



Analisis Efisiensi Sistem PLTS di MLCP Terminal Domestik Bandara I Gusti Ngurah Rai

Akhmad Romdhon Farikh Aziz¹ I Wayan Juliarta² IGK. Rai Darmaja³

Program Studi Diploma IV Teknik Listrik Bandara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug,
Tangerang, Banten, Indonesia^{1,2,3}

Email: farik.aziz03@gmail.com¹ juliarta71@gmail.com² rdarmaja@gmail.com³

Abstrak

Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai memiliki kebutuhan energi listrik yang tinggi sehingga pengelola memasang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap *on-grid* berkapasitas 100,98 kWp di gedung *Multi-Level Car Parking* (MLCP) Terminal Domestik. Penelitian terdahulu di bandar udara ini masih berfokus pada perencanaan dan proyeksi, sehingga kinerja aktual sistem yang telah beroperasi belum dievaluasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis produksi energi, *Final Yield*, *Capacity Factor*, estimasi penghematan biaya listrik, deviasi terhadap baseline perencanaan, kondisi pembebanan MLCP, dan estimasi emisi yang dihindari. Metode yang digunakan adalah kuantitatif deskriptif berbasis data operasional Januari–Desember 2025, dipilih karena kinerja PLTS dinilai dari besaran terukur tanpa perlakuan terhadap sistem. Hasil menunjukkan produksi energi sebesar 176.436,70 kWh/tahun, *Final Yield* 1.747,24 kWh/kWp (4,79 kWh/kWp/hari), dan *Capacity Factor* 19,95%. Estimasi penghematan biaya listrik sebesar Rp192.225.314 termasuk PPJ 5%. Produksi aktual mencapai 77,71% dari baseline perencanaan 227.059,20 kWh (deviasi 22,29%). Beban MLCP rata-rata 48,67 kW dengan maksimum 60,16 kW, dan estimasi emisi yang dihindari sebesar 153,50 ton CO₂/tahun. PLTS terbukti produktif, tetapi realisasinya berada di bawah proyeksi. Penelitian lanjutan disarankan menambahkan pengukuran iradiasi dan temperatur modul agar *Performance Ratio* dan sumber rugi-rugi dapat dihitung, serta mengukur energi beban per interval untuk menghitung *Load Coverage*.

Kata Kunci: PLTS Atap, *Final Yield*, *Capacity Factor*, Penghematan Energi, *Green Airport*



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 memerlukan pasokan listrik yang besar dan kontinu untuk sistem pencahayaan, pendingin ruangan, *baggage handling system*, keamanan, navigasi, dan pelayanan penumpang. Sebagian besar listrik di Indonesia masih dibangkitkan dari energi fosil sehingga peningkatan konsumsi listrik berdampak pada emisi gas rumah kaca. Indonesia memiliki intensitas penyinaran matahari rata-rata sekitar 4,8 kWh/m²/hari, dan pemerintah mendorong pemanfaatan PLTS atap yang terhubung ke jaringan melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024 (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2024). Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai, yang beroperasi hampir 24 jam, menerapkan kebijakan tersebut dengan memasang PLTS atap *on-grid* 100,98 kWp di gedung MLCP Terminal Domestik.

Kinerja PLTS terhubung jaringan umumnya dievaluasi dengan parameter berbasis IEC 61724, yaitu *Final Yield*, *Reference Yield*, *Performance Ratio*, dan *Capacity Factor* (Khalid et al., 2016; Srivastava et al., 2020). Indarto et al. (2020) memperoleh *Capacity Factor* 14,07% dan *Performance Ratio* 82,42% pada PLTS 10,6 kWp di Serpong, sedangkan Ma et al. (2017) menunjukkan bahwa kondisi radiasi dan operasi nyata sangat memengaruhi hasil energi. Faktor lingkungan seperti temperatur modul dan debu (*soiling*) juga terbukti menurunkan keluaran PLTS (Omar & Mahmoud, 2019; Sharma et al., 2024), dan pembersihan panel di Bandara Sultan Muhammad Salahudin Bima meningkatkan produksi energi sebesar 1,63% (Sandrawati et al., 2023). Pada lingkungan bandar udara, Sukadana et al. (2022)

memproyeksikan PLTS 240 kWp di Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai mampu menghasilkan sekitar 451 MWh/tahun, dan Wira Dharma et al. (2024) merancang PLTS 333 kWp di atap gedung parkir bandara yang sama dengan proyeksi 604.929 kWh/tahun.

Penelitian di Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai tersebut masih berada pada tahap perencanaan, simulasi, dan proyeksi. Belum ada evaluasi kinerja PLTS yang sudah beroperasi menggunakan data operasional aktual, termasuk perbandingan realisasi terhadap baseline perencanaan dan kaitannya dengan kondisi beban. Kebaruan penelitian ini adalah evaluasi terpadu berbasis data operasional satu tahun penuh (2025) yang mencakup aspek teknis (produksi energi, *Final Yield*, *Capacity Factor*, deviasi terhadap baseline), sisi beban (profil beban dan pengukuran *power meter*), ekonomi (penghematan dan *payback period*), serta lingkungan (emisi yang dihindari). Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengetahui energi listrik yang dihasilkan PLTS MLCP Terminal Domestik selama Januari–Desember 2025; (2) menghitung *Final Yield* dan *Capacity Factor*; (3) menghitung estimasi penghematan biaya listrik dan membandingkannya dengan proyeksi perencanaan; serta (4) menganalisis kondisi pembebanan MLCP berdasarkan data beban 2025 dan pengukuran *power meter*.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/ Tahun	Judul	Tujuan	Metode	Hasil	Kontribusi dan relevansi
1	Sukadana et al. (2022)	Proyeksi potensi PLTS dalam mendukung program Ecogreen Airport di Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai Bali	Memproyeksikan potensi PLTS di bandar udara	Perencanaan dan estimasi produksi energi	PLTS 240 kWp monokristalin diproyeksikan menghasilkan ±451 MWh/tahun dan layak mendukung green airport	Lokasi sama; masih proyeksi, sedangkan penelitian ini mengevaluasi sistem terpasang dengan data aktual
2	Wira Dharma et al. (2024)	Perancangan PLTS pada atap gedung parkir Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai	Merancang PLTS atap on-grid di gedung parkir	Perancangan dan simulasi produksi energi	PLTS 333 kWp (600 modul 555 Wp, 4 inverter 100 kW) diproyeksikan menghasilkan 604.929 kWh/tahun	Objek gedung parkir sejenis; penelitian ini menilai realisasi operasional dan deviasi terhadap baseline
3	Sandrawati et al. (2023)	Analisa kebersihan panel surya terhadap keluaran PLTS on-grid 200 kWp Bandara Sultan Muhammad Salahudin Bima	Mengkaji pengaruh kebersihan panel terhadap keluaran PLTS	Pengukuran keluaran sebelum dan sesudah pembersihan	Pembersihan panel meningkatkan produksi energi sebesar 1,63%	Dasar pembahasan soiling sebagai salah satu kemungkinan penyebab deviasi produksi
4	Indarto et al. (2020)	Performance analysis and evaluation of a 10.6 kWp grid-connected photovoltaic system in Serpong	Mengevaluasi kinerja PLTS terhubung jaringan	Analisis parameter kinerja berbasis IEC 61724	CF 14,07%, PR 82,42%, Final Yield 3,38 kWh/kWp/hari, efisiensi inverter 96,63%	Pembandingan nilai Final Yield dan Capacity Factor pada iklim tropis Indonesia
5	Ma et al. (2017)	Long term performance analysis of a standalone photovoltaic system under real conditions	Menganalisis kinerja jangka panjang PLTS pada kondisi nyata	Pemantauan data operasional jangka panjang	Reference Yield 4,08 kWh/kWp/hari, Final Yield 2,45 kWh/kWp/hari, PR 60%	Menegaskan pentingnya evaluasi berbasis data operasional nyata, bukan hanya proyeksi

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif. Metode ini dipilih karena kinerja PLTS dinilai dari data numerik hasil operasi (energi, daya, arus, dan biaya) tanpa memberikan perlakuan terhadap sistem, lalu dideskripsikan menggunakan parameter kinerja baku. Penelitian dilaksanakan di gedung MLCP Terminal Domestik Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai, Tuban, Badung, Bali, yang dikelola PT Angkasa Pura Indonesia. Objek penelitian adalah PLTS atap *on-grid* tanpa baterai berkapasitas 100,98 kWp yang tersusun atas 11 *string* × 17 modul monokristalin 540 Wp (187 modul, koefisien temperatur daya

-0,35%/°C) dengan *string inverter* Huawei SUN2000-40KTL-M3 dan terhubung ke panel LVMDP-GP.

Populasi penelitian adalah seluruh data operasional PLTS MLCP Terminal Domestik. Sampel ditentukan secara *purposive*, yaitu data bulanan Januari–Desember 2025 yang tercatat lengkap pada sistem pemantauan, karena periode tersebut mencakup musim hujan, peralihan, dan kemarau. Data yang digunakan meliputi: (1) rekapitulasi produksi energi PLTS bulanan dan tarif LWBP tahun 2025; (2) dokumen teknis berupa *nameplate* modul dan inverter, *wiring*, *layout PV array*, dan *single line diagram*; (3) data beban bulanan LV MLCP Domestik tahun 2025; (4) pembacaan *power meter* Socomec DIRIS A40; serta (5) dokumen perencanaan berisi baseline produksi 227.059,20 kWh/tahun, proyeksi penghematan Rp271.562.803,20/tahun, dan biaya pemasangan Rp2.150.167.661,15. Data dikumpulkan melalui observasi, dokumentasi, dan studi literatur.

Pengolahan data dilakukan dengan merekapitulasi dan memverifikasi data bulanan, lalu menghitung parameter kinerja menggunakan persamaan (1)–(6). *Final Yield* (Y_f) menyatakan energi AC per kWp kapasitas terpasang, sedangkan *Capacity Factor* (CF) menyatakan tingkat pemanfaatan kapasitas selama satu tahun (8.760 jam) (Khalid et al., 2016; Srivastava et al., 2020). Penghematan dihitung dari energi bulanan dikalikan tarif LWBP bulanan pada rekapitulasi (Rp1.035,78–Rp1.039,78/kWh) ditambah Pajak Penerangan Jalan (PPJ) 5%. Deviasi terhadap baseline, *payback period* sederhana, dan emisi yang dihindari dihitung dengan faktor emisi grid JAMALI sebesar 0,87 kg CO₂/kWh (Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2019).

$$Y_f = E_{AC} / P_{inst} \quad (1)$$

$$CF = E_{AC} / (P_{inst} \times 8.760) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Penghematan} = \sum (E_{bulan} \times \text{Tarif}_{bulan}) \times 1,05 \quad (3)$$

$$\text{Deviasi} = (E_{proyeksi} - E_{aktual}) / E_{proyeksi} \times 100\% \quad (4)$$

$$PBP = \text{Biaya investasi} / \text{Penghematan tahunan} \quad (5)$$

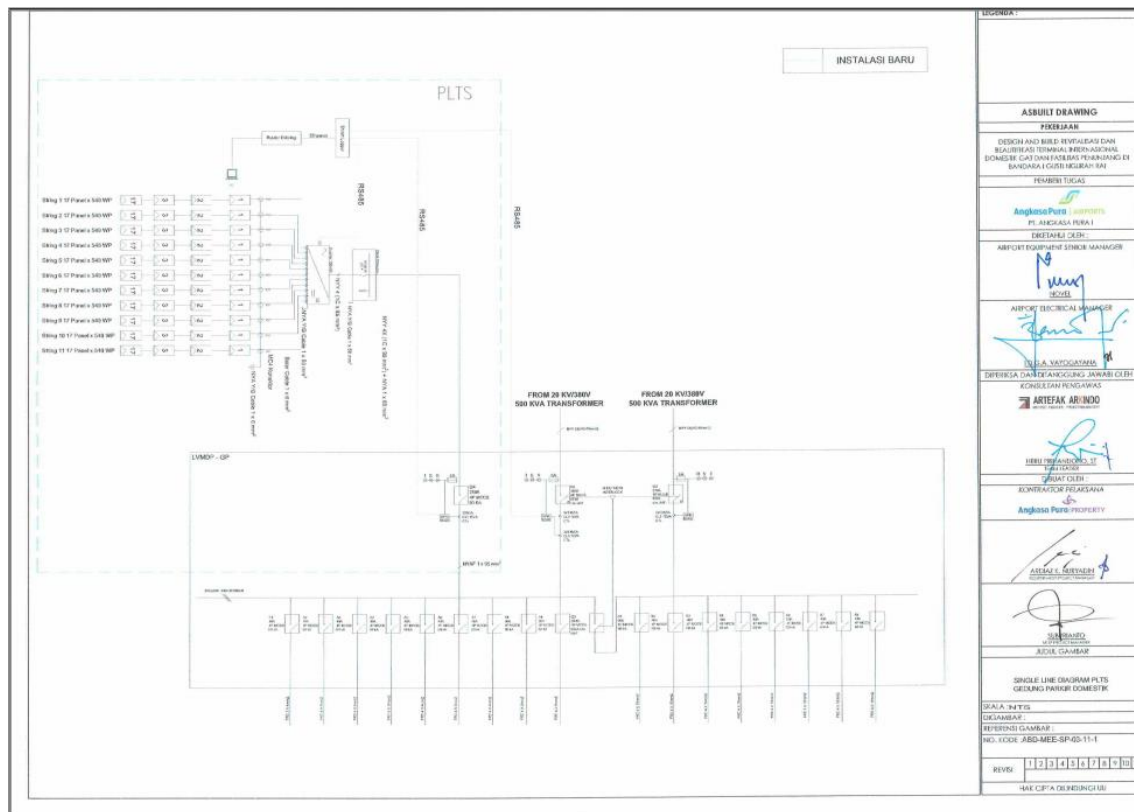
$$E_{red} = E_{AC} \times FE \quad (6)$$

Performance Ratio tidak dihitung karena data iradiasi yang tervalidasi untuk periode yang sama tidak tersedia, dan *Load Coverage* tidak dihitung karena energi beban dan energi PLTS yang terserap beban pada interval yang sama belum tersedia. Kedua parameter tersebut tidak ditetapkan dengan asumsi.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada PLTS atap MLCP Terminal Domestik Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai. Verifikasi dari dokumen *wiring* menunjukkan kapasitas $11 \times 17 \times 540 \text{ Wp} = 100.980 \text{ Wp}$, sama dengan kapasitas terpasang 100,98 kWp. Hubungan *PV array*, perangkat proteksi dan pemantauan, inverter, panel LVMDP-GP, serta dua transformator 20 kV/380 V 500 kVA ditunjukkan pada Gambar 1.

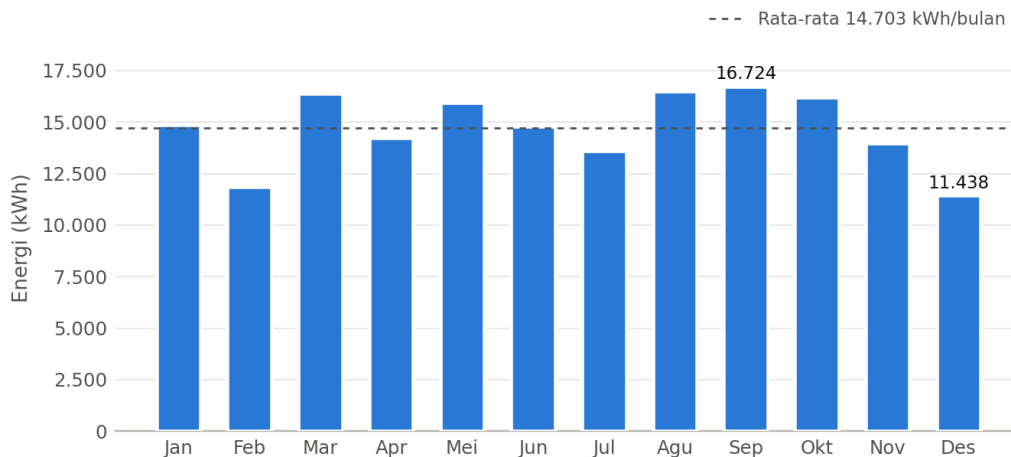


Gambar 1. Single Line Diagram PLTS Gedung Parkir Domestik

Produksi energi, *Final Yield*, *Capacity Factor*, dan estimasi penghematan per bulan disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 2. Total produksi tahun 2025 sebesar 176.436,70 kWh dengan rata-rata 14.703,06 kWh/bulan atau 483,39 kWh/hari. Produksi tertinggi terjadi pada September (16.724,37 kWh; CF 23,00%) dan terendah pada Desember (11.438,10 kWh; CF 15,22%).

Tabel 1. Produksi Energi, Indikator Kinerja, dan Estimasi Penghematan PLTS Tahun 2025

Bulan	Energi (kWh)	Y_f (kWh/kWp)	CF (%)	Penghematan termasuk PPJ 5% (Rp)
Januari	14.861,57	147,17	19,78	16.162.983
Februari	11.857,33	117,42	17,47	12.895.665
Maret	16.392,27	162,33	21,82	17.827.725
April	14.219,39	140,81	19,56	15.464.568
Mei	15.919,55	157,65	21,19	17.330.325
Juni	14.794,56	146,51	20,35	16.121.173
Juli	13.605,24	134,73	18,11	14.839.494
Agustus	16.481,60	163,22	21,94	17.976.794
September	16.724,37	165,62	23,00	18.241.588
Oktober	16.185,30	160,28	21,54	17.653.614
November	13.957,42	138,22	19,20	15.223.623
Desember	11.438,10	113,27	15,22	12.487.763
Total/tahun	176.436,70	1.747,24	19,95	192.225.314



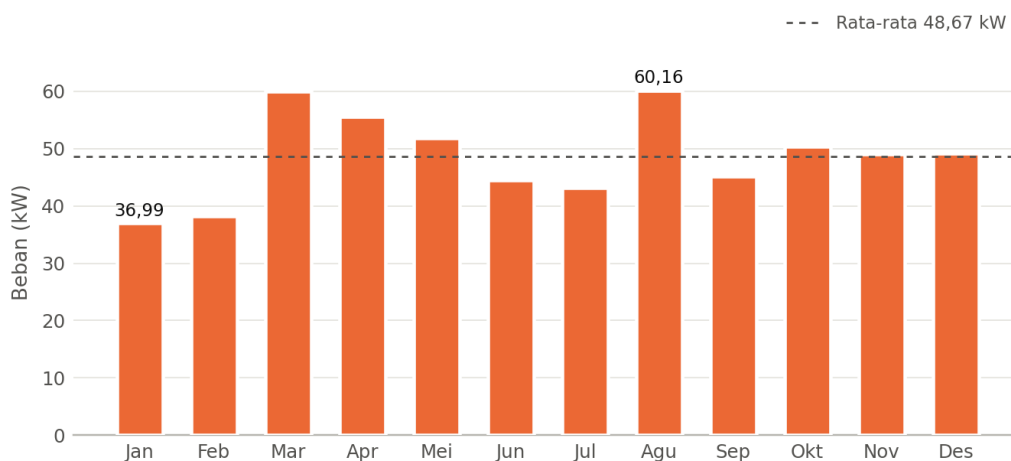
Gambar 2. Produksi Energi Bulanan PLTS MLCP Terminal Domestik Tahun 2025

Final Yield tahunan sebesar $176.436,70 / 100,98 = 1.747,24$ kWh/kWp atau 4,79 kWh/kWp/hari, sedangkan *Capacity Factor* sebesar $176.436,70 / (100,98 \times 8.760) \times 100\% = 19,95\%$. Estimasi penghematan sebelum PPJ sebesar Rp183.071.728 dan komponen PPJ 5% sebesar Rp9.153.586, sehingga total penghematan tahun 2025 sebesar Rp192.225.314. Dengan persamaan (6), emisi yang dihindari sebesar $176.436,70 \times 0,87 = 153.499,93$ kg CO₂ atau 153,50 ton CO₂/tahun. Perbandingan realisasi terhadap dokumen perencanaan disajikan pada Tabel 2. Produksi aktual mencapai 77,71% dari baseline, dengan deviasi 50.622,50 kWh (22,29%). Penghematan aktual lebih rendah Rp79.337.489 daripada proyeksi.

Tabel 2. Perbandingan Proyeksi Perencanaan dengan Realisasi Tahun 2025

Parameter	Proyeksi	Aktual 2025	Selisih
Produksi energi (kWh/tahun)	227.059,20	176.436,70	50.622,50 (22,29%)
Penghematan (Rp/tahun)	271.562.803	192.225.314	79.337.489
Payback period sederhana (tahun)	7,92	11,19	3,27

Data beban LV MLCP Domestik tahun 2025 (Gambar 3) menunjukkan beban rata-rata 48,67 kW, maksimum 60,16 kW pada Agustus, dan minimum 36,99 kW pada Januari. Pembacaan sesaat *power meter* Socomec DIRIS A40 menunjukkan arus fasa I1 = 97,65 A, I2 = 87,72 A, dan I3 = 86,19 A ($\Sigma I = 271,56$ A) dengan arus netral sekitar 20,25 A.



Gambar 3. Profil Beban Bulanan LV MLCP Domestik Tahun 2025

Pembahasan

PLTS MLCP Terminal Domestik menghasilkan 176.436,70 kWh pada tahun 2025, sehingga menjawab tujuan pertama. *Final Yield* 4,79 kWh/kWp/hari dan *Capacity Factor* 19,95% lebih tinggi daripada PLTS 10,6 kWp di Serpong yang memperoleh 3,38 kWh/kWp/hari dan CF 14,07% (Indarto et al., 2020), serta lebih tinggi daripada *Final Yield* 2,45 kWh/kWp/hari pada sistem yang dilaporkan Ma et al. (2017). Nilai ini menunjukkan produktivitas per kWp yang baik untuk iklim Bali, sekaligus menjawab tujuan kedua. Variasi produksi bulanan mengikuti musim. Produksi terendah pada Desember dan Februari terjadi pada bulan dengan curah hujan tinggi (405,3 mm dan 479,8 mm menurut data Stasiun Meteorologi I Gusti Ngurah Rai), sedangkan produksi tertinggi terjadi pada Agustus–Oktober saat musim kemarau dan persentase penyinaran 80–90%. Namun, hubungan tersebut tidak sepenuhnya linier: Januari memiliki penyinaran terendah (38%) tetapi produksinya mendekati rata-rata. Hal ini sejalan dengan pandangan bahwa keluaran PLTS ditentukan bersama oleh iradiasi, temperatur modul, dan kondisi permukaan modul (Schweiger et al., 2017; Omar & Mahmoud, 2019), sehingga data cuaca bulanan saja belum cukup untuk menjelaskan kinerja.

