



Asesmen Kinerja Sistem Pembangkit Solar Fotovoltaik Terintegrasi Jala Jala 3 Fasa

Arafi Adi Mussalam^{1*}, Tindyo Prasetyo²

¹⁻²Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Indonesia

*Penulis Korespondensi: arafiadim@gmail.com¹

Abstract. This study aims to analyze the performance of a three-phase grid-connected solar photovoltaic (PV) power system with a capacity of 8.72 kWp installed at MA Darul Ihsan Muhammadiyah, Sragen, Central Java, Indonesia. The system comprises 16 monocrystalline modules (545 Wp each, configured in 2 strings × 8 series) connected to a 10 kW Sungrow string inverter. Data were collected over one month (April) using a quantitative-experimental method, covering solar irradiance, module temperature, DC input power, AC output power, system efficiency, daily energy production, and load sharing between the PV system and the PLN utility grid. Results show a peak irradiance of 730 W/m², a maximum output power of 6,050 W, and a mean system efficiency of 94.32%. Total energy production in April reached 1,096.5 kWh (average 36.55 kWh/day), with a Performance Ratio (PR) of 83.22%, classified as good performance under IEC 61724. Load sharing analysis indicates that the PV system contributed 22.28% while the utility grid supplied 77.72% of the total building consumption of 4,920.5 kWh. This study confirms that grid-connected PV integration in educational facilities is technically viable and capable of reducing grid energy consumption by approximately one-fifth of total building energy demand.

Keywords: Grid-Connected PV System; Load Sharing; Performance Ratio; Solar Energy; Three-Phase Solar.

Abstrak. Penelitian bertujuan menganalisis kinerja sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *grid-connected* tiga fasa berkapasitas 8,72 kWp yang terpasang di MA Darul Ihsan Muhammadiyah, Sragen, Jawa Tengah. Sistem terdiri dari 16 modul monokristalin 545 Wp (konfigurasi 2 string × 8 seri) yang dihubungkan ke inverter Sungrow 10 kW. Pengambilan data dilakukan selama satu bulan (April) menggunakan metode kuantitatif-eksperimental dengan parameter iradiasi matahari, suhu modul, daya masukan DC, daya keluaran AC, efisiensi sistem, produksi energi harian, serta distribusi daya (load sharing) antara PLTS dan jaringan PLN. Hasil menunjukkan iradiasi puncak 730 W/m², daya keluaran maksimum 6.050 W, dan efisiensi sistem rata-rata 94,32%. Total produksi energi selama April mencapai 1.096,5 kWh (rata-rata 36,55 kWh/hari) dengan Performance Ratio (PR) sebesar 83,22%, termasuk kategori baik berdasarkan IEC 61724. Analisis load sharing menunjukkan kontribusi PLTS sebesar 22,28% dan jaringan PLN sebesar 77,72% dari total konsumsi gedung 4.920,5 kWh. Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi PLTS *grid-connected* pada fasilitas pendidikan secara teknis layak dan mampu menghemat konsumsi energi PLN hingga seperlima dari total kebutuhan gedung.

Kata kunci: Energi Surya; *Grid-Connected*; Load Sharing; Performance Ratio; PLTS Tiga Fasa.

1. LATAR BELAKANG

Kebutuhan energi listrik global yang terus meningkat mendorong pengembangan sumber energi terbarukan sebagai alternatif bahan bakar fosil. Teknologi solar fotovoltaik (PV) menjadi pilihan utama karena mampu menghasilkan listrik langsung dari radiasi matahari dengan emisi rendah (Saka, 2024). Sistem *grid-connected* PV memerlukan analisis kinerja menyeluruh yang mencakup parameter energi keluaran, efisiensi sistem, dan *Performance Ratio* (PR), sebagaimana ditetapkan dalam standar IEC 61724-1 (2021) sebagai acuan evaluasi kinerja sistem PV secara global (IEC-61724, 2021).

Beberapa penelitian telah mengevaluasi kinerja sistem PLTS on-grid menggunakan indikator PR dan efisiensi. Sistem 151 kWp di Cikarang mencatat PR rata-rata 82% (Rosyadi et al., 2024), sedangkan sistem 265,29 kWp menggunakan PR dan efisiensi daya sebagai

indikator optimalisasi kinerja (Arif et al., 2025). Evaluasi pada dua sistem PV di Korea Selatan menggunakan lima kriteria sekaligus, meliputi energi keluaran, system yield, PR, capacity factor, dan efisiensi sistem (Owolabi et al., 2022). Studi jangka panjang di iklim tropis juga menunjukkan penurunan efisiensi yang berkorelasi dengan suhu modul dan intensitas radiasi (Mohamad Radzi et al., 2025);(Sampe et al., 2025).

Di Indonesia, berbagai studi evaluasi PLTS on-grid telah dilakukan pada beragam skala dan lokasi. Evaluasi 600 kWp di Gili Trawangan menunjukkan pentingnya perbandingan output riil dan potensi teoritis untuk menilai degradasi sistem jangka panjang (Rifky Irawan et al., 2024). Sistem on-grid tiga fasa terbukti memiliki stabilitas distribusi daya yang lebih baik melalui mekanisme load sharing antara PV dan jaringan PLN (Jamahori et al., 2024a). Pada skala kecil, PLTS 1350 Wp di SMP N 3 Purwodadi menghasilkan PR 83% dengan efisiensi inverter 97% (Fajar et al., 2021), sementara sistem 120 kWp di Jawa Tengah membuktikan bahwa variasi iklim lokal memengaruhi fluktuasi energi keluaran sepanjang tahun (Umam et al., 2021). Studi pada fasilitas perbankan di Banjarnegara menegaskan bahwa optimasi perancangan sistem masih diperlukan agar kontribusi PV lebih optimal (Aji et al., 2022), dan analisis tekno-ekonomi PLTS on-grid pada gedung memanfaatkan parameter kinerja teknis sebagai dasar keputusan investasi (Yuan et al., 2026); (Fajar et al., 2021).

Selain kinerja energi, kualitas daya merupakan aspek krusial dalam integrasi sistem PV ke jaringan tiga fasa. Penetrasi PV skala besar terbukti menimbulkan distorsi harmonisa yang dapat melampaui batas standar IEEE-519, sehingga diperlukan teknik filtrasi pada titik *point of common coupling* (PCC) (Al-Sharif et al., 2022). Tingginya penetrasi PV dengan beban nonlinier juga meningkatkan nilai *total harmonic distortion* (THD) arus dan tegangan secara signifikan (Sharew et al., 2021), dan evaluasi skala utilitas besar menunjukkan keterkaitan erat antara kondisi sistem PV dan kestabilan jaringan listrik (Haji & Bonneya, 2021).

Berdasarkan kajian literatur tersebut, penilaian komprehensif terhadap kinerja sistem PV *grid-connected* tiga fasa mencakup energi keluaran, efisiensi, PR, dan kualitas daya menjadi sangat penting untuk memahami efektivitas dan stabilitas sistem (IEC-61724, 2021); (Owolabi et al., 2022). Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja sistem PV *grid-connected* tiga fasa berdasarkan parameter tersebut sekaligus mengevaluasi pengaruhnya terhadap kualitas daya jaringan listrik.

2. KAJIAN TEORITIS

Sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) fotovoltaik mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik searah (DC) melalui efek fotovoltaik pada sel semikonduktor silikon. Pada sistem *grid-connected*, arus DC dari array modul surya diubah menjadi arus bolak-balik (AC) oleh inverter string, lalu disinkronkan ke jaringan listrik umum. Kinerja sistem PV dipengaruhi oleh dua variabel lingkungan utama: intensitas iradiasi matahari (G , W/m^2) dan suhu operasi modul (T , $^{\circ}C$). Kenaikan iradiasi meningkatkan arus hubung singkat (ISC) secara proporsional, sedangkan kenaikan suhu modul menurunkan tegangan rangkaian terbuka (VOC) sesuai koefisien temperatur negatif modul, sehingga berdampak pada penurunan daya keluaran maksimum (PMPP). Inverter modern dengan algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) meminimalkan dampak variasi kondisi lingkungan ini dengan senantiasa mengoperasikan array pada titik daya maksimumnya (Sampe et al., 2025). Studi pada sistem PLTS atap di lembaga pendidikan juga menunjukkan bahwa pemilihan teknologi modul dan konfigurasi array yang tepat berpengaruh signifikan terhadap produktivitas energi tahunan (Haffaf et al., 2021); (Hetita et al., 2022).

Parameter evaluasi kinerja sistem PLTS *grid-connected* mengacu pada standar IEC 61724-1:2021 yang mencakup tiga indikator utama. Pertama, efisiensi sistem (η) merupakan rasio daya keluaran AC inverter (P_{out}) terhadap daya masukan DC array (P_{in}), yang mencerminkan kualitas konversi energi oleh inverter. Kedua, energy yield (kWh/kWp) menggambarkan produktivitas sistem per satuan kapasitas terpasang. Ketiga, *Performance Ratio* (PR) merupakan rasio antara energi aktual yang dihasilkan sistem terhadap energi teoritis berdasarkan iradiasi lokal dan luas permukaan array, sehingga merefleksikan efektivitas pemanfaatan potensi surya yang tersedia. Standar IEC 61724 mengklasifikasikan sistem dengan $PR > 75\%$ sebagai berkinerja dapat diterima, sementara $PR > 80\%$ dikategorikan sebagai kinerja baik (IEC-61724, 2021). Dalam sistem paralel *grid-connected*, mekanisme *load sharing* mengatur distribusi suplai daya antara sistem PV dan jaringan PLN terhadap total beban gedung, di mana PV beroperasi sebagai sumber primer dan PLN sebagai sumber pelengkap (Jamahori et al., 2024b).

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengevaluasi kinerja sistem PLTS *grid-connected* pada berbagai skala dan lokasi sebagai landasan komparatif penelitian ini. Di Korea Selatan, Owolabi et al. (2022) mengevaluasi dua sistem PV menggunakan lima indikator sekaligus dan menyimpulkan modul monokristalin memiliki performa tahunan lebih unggul. Di iklim tropis, Mohamad Radzi et al. (2025) membuktikan bahwa pengaruh suhu modul terhadap degradasi kinerja lebih signifikan dibanding iklim sedang, sementara Sampe et al. (2025) menunjukkan

keunggulan sistem berbasis MPPT dalam mempertahankan kinerja optimal. Khusus pada lembaga pendidikan, Jayachandran et al. (2023) melakukan evaluasi komparatif tiga sistem PLTS 52 kW di institusi pendidikan India dan menemukan bahwa prediksi energi berbasis regresi linier cukup akurat untuk memperkirakan kinerja sistem aktual, sementara Nusantara merancang sistem PLTS untuk Fakultas Teknik Universitas Mulawarman dan menunjukkan kelayakan teknis penerapan PLTS di gedung kampus Indonesia (Nusantara et al., 2023). Di Indonesia, Fajar et al. (2021) melaporkan PR sebesar 83% dengan efisiensi inverter 97% pada PLTS 1.350 Wp di fasilitas pendidikan, dan Umam et al. (2021) menunjukkan variasi iklim lokal Jawa Tengah memengaruhi fluktuasi produksi energi sistem 120 kWp. Pada skala yang lebih besar, Rosyadi et al. (2024) mencatat PR rata-rata 82% pada sistem 151 kWp industri di Cikarang. Sementara itu, Aji et al. (2022) menegaskan bahwa optimasi desain sistem masih dibutuhkan agar kontribusi PV terhadap beban dapat dimaksimalkan. Berdasarkan kajian tersebut, penelitian pada sistem PLTS skala kecil (di bawah 10 kWp) yang terintegrasi pada fasilitas pendidikan dengan analisis komprehensif mencakup efisiensi, PR, dan load sharing masih terbatas, sehingga penelitian ini mengisi celah tersebut.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan eksperimental untuk menganalisis kinerja sistem pembangkit *solar photovoltaic* (PV) terintegrasi jala-jala tiga fasa. Pengambilan data dilakukan secara langsung pada sistem PV *grid-connected* tiga fasa yang terpasang di MA Darul Ihsan Muhammadiyah, Sragen, Jawa Tengah, selama kurang lebih 1 Bulan untuk menangkap variabilitas kinerja sistem pada kondisi operasi nyata. Parameter teknis yang diukur meliputi energi keluaran, efisiensi sistem, *performance ratio* (PR), serta kontribusi daya sistem PV terhadap jaringan listrik. Sistem PV yang diteliti memiliki kapasitas terpasang sebesar 8,72 kWp, terdiri dari 16 modul surya jenis monokristalin dengan daya puncak masing-masing 545 Wp. Setiap modul memiliki efisiensi sel 20,9% dengan konfigurasi 144 sel (6×24), tegangan rangkaian terbuka (VOC) sebesar 49,60 V, arus hubung singkat (ISC) sebesar 13,86 A, tegangan pada titik daya maksimum (VMPP) sebesar 41,64 V, dan arus pada titik daya maksimum (IMPP) sebesar 12,97 A. Ke-16 modul tersebut disusun dalam konfigurasi dua string paralel, di mana masing-masing string terdiri dari 8 modul yang dihubungkan secara seri. Luas Permukaan keseluruhan 41.45 mm². Konfigurasi ini menghasilkan tegangan *open-circuit* per string sebesar 396,8 V dan total arus hubung singkat sebesar 27,72 A, dengan rasio kapasitas array terhadap inverter (*array-to-inverter ratio*) sebesar 87,2%, yang berada dalam rentang desain yang direkomendasikan. Konversi daya DC

dari array PV ke AC tiga fasa dilakukan oleh inverter string Sungrow berkapasitas 10 kW. Inverter ini memiliki tegangan masukan DC maksimum sebesar 1100 VDC, rentang tegangan MPP antara 160–1000 VDC, dan arus masukan maksimum 25 A/12,5 A dengan arus hubung singkat 32 A/16 A. Pada sisi keluaran AC, inverter menghasilkan tegangan tiga fasa 230/400 V (fasa-netral/fasa-fasa) pada frekuensi 50 Hz, dengan daya keluaran terukur 9999 W (10 kW), kapasitas semu maksimum 11 kVA, dan rentang faktor daya 0,8 leading hingga 0,8 lagging. Spesifikasi ini memungkinkan inverter untuk tersinkronisasi langsung dengan jaringan PLN tiga fasa.

Skema *load sharing* yang diterapkan pada sistem ini menggunakan topologi paralel *grid-connected*, di mana sistem PV dan jaringan PLN menyuplai daya secara bersamaan kepada beban gedung melalui panel distribusi utama (MDP) berkapasitas 23 kVA. Keluaran AC tiga fasa inverter (3 fasa, 380 V) disalurkan langsung ke MDP, yang juga menerima pasokan dari jaringan PLN melalui trafo *step-down* tiga fasa 20 kV/380 V. Dalam skema ini, sistem PV beroperasi sebagai sumber energi primer selama iradiasi matahari mencukupi, sementara jaringan PLN berfungsi sebagai sumber pelengkap untuk menutup selisih antara pembangkitan PV dan kebutuhan beban. Apabila keluaran PV melampaui kebutuhan beban sesaat, kelebihan daya akan diekspor ke jaringan. Variabel *load sharing* dinyatakan dalam daya aktif (kW) dan persentase kontribusi daya PV terhadap total beban, guna mengevaluasi pengaruh integrasi sistem PV terhadap jaringan listrik tiga fasa. Variabel penelitian dikelompokkan menjadi tiga kategori. Variabel input mencakup intensitas iradiasi matahari (W/m^2), temperatur modul ($^{\circ}\text{C}$), serta daya masukan (W) yang digunakan untuk mengetahui kondisi operasi sistem saat pengambilan data. Variabel output mencakup daya keluaran (W), dan energi listrik yang dihasilkan (kWh), yang digunakan untuk menilai performa aktual sistem setelah konversi melalui inverter. Variabel *load sharing* mencakup besaran produksi PLTS (kWh) dan persentase kontribusi PV terhadap total beban, yang digunakan untuk mengevaluasi peran sistem PV dalam mengurangi ketergantungan terhadap jaringan PLN. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis secara matematis untuk menghitung indikator kinerja sistem, meliputi *energy yield*, efisiensi sistem, dan *performance ratio*, serta dievaluasi kesesuaiannya terhadap standar yang berlaku untuk sistem PV *grid-connected*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan data dilakukan selama satu hari penuh yang mewakili kondisi operasi sistem PLTS grid-connected tiga fasa, dimulai pukul 07.00 hingga 17.00 WIB dengan interval pengukuran setiap 30 menit. Parameter yang diukur meliputi intensitas iradiasi matahari (W/m^2), suhu modul ($^{\circ}\text{C}$), daya masukan DC dari array PV (Pin), daya keluaran AC dari inverter (Pout), dan efisiensi sistem (η). Seluruh data hasil pengukuran tersaji pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Pengukuran Harian Sistem PLTS.

Jam	Iradiasi (W/m^2)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
07.00	88	27	1.236	1.136	91,9
07.30	145	30	1.691	1.571	92,9
08.00	210	34	2.096	2.967	93,8
08.30	315	37	2.914	2.743	94,1
09.00	410	42	3.503	3.324	94,8
09.30	520	45	4.078	3.903	95,7
10.00	684	46	5.420	5.201	95,9
10.30	696	47	6.020	5.756	95,6
11.00	707	48	5.890	5.663	96,1
11.30	719	48	6.100	5.831	95,5
12.00	728	49	6.320	6.050	95,7
12.30	730	49	6.080	5.819	95,7
13.00	717	49	6.220	5.961	95,8
13.30	487	47	4.810	4.602	95,6
14.00	609	46	5.690	5.233	91,9
14.30	511	34	5.030	4.850	96,4
15.00	360	34	4.473	4.250	95,0
15.30	290	32	3.606	3.364	93,2
16.00	220	30	2.839	2.640	92,9
16.30	165	27	2.009	1.840	91,5
17.00	41	25	263	239	90,8

Berdasarkan data pada Tabel 1, iradiasi matahari menunjukkan tren peningkatan dari pagi hingga siang dan kemudian menurun menjelang sore. Nilai iradiasi tertinggi tercatat pada pukul 12.30 sebesar 730 W/m^2 , sedangkan nilai terendah terjadi pada pukul 17.00 sebesar 15 W/m^2 seiring berkurangnya intensitas cahaya matahari. Rata-rata iradiasi sepanjang periode pengukuran adalah $399,5 \text{ W/m}^2$. Pola ini konsisten dengan karakteristik iradiasi harian di wilayah tropis, di mana iradiasi puncak umumnya dicapai pada rentang waktu tengah hari. Suhu modul berkorelasi positif dengan intensitas iradiasi, dengan suhu tertinggi mencapai 49°C pada pukul 12.00–12.30, dan suhu terendah sebesar 25°C pada pukul 17.00. Rata-rata suhu modul selama pengukuran adalah $38,2^{\circ}\text{C}$. Peningkatan suhu ini berdampak pada penurunan tegangan modul, namun pada sistem yang dikaji, pengaruhnya terhadap efisiensi inverter relatif

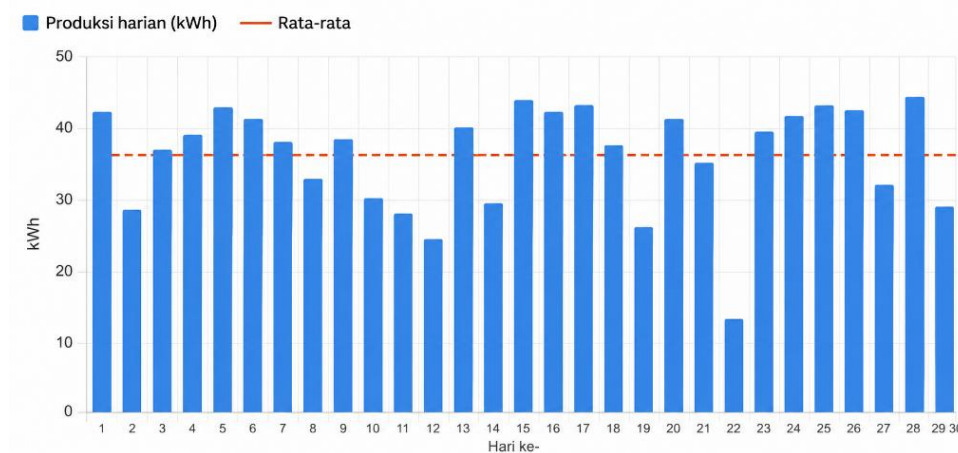
kecil karena inverter Sungrow memiliki rentang tegangan MPP yang lebar (160–1000 VDC). Daya masukan DC tertinggi (Pin) tercatat sebesar 6.320 W pada pukul 12.00, seiring dengan iradiasi yang mendekati nilai puncaknya. Daya keluaran AC tertinggi (Pout) sebesar 6.050 W juga terjadi pada waktu yang sama. Efisiensi sistem (η), yang merupakan rasio antara Pout dan Pin, berkisar antara 90,8% hingga 96,4%, dengan nilai rata-rata 94,32%. Efisiensi tertinggi sebesar 96,4% dicapai pada pukul 14.30, sedangkan efisiensi terendah 90,8% terjadi pada pukul 17.00 ketika iradiasi sangat rendah dan inverter beroperasi jauh di bawah kapasitas nominalnya. Hal ini sejalan dengan karakteristik inverter yang umumnya memiliki efisiensi lebih tinggi pada kondisi beban mendekati nominal.

Produksi energi listrik sistem PLTS dipantau selama 30 hari pada bulan April. Data produksi harian serta load sharing disajikan dalam dan parameter perhitungan *Performance Ratio* (PR) disajikan pada Tabel 4.

Tabel 2. Data Harian dan Load Sharing PLTS-Grid PLN bulan April.

Hari	Produksi PLTS (kWh)	Grid PLN (kWh)	Beban (kWh)	Kontribusi PLTS (%)	Kontribusi PLN (%)
1	42,5	112	154,5	27,50	72,50
2	28,5	128	156,5	18,21	81,79
3	37,3	120	157,3	23,71	76,29
4	39,4	136	175,4	22,46	77,54
5	43,1	88	131,1	32,88	67,12
6	41,3	152	193,3	21,37	78,63
7	38,3	168	206,3	18,56	81,44
8	32,8	128	160,8	20,40	79,60
9	38,6	168	206,6	18,68	81,32
10	30,5	160	190,5	16,01	83,99
11	28,3	112	140,3	20,17	79,83
12	24,7	144	168,7	14,64	85,36
13	40,4	128	168,4	24,00	76,00
14	29,8	144	173,8	17,15	82,85
15	44,1	104	148,1	29,78	70,22
16	42,8	128	170,8	25,06	74,94
17	43,5	128	171,5	25,37	74,63
18	37,9	104	141,9	26,71	73,29
19	26,3	144	170,3	15,44	84,56
20	41,4	152	193,4	21,41	78,59
21	36,2	152	188,2	19,24	80,76
22	13,9	80	93,9	14,80	85,20
23	39,7	136	175,7	22,60	77,40
24	42	136	178	23,60	76,40
25	43,7	88	131,7	33,18	66,82
26	43,1	72	115,1	37,45	62,55
27	32,2	128	160,2	20,10	79,90
28	39,2	112	151,2	25,93	74,07
29	45,4	112	157,4	28,84	71,16

30	29,6	160	189,6	15,61	84,39
Total	1.096,5	3.824	4.920,5	22,28	77,72



Gambar 1. Grafik Produksi Harian PLTS bulan April.

Total produksi energi sistem PLTS selama bulan April adalah 1.096,5 kWh, dengan rata-rata produksi harian sebesar 36,55 kWh/hari. Produksi tertinggi terjadi pada hari ke-29 sebesar 45,4 kWh, bertepatan dengan kondisi cuaca cerah dan iradiasi tinggi, sedangkan produksi terendah tercatat pada hari ke-22 sebesar 13,9 kWh yang diduga akibat kondisi berawan atau hujan sepanjang hari yang menyebabkan iradiasi matahari sangat terbatas. *Performance Ratio* (PR) merupakan indikator kinerja sistem PLTS yang menggambarkan seberapa efektif sistem menghasilkan energi aktual dibandingkan energi teoritis yang dapat dibangkitkan berdasarkan kondisi iradiasi setempat. PR dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$PR = \frac{E_{\text{aktual}}}{GHI_{\text{bulan}} \times A_{\text{modul}} \times \eta_{\text{modul}}} \quad (1)$$

di mana E_{aktual} adalah total energi yang dihasilkan sistem (kWh), GHI_{bulan} adalah total iradiasi horizontal global selama satu bulan (kWh/m^2), A_{modul} adalah total luas permukaan array PV (m^2), dan η_{modul} adalah efisiensi modul pada STC. Dengan nilai GHI di Sragen harian rata-rata 5,07 $\text{kWh/m}^2/\text{hari}$, total GHI bulanan sebesar 152,1 kWh/m^2 , luas permukaan array 41,45 m^2 , dan efisiensi modul 20,9%, maka energi teoritis yang seharusnya dapat dibangkitkan adalah:

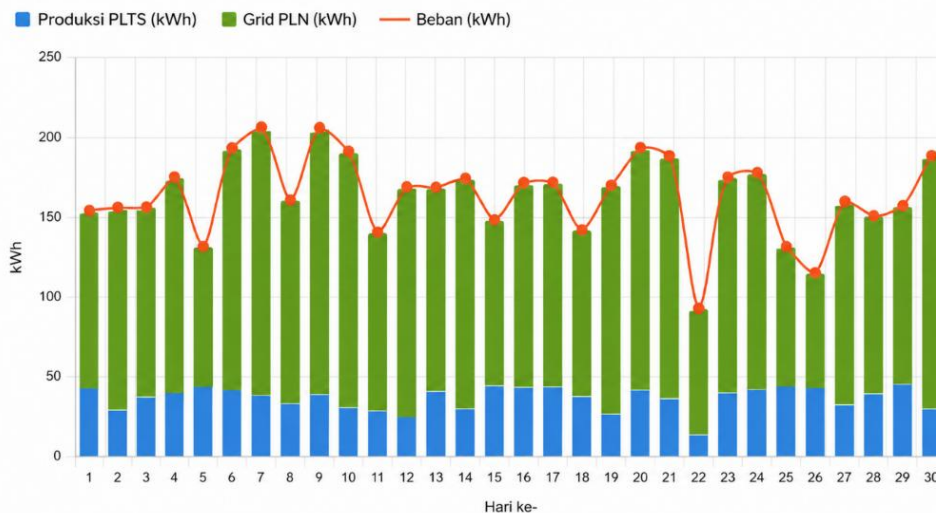
$$E_{\text{teoritis}} = 152,1 \times 41,45 \times 0,209 = 1.317,65 \text{ kWh} \quad (2)$$

$$PR = \frac{1.096,5}{1.317,65} = 0,832 = 83,22\% \quad (3)$$

Nilai *Performance Ratio* sistem sebesar 83,22% menunjukkan bahwa sistem PLTS beroperasi dalam kategori baik. Standar IEC 61724 mengklasifikasikan $PR > 75\%$ sebagai kinerja yang dapat diterima, sedangkan sistem dengan PR di atas 80% dikategorikan sebagai

sistem berkinerja baik. Nilai PR 83,22% ini mengindikasikan bahwa sistem mampu memanfaatkan sekitar 83% dari potensi energi teoritis yang tersedia, dengan sisanya sekitar 16,78% merupakan rugi-rugi sistem yang meliputi rugi-rugi termal akibat peningkatan suhu modul, rugi-rugi kabel DC/AC, rugi-rugi konversi inverter, dan faktor pembayangan parsial.

Distribusi penyediaan daya (*load sharing*) antara sistem PLTS dan jaringan PLN terhadap total beban gedung selama bulan April disajikan pada Tabel 2. Kolom kontribusi PLTS dan PLN dinyatakan dalam persentase terhadap total beban harian.



Gambar 2. Grafik Load Sharing.

Selama bulan April, total energi yang dikonsumsi oleh beban gedung adalah 4.920,5 kWh. Dari jumlah tersebut, sistem PLTS menyumbang 1.096,5 kWh (22,28%) dan jaringan PLN menyuplai 3.824 kWh (77,72%). Hal ini menunjukkan bahwa sistem PLTS secara konsisten berperan sebagai sumber energi primer yang mengurangi ketergantungan terhadap pasokan PLN, meskipun grid PLN tetap mendominasi penyediaan energi karena kapasitas sistem PLTS (8,72 kWp) relatif lebih kecil dibandingkan total konsumsi beban gedung.

Kontribusi PLTS harian bervariasi antara 14,64% (hari ke-12) hingga 37,45% (hari ke-26). Variasi ini dipengaruhi oleh dua faktor utama: fluktuasi iradiasi matahari yang berdampak langsung pada besar produksi PLTS, dan fluktuasi konsumsi beban gedung yang dipengaruhi oleh jadwal aktivitas sekolah. Pada hari ke-26, kontribusi PLTS mencapai nilai tertinggi karena produksi PLTS yang relatif tinggi (43,1 kWh) bertemu dengan konsumsi beban yang lebih rendah (115,1 kWh), kemungkinan karena hari tersebut adalah hari libur atau aktivitas sekolah berkurang. Sebaliknya, kontribusi terendah pada hari ke-12 terjadi karena produksi PLTS yang rendah (24,7 kWh) di tengah konsumsi beban yang tinggi (168,7 kWh). Rata-rata kontribusi PLTS harian sebesar 22,28% menunjukkan bahwa pemasangan sistem PLTS grid-connected 8,72 kWp di gedung MA Darul Ihsan Muhammadiyah mampu menghemat konsumsi energi

listrik dari PLN sekitar seperlima dari total kebutuhan energi gedung. Dengan asumsi tarif listrik PLN sebesar Rp 1.444,70/kWh (golongan tarif B-2/TR), penghematan energi sebesar 1.096,5 kWh selama satu bulan setara dengan penghematan biaya listrik sekitar Rp 1.584.790,–. Temuan ini menegaskan bahwa integrasi PLTS *grid-connected* pada fasilitas pendidikan merupakan investasi yang secara teknis dan ekonomis layak untuk diterapkan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil menganalisis kinerja sistem PLTS *grid-connected* tiga fasa berkapasitas 8,72 kWp di MA Darul Ihsan Muhammadiyah, Sragen, melalui pengukuran langsung selama bulan April. Sistem terbukti beroperasi mengikuti pola iradiasi matahari secara konsisten, dengan iradiasi puncak 730 W/m² dan suhu modul maksimum 49°C menghasilkan daya keluaran AC tertinggi 6.050 W. Efisiensi sistem rata-rata mencapai 94,32% (rentang 90,8–96,4%), yang mencerminkan kinerja konversi inverter Sungrow 10 kW yang baik di seluruh rentang beban operasinya, meskipun efisiensi cenderung menurun ketika iradiasi sangat rendah dan inverter beroperasi jauh di bawah kapasitas nominalnya.

Total produksi energi selama bulan April mencapai 1.096,5 kWh dengan rata-rata 36,55 kWh/hari. *Performance Ratio* (PR) sistem sebesar 83,22% mengkonfirmasi bahwa sistem termasuk kategori kinerja baik berdasarkan IEC 61724 (PR > 80%), dengan sekitar 16,78% energi teoritis hilang akibat rugi-rugi termal, kabel, dan konversi inverter. Analisis load sharing menunjukkan kontribusi PLTS sebesar 22,28% (1.096,5 kWh) dari total kebutuhan energi gedung 4.920,5 kWh, dengan kontribusi harian bervariasi antara 14,64% hingga 37,45% bergantung pada kondisi iradiasi dan pola konsumsi beban. Penghematan biaya listrik yang dihasilkan mencapai sekitar Rp 1.584.790,– per bulan, membuktikan bahwa integrasi PLTS *grid-connected* pada fasilitas pendidikan secara teknis layak dan memberikan manfaat ekonomi yang nyata.

Berdasarkan temuan penelitian ini, disarankan agar pengelola MA Darul Ihsan Muhammadiyah mempertimbangkan penambahan kapasitas PLTS guna meningkatkan kontribusi energi surya terhadap total kebutuhan gedung yang saat ini masih didominasi jaringan PLN (77,72%). Kajian tekno-ekonomi lanjutan dengan mempertimbangkan regulasi tarif PLN dan skenario pembiayaan perlu dilakukan sebagai dasar keputusan investasi, sebagaimana diterapkan pada studi serupa di fasilitas publik Indonesia (Suparwoko & Qamar, 2022). Bagi instansi pendidikan lain yang berencana mengimplementasikan sistem PLTS *grid-connected*, hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan teknis awal, khususnya di wilayah dengan potensi iradiasi matahari serupa. Pemerintah dan pemangku kebijakan juga disarankan untuk

mendorong program subsidi atau insentif instalasi PLTS pada fasilitas pendidikan sebagai langkah konkret pengurangan emisi karbon di sektor publik.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, pengukuran harian hanya dilakukan selama satu bulan (April), sehingga belum menangkap variasi musiman iradiasi matahari sepanjang tahun yang dapat memengaruhi nilai PR dan produksi energi secara keseluruhan. Kedua, analisis kualitas daya seperti distorsi harmonisa (THD) dan profil tegangan pada titik *point of common coupling* (PCC) belum dikaji secara mendalam. Ketiga, analisis degradasi modul jangka panjang belum dilakukan karena keterbatasan periode pengamatan. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar dilakukan pemantauan minimal satu tahun penuh untuk mendapatkan data kinerja yang lebih representatif, pengukuran THD dan profil tegangan pada jaringan tiga fasa, serta kajian analisis tekno-ekonomi yang lebih komprehensif mencakup perhitungan payback period dan net present value untuk mendukung keputusan investasi PLTS di sektor pendidikan secara lebih menyeluruh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan kemudahan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Penelitian ini merupakan bagian dari upaya penulis dalam memberikan kontribusi nyata di bidang energi terbarukan. Penghargaan yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada kedua orang tua tercinta, serta kakak atas segala doa, dukungan moral, dan pengorbanan yang tiada henti selama penulis menempuh pendidikan. Kasih sayang dan kepercayaan yang diberikan menjadi sumber kekuatan terbesar bagi penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Dosen Pembimbing, atas bimbingan, arahan, masukan, dan kesabaran yang diberikan selama proses penelitian dan penulisan naskah publikasi ini. Dedikasi Bapak dalam membimbing penulis sangat berarti dan menjadi landasan kokoh bagi kualitas penelitian ini.

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada pihak MA Darul Ihsan Muhammadiyah, Sragen, yang telah memberikan izin dan kemudahan akses selama proses pengambilan data berlangsung. Ketersediaan fasilitas dan dukungan dari seluruh civitas madrasah sangat membantu kelancaran penelitian ini. Tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh rekan-rekan mahasiswa, serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan, semangat, dan dukungan selama proses penelitian ini berlangsung. Semoga seluruh kebaikan yang telah diberikan mendapat balasan yang setimpal.

DAFTAR REFERENSI

- Aji, E. P., Wibowo, P., & Windarta, J. (2022). Kinerja pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dengan sistem *on-grid* di BPR BKK Mandiraja Cabang Wanayasa Kabupaten Banjarnegara. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 3(1), 15–27. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13158>
- Al-Sharif, Y. M., Sowilam, G. M., & Kawady, T. A. (2022). Harmonic analysis of large grid-connected PV systems in distribution networks: A Saudi case study. *International Journal of Photoenergy*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8821192>
- Arif, D. J. A., Al Ghozy, N., Zulfatman, Z., & Humaidi, H. N. A. (2025). Analisa efisiensi dan optimalisasi kinerja pada sistem PLTS *on-grid* Gudang Sidoarjo 265,29 kWp. *Equivalent: Jurnal Ilmiah Sosial Teknik*, 7(2), 111–130. <https://doi.org/10.59261/jequi.v7i2.226>
- Fajar, I., Diansyah, N., Handoko, S., & Windarta, J. (n.d.). Implementasi dan evaluasi performa pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *on-grid*: Studi kasus SMP N 3 Purwodadi. *Transient*, 10(4). Retrieved from <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>
- Haffaf, A., Lakdja, F., Ould Abdeslam, D., & Meziane, R. (2021). Monitoring, measured and simulated performance analysis of a 2.4 kWp grid-connected PV system installed on the Mulhouse campus, France. *Energy for Sustainable Development*, 62, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.03.006>
- Haji, A., & Bonneya, M. F. (2021). Assessment of power quality for large-scale utility grid-connected solar power plant integrated system. *Journal of Techniques*, 3(3). <http://journal.mtu.edu.iq>
- Hetita, I., Zalhaf, A. S., Mansour, D. E. A., Han, Y., Yang, P., & Wang, C. (2022). Modeling and protection of photovoltaic systems during lightning strikes: A review. *Renewable Energy*, 184, 134–148. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.083>
- International Electrotechnical Commission. (2021). *Photovoltaic system performance—Part 1: Monitoring* (IEC Standard). <https://www.iec.ch>
- Jamahori, H. F., Abdullah, M. P., Ali, A., & AlKassem, A. (2024). Optimal design and performance analysis of multiple photovoltaic with grid-connected commercial load. *International Journal of Technology*, 15(4), 834–846. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v15i4.6019>
- Mohamad Radzi, P. N. L., Mekhilef, S., Mohamed Shah, N., Akhter, M. N., Hassani, S., Albaker, A., & Wahyudie, A. (2025). Performance evaluation and degradation analysis of grid-connected photovoltaic systems for energy-efficient buildings in tropical climates. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26765-9>
- Nusantara, I., Alham, N. R., Nugroho, H., Muslimin, & Utomo, R. M. (2023). Design for application of solar power plant in the Faculty of Engineering Mulawarman University. In *Proceedings* (pp. 64–79). https://doi.org/10.2991/978-94-6463-180-7_10
- Owolabi, A. B., Yakub, A. O., Li, H. X., & Suh, D. (2022). Performance evaluation of two grid-connected solar photovoltaic systems under temperate climatic conditions in South Korea. *Energy Reports*, 8, 12227–12236. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.053>

- Rifky Irawan, Wijaya, F. D., & Cahyadi, A. I. (2024). Evaluasi kinerja PLTS *on-grid* 600 kWp pada jaringan distribusi Gili Trawangan. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 13(2), 116–123. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v13i2.6495>
- Rosyadi, A. Y., Hartopo, I., Edypoerwa, M. L., & Padmadewi, A. L. (2024). Analisis efisiensi sistem pembangkit listrik tenaga surya *on-grid* 151 kWp untuk industri di Cikarang. *Jurnal Teknologi Rekayasa*, 9(2). <https://doi.org/10.31544/jtera.v9.i1.2024.175-182>
- Saka, K. (2024). Evaluation of a grid-connected PV power plant: Performance and agrivoltaic aspects. *Environment, Development and Sustainability*, 26(12), 32319–32336. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05098-z>
- Sampe, R., Kusdiah, Y., Sriwati, M., & Dharma Yadi Makassar, S. (2025). Analisis kinerja sistem panel surya berbasis maximum power point tracking (MPPT) dalam kondisi cuaca tropis. *Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Riset Pendidikan*, 4(2), 8276–8282. <https://doi.org/10.31004/jerkin.v4i2.3165>
- Sharew, E. A., Kefale, H. A., & Werkie, Y. G. (2021). Power quality and performance analysis of grid-connected solar PV system based on recent grid integration requirements. *International Journal of Photoenergy*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/4281768>
- Suparwoko, & Qamar, F. A. (2022). Techno-economic analysis of rooftop solar power plant implementation and policy on mosques: An Indonesian case study. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08968-6>
- Umam, M. F., Saputro, F. P., Asyari, M. R. Al, Selia, S., Sunaryo, A. F., & Yuliatin, U. (2021). Performance analysis of 120 kWp grid-connected rooftop solar photovoltaic system in Central Java. *Jurnal Nasional Pengelolaan Energi MigasZoom*, 3(2). <https://doi.org/10.37525/mz/2021-2/298>
- Yuan, A., Setyowati, E., Larosa, R., & Pengembangan Energi Terbarukan, L. (2026). Analisis kelayakan tekno-ekonomi penerapan sistem photovoltaic *on-grid* di Gedung FISKOM, Universitas Kristen Immanuel. *Journal of Mechanical and Electrical Technology*, 5(1).