 2025 mencapai 418.446.063 kWh/tahun dengan baseline emisi sebesar 329.541,75 ton CO₂/tahun. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan konsumsi energi tidak cukup hanya berorientasi pada pemenuhan kebutuhan operasional, tetapi perlu diarahkan pada pengendalian konsumsi, peningkatan efisiensi energi, dan substitusi sebagian kebutuhan energi listrik jaringan dengan sumber energi terbarukan. PLTS eksisting dengan total kapasitas 4.294 kWp telah memberikan kontribusi nyata dalam mengurangi penggunaan energi listrik yang bersumber dari jaringan PLN. Berdasarkan data produksi aktual yang dianalisis, PLTS eksisting memberikan potensi pengurangan emisi sebesar 4.005,89 ton CO₂/tahun atau sekitar 1,21% dari baseline emisi. Meskipun kontribusinya terhadap keseluruhan baseline masih relatif kecil, hasil tersebut membuktikan bahwa PLTS eksisting merupakan aset strategis yang perlu dioptimalkan, terutama melalui peningkatan pemanfaatan energi secara *self-consumption*, pemantauan kinerja, serta pengembangan kapasitas pada lokasi yang memiliki potensi teknis dan kebutuhan energi tinggi.

Hasil identifikasi potensi *rooftop* dan simulasi PVsyst menunjukkan bahwa delapan bandar udara memiliki potensi pengembangan PLTS sebesar 8.064,2 kWp, dengan estimasi produksi energi sebesar 12.402,14 MWh/tahun dan tambahan potensi pengurangan emisi sebesar 9.997,5 ton CO₂/tahun. Hasil simulasi juga memiliki deviasi hanya 0,007% terhadap perhitungan manual, sehingga hasil PVsyst dapat digunakan sebagai dasar teknis untuk memperkirakan kapasitas, produksi energi, dan potensi reduksi emisi dalam tahap perencanaan. Temuan utama penelitian ini adalah bahwa pengurangan emisi karbon pada bandar udara akan lebih efektif apabila tidak hanya mengandalkan penambahan kapasitas PLTS, tetapi dilakukan melalui integrasi pengurangan kebutuhan energi dan peningkatan penggunaan energi terbarukan. Berdasarkan hasil penelitian, integrasi efisiensi energi melalui penggantian lampu non-LED menjadi LED, optimalisasi PLTS eksisting, dan pengembangan PLTS baru menghasilkan potensi reduksi emisi sebesar 16.379,19 ton CO₂/tahun atau 4,97% dari baseline emisi. Atas dasar temuan tersebut, penelitian ini menghasilkan konsep Integrated Airport Decarbonization Strategy dengan siklus implementasi Measure–Reduce–Secure–Deploy–Monitor–Improve, yang menempatkan pengukuran baseline dan efisiensi energi sebagai tahap awal, dilanjutkan dengan pengamanan kuota, implementasi PLTS, monitoring kinerja, dan peningkatan berkelanjutan. Strategi tersebut kemudian diterjemahkan ke dalam tahapan implementasi 15%–20%–30%–35% berdasarkan potensi teknis PLTS, sehingga strategi dekarbonisasi dapat dilaksanakan secara bertahap, terukur, dan dievaluasi pada setiap tahap.

Dengan demikian, novelty penelitian ini terletak pada pengintegrasian baseline konsumsi dan emisi, evaluasi PLTS eksisting, pemodelan potensi PLTS berbasis PVsyst, efisiensi penerangan melalui LED, serta *staging* implementasi ke dalam satu kerangka strategi dekarbonisasi bandar udara. Kerangka tersebut memberikan pendekatan yang lebih operasional karena keputusan pengurangan emisi tidak hanya didasarkan pada besarnya potensi energi terbarukan, tetapi juga mempertimbangkan efisiensi energi, kesiapan teknis, prioritas lokasi, monitoring kinerja, dan tahapan implementasi. Dengan pendekatan tersebut, program pengurangan emisi dapat dikembangkan dari sekadar kegiatan pengadaan teknologi menjadi suatu proses perbaikan kinerja energi yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aldo, A., Hiendro, A., & Khwee, K. H. (2025). Perencanaan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sistem on-grid di kantor Badan Pengelola Perbatasan Daerah Kalimantan Barat menggunakan program PVsyst. *Jurnal Penelitian Ilmiah Interdisipliner*, 9(10), 17–30.
- Bamisile, O., Acen, C., Cai, D., Huang, Q., & Staffell, I. (2025). The environmental factors affecting solar photovoltaic output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 208, Article 115073. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115073>
- Ebhota, W. S., & Tabakov, P. Y. (2022). Impact of photovoltaic panel orientation and elevation operating temperature on solar photovoltaic system performance. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(2), 591–599. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.43676>
- Erawan, I. N. C., Setiawan, I. N., & Sukerayasa, I. W. (2023). Analisa mitigasi emisi karbon serta keekonomian pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap on grid 463,25 kWp di perusahaan farmasi pada kawasan PT Jakarta Industrial Estate Pulogadung, Jakarta Timur. *Jurnal SPEKTRUM*, 10(3), 29–37. <https://doi.org/10.24843/SPEKTRUM.2023.v10.i03.p4>
- Kepmen ESDM No. 163.K_HK.02-MEM.S-2021 Faktor Emisi.pdf. (n.d.).

- Kurniawan, R., & Feinnudin, A. (2021). Assessing the implementation of the energy management system in the first ISO 50001 building in Indonesia. *Indonesian Journal of Energy*, 4(2), 129–139. <https://doi.org/10.33116/ije.v4i2.125>
- Maulana, M. D., Adriyanto, F., & Inayati, I. (2026). Analisis tekno-ekonomi PLTS on-grid rooftop IGD RSUD Soedomo Trenggalek. *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 28(3), 147–156. <https://doi.org/10.14710/transmisi.28.3.147-156>
- Ngurah, I. G. N. M., Widyasari, N. L., & Darmayasa, I. G. O. (2025). Analisis carbon footprint pada jasa akomodasi pariwisata di Kabupaten Badung, Bali. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 26(1), 031–039. <https://doi.org/10.55981/jtl.2025.3626>
- Peraturan Pemerintah Nomor 40 Tahun 2025 tentang Kebijakan Energi Nasional
- Saputra, D. A., Taqiyuddin, T., & Setianingsih, D. P. (2025). Analisis dan perencanaan kapasitas optimal pembangkit listrik tenaga surya menggunakan software PVSyst. *Jurnal Teknik Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, 10(1), 714–722. <https://doi.org/10.36277/jteuniba.v10i1.1278>
- Sitorus, A. H., Hidayati, N., Nufus, T. H., & Eka, A. (2023). Simulasi software PVSyst 7.3 pada rancangan sistem PLTS on-grid 48,4 kWp di Gedung Perpustakaan PNJ serta analisa aspek tekno-ekonomi dan carbon saving. *Jurnal Mekanik Terapan*, 4(3), 156–166. <https://doi.org/10.32722/jmt.v4i3.5996>
- Tukan, B. R., Widodo, B., & Purba, R. (2023). Perancangan pembangkit listrik tenaga surya on-grid di Gedung Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat UKI-Jakarta menggunakan aplikasi PVSyst. *Lektrokom: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 6(2), 12–24. <https://doi.org/10.33541/lektrokom.v6i2.5160>