Temuan terpenting adalah deviasi 22,29% terhadap baseline perencanaan. Produksi aktual yang hanya 77,71% dari proyeksi berdampak langsung pada ekonomi: penghematan aktual Rp192,2 juta/tahun membuat *payback period* sederhana menjadi sekitar 11,19 tahun, lebih lama 3,27 tahun daripada proyeksi 7,92 tahun. Deviasi ini belum dapat diatribusikan pada satu komponen karena data pengukuran pemisahan rugi-rugi tidak tersedia. Meskipun demikian, lokasi MLCP yang terpapar polusi kendaraan dan aktivitas bandar udara menjadikan *soiling* sebagai kandidat penyebab yang kuat, mengingat pembersihan panel terbukti meningkatkan produksi (Sandrawati et al., 2023) dan debu menurunkan kinerja PLTS di iklim tropis Indonesia (Sibagariang et al., 2026). Temperatur modul yang tinggi di wilayah pesisir juga menurunkan daya sesuai koefisien $-0,35\%/^{\circ}\text{C}$. Dari sisi beban, rata-rata daya setara produksi PLTS sepanjang tahun adalah 176.436,70 kWh / 8.760 jam $\approx 20,1$ kW, atau sekitar 41% dari beban rata-rata MLCP 48,67 kW. Angka ini hanya gambaran kasar, bukan *Load Coverage*, karena produksi PLTS terkonsentrasi pada siang hari sedangkan beban berlangsung sepanjang hari. Pembacaan *power meter* menunjukkan arus fasa I1 sekitar 10–11 A lebih tinggi daripada dua fasa lainnya dan terdapat arus netral 20,25 A, yang mengindikasikan ketidakseimbangan beban antarfasa pada saat pengukuran. Temuan ini menjawab tujuan keempat. Dibandingkan Sukadana et al. (2022) dan Wira Dharma et al. (2024) yang memproyeksikan produksi PLTS di bandar udara yang sama, penelitian ini memberikan data realisasi yang menunjukkan bahwa proyeksi perencanaan cenderung lebih optimistis daripada kinerja lapangan. Temuan ini penting bagi pengembangan PLTS berikutnya di lingkungan *green airport*, yaitu perlunya faktor koreksi rugi-rugi lapangan dalam perencanaan dan program pemeliharaan yang terjadwal.

KESIMPULAN

PLTS atap *on-grid* 100,98 kWp di MLCP Terminal Domestik Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai menghasilkan 176.436,70 kWh selama tahun 2025, dengan *Final Yield* 1.747,24 kWh/kWp (4,79 kWh/kWp/hari) dan *Capacity Factor* 19,95%. Estimasi penghematan biaya listrik sebesar Rp192.225.314 per tahun termasuk PPJ 5%, dan emisi yang dihindari sekitar 153,50 ton CO₂/tahun. Produksi aktual hanya mencapai 77,71% dari baseline perencanaan, sehingga *payback period* sederhana bergeser dari 7,92 tahun (proyeksi) menjadi sekitar 11,19 tahun (aktual). Beban MLCP rata-rata 48,67 kW dengan maksimum 60,16 kW, dan pengukuran sesaat menunjukkan indikasi ketidakseimbangan beban antarfasa. Kebaruan penelitian ini adalah evaluasi terpadu teknis, beban, ekonomi, dan lingkungan berbasis data operasional aktual PLTS bandar udara, yang menunjukkan adanya kesenjangan antara proyeksi

