

IMPLEMENTASI DAN EVALUASI PERFORMA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ON GRID STUDI KASUS SMP N 3 PURWODADI

Imam Fajar Nur Diansyah^{*)}, Susatyo Handoko dan Jaka Windarta

Program Studi Sarjana Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: imamfajarnd.14@gmail.com

Abstrak

Indonesia memiliki potensi energi surya yang tinggi yaitu sebesar 207 GWp. Upaya yang dapat dijalankan untuk memaksimalkan potensi energi surya secara efisien adalah menerapkan pembangkit listrik tenaga surya di lokasi yang memiliki potensi energi surya yang tinggi. Daerah Purwodadi di Provinsi Jawa Tengah memiliki potensi energi surya yang tinggi sebesar 1,92 MWh/m² per tahun. Tugas akhir ini dilaksanakan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menganalisis kinerja PLTS sistem on grid dengan kapasitas 1350 Wp di SMP N 3 Purwodadi. Tugas akhir ini dimulai dengan perancangan dan pengimplementasian kemudian dilakukan pengujian komponen sistem PLTS selanjutnya dilakukan analisis produksi listrik oleh PLTS. Pengujian komponen dilakukan untuk mengetahui nilai daya input dan daya output sehingga efisiensi dapat ditentukan. Berdasarkan hasil pengujian, didapatkan hasil bahwa larik panel surya memiliki efisiensi sebesar 15,3% dimana nilai efisiensi panel surya masih lebih rendah dari nilai pada datasheet yang disebabkan karena suhu panel surya yang lebih tinggi dari suhu standar STC, sedangkan inverter memiliki efisiensi sebesar 97% yang mana sesuai dengan datasheet. Berdasarkan hasil monitoring selama dua bulan, PLTS mampu membangkitkan listrik hingga 361 kWh dengan rata-rata harian sebesar 5,92 kWh. Kemudian sistem PLTS memiliki nilai performance ratio 83% yang menandakan bahwa PLTS beroperasi dengan cukup baik dalam membangkitkan listrik.

Kata kunci: PLTS, On grid, Pengujian, Performance ratio

Abstract

Indonesia has high potential for solar energy, which is 207 GWp. Efforts that can be carried out to maximize the potential of solar energy efficiently is implement solar power plant in locations that have high solar energy potential. Purwodadi in Central Java Province has high solar energy potential of 1.92 MWh/m² per year. This final project is carried out to implement and analyse the performance of solar pv system on grid with a capacity of 1350 Wp at Junior High School 3 Purwodadi. This final project begins by designing and implementation, then testing the components of the solar pv system, then analysing the electricity production by solar pv system. The test was carried out for one day with real field weather conditions. Based on the test results, it was found that the solar panel array has an efficiency of 15.3% where the efficiency value of the solar panel is still lower than the value in the datasheet due to the temperature of solar panel is higher than the standard STC temperature, while the inverter has an efficiency of 97% which is which is similar with the datasheet. The results of monitoring for two months the solar pv system is able to generate electricity up to 361 kWh with a daily average of 5,92 kWh. Then the value of the solar pv system performance ratio is 83% which indicates that the power plant is operating quite well in generating electricity.

Keywords: Solar power plant, On grid, Testing, Performance ratio

1. Pendahuluan

Energi merupakan salah satu kebutuhan utama dalam kehidupan manusia. Peningkatan kebutuhan energi merupakan indikator meningkatnya kemakmuran, tetapi pada saat yang sama juga menimbulkan masalah dalam upaya penyediaannya. Indonesia memiliki wilayah beriklim tropis dengan hanya dua musim, kemarau dan hujan. Matahari bersinar sepanjang tahun, meskipun intensitasnya berkurang saat musim hujan. Kondisi iklim yang demikian menjadikan energi matahari atau energi

surya sebagai sumber energi alternatif bagi Indonesia di masa depan [1].