perencanaan dan realisasi. Keterbatasan penelitian ini adalah tidak tersedianya data iradiasi dan temperatur modul yang tervalidasi, sehingga *Performance Ratio* dan penyebab deviasi tidak dapat dikuantifikasi, serta tidak tersedianya data energi beban per interval sehingga *Load Coverage* belum dihitung. Analisis ekonomi juga masih menggunakan *payback period* sederhana tanpa biaya O&M, degradasi, dan nilai waktu uang. Penelitian selanjutnya disarankan memasang sensor iradiasi, temperatur modul, dan *soiling* yang terintegrasi dengan sistem pemantauan, menyusun jadwal pembersihan dan inspeksi modul secara berkala, menganalisis degradasi modul jangka panjang di lingkungan bandara pesisir, serta menghitung kelayakan investasi dengan NPV dan IRR.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada PT Angkasa Pura Indonesia (InJourney Airports) Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai atas dukungan data dan kesempatan penelitian, serta kepada Program Studi Diploma IV Teknik Listrik Bandara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug.

DAFTAR PUSTAKA

- Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. (2019). *Faktor emisi gas rumah kaca sistem ketenagalistrikan tahun 2019*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- Indarto, A., Nurdiana, E., Wibisono, G., & Subiyanto, I. (2020). Performance analysis and evaluation of a 10.6 kWp grid-connected photovoltaic system in Serpong. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 909(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/909/1/012019>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2024). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 2 Tahun 2024 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum*.
- Khalid, A. M., Mitra, I., Warmuth, W., & Schacht, V. (2016). Performance ratio – Crucial parameter for grid connected PV plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1139–1158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.066>
- Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2017). Long term performance analysis of a standalone photovoltaic system under real conditions. *Applied Energy*, 201, 320–331. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.126>
- Omar, M. A., & Mahmoud, M. M. (2019). Temperature impacts on the performance parameters of grid-connected PV systems based on field measurements in Palestine. *IET Renewable Power Generation*, 13(14), 2541–2548. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.6281>
- Sandrawati, S., Kumara, I. N. S., & Setiawan, I. N. (2023). Analisa kebersihan panel surya terhadap keluaran PLTS on-grid 200 kWp Bandara Udara Sultan Muhammad Salahudin Bima. *Jurnal SPEKTRUM*, 10(4), 253–262. <https://doi.org/10.24843/SPEKTRUM.2023.v10.i04.p30>
- Schweiger, M., Herrmann, W., Gerber, A., & Rau, U. (2017). Understanding the energy yield of photovoltaic modules in different climates by linear performance loss analysis of the module performance ratio. *IET Renewable Power Generation*, 11(5), 558–565. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0682>
- Sharma, S., Malik, P., & Sinha, S. (2024). The impact of soiling on temperature and sustainable solar PV power generation: A detailed analysis. *Renewable Energy*, 237, 121864. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121864>
- Sibagariang, Y. P., Rosyid, O. A., Priyadi, A., Tarno, Sutrisno, B., Kamil, B., Lande, N. M., Khairiani, D., Ridlo, M. R., & Sitorus, T. B. (2026). Photovoltaic performance degradation from dust



and cleaning frequency in tropical Indonesia. *Solar Energy*, 308, 114421. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2026.114421>

Srivastava, R., Tiwari, A. N., & Giri, V. K. (2020). An overview on performance of PV plants commissioned at different places in the world. *Energy for Sustainable Development*, 54, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.10.004>

Sukadana, I. W., Anto, A., & Asna, I. M. (2022). Proyeksi potensi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dalam mendukung program Ecogreen Airport di Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai Bali. *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, 8(2), 250–255. <https://doi.org/10.24036/jtev.v8i2.116721>

Wira Dharma, G. A., Giriantari, D., Sukerayasa, I. W., Setiawan, I. N., Ariastina, W. G., & Satya Kumara, I. N. (2024). Perancangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) pada atap gedung parkir Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai. *Jurnal SPEKTRUM*, 11(2), 11–20. <https://doi.org/10.24843/SPEKTRUM.2024.v11i02.p2>