Kondisi bumi semakin lama semakin memburuk akibat tercemarnya lingkungan dari efek gas rumah kaca yang mengakibatkan terjadinya pemanasan global, hujan asam, rusaknya lapisan ozon hingga hilangnya hutan tropis. Semua jenis polusi itu salah satunya diakibatkan oleh penggunaan bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, gas dan lainnya secara terus menerus. Dengan kondisi bumi yang sudah sedemikian memprihatinkan, gerakan

hemat energi sudah merupakan kewajiban di seluruh dunia [2]. Salah satunya dengan mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dan menggunakan sumber energi terbarukan seperti energi angin, energi air, energi panas bumi, energi surya, dan lainnya. Tren penggunaan energi di dunia sudah berubah, mulai beralih dari energi fosil ke energi terbarukan terutama tenaga surya yang sangat melimpah [3]. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) diperkirakan akan lebih diminati sebab penggunaannya yang lebih fleksibel. PLTS dapat diaplikasikan untuk keperluan apa saja dan di mana saja seperti pada gedung, pabrik, perumahan, hingga di lokasi perairan seperti waduk. Selain persediaannya yang melimpah, energi matahari nyaris tidak menimbulkan dampak buruk terhadap lingkungan dibandingkan sumber energi yang lainnya [4].

Indonesia memiliki total potensi energi terbarukan hingga 442 GW yang terdiri dari 25,4 GW energi panas bumi, 32,6 GW bioenergi, 75 GW energi air, 19,3 GW energi mikrohidro, 60,6 GW energi angin, 17,9 GW energi arus laut, dan 207,8 GWp energi surya [5]. Potensi sumber energi baru terbarukan terbesar adalah energi surya yaitu 207,8 GWp, namun pemanfaatannya baru sebesar 0,15 GWp atau sekitar 0,07%. Dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), melalui Perpres No.79 tahun 2014, Pemerintah Indonesia menargetkan peningkatan penggunaan energi terbarukan dalam bauran energi nasional hingga 23% pada tahun 2025. Untuk mendukung kebijakan tersebut, khususnya pemanfaatan energi surya, pemerintah juga membuat aturan teknis sebagai landasan pelaksanaannya, salah satunya yaitu Permen ESDM No.49 tahun 2018 yang diperbarui melalui Permen ESDM No. 26 tahun 2021, tentang penggunaan PLTS oleh konsumen Perusahaan Listrik Negara (PLN). Aturan ini bertujuan untuk membuka peluang bagi konsumen PLN baik dari sektor rumah tangga, bisnis, pemerintah, sosial maupun industri untuk ikut berkontribusi dalam upaya peningkatan penggunaan energi terbarukan, khususnya energi surya [6].

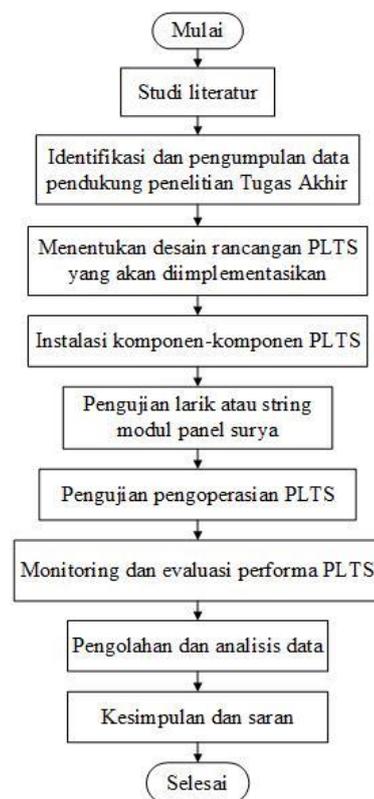
Indonesia memiliki wilayah dengan potensi energi surya yang berbeda-beda. Upaya yang dapat dijalankan untuk memaksimalkan potensi energi surya secara efisien adalah menerapkan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) di lokasi yang memiliki potensi energi matahari yang tinggi. Daerah Purwodadi di Provinsi Jawa Tengah memiliki potensi energi surya yang cukup tinggi sebesar 1,92 MWh/m² per tahun [7]. Selain itu di Purwodadi juga belum ada pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Oleh karena itu mengimplementasikan PLTS di area publik diharapkan dapat meningkatkan penggunaan energi terbarukan dan menambah wawasan warga tentang energi terbarukan khususnya energi surya. Kebetulan salah satu area di Purwodadi yakni SMP N 3 Purwodadi juga sedang berlangsung pekerjaan pembangunan PLTS. Berangkat dari kondisi tersebut, penulis merencanakan implementasi dan evaluasi kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sistem *on grid* sebagai sumber energi listrik terbarukan yang dapat mengurangi penggunaan energi fosil dan meningkatkan penggunaan energi ramah lingkungan yang akan diimplementasikan di taman sekolah SMP N 3 Purwodadi. Dengan pengimplementasian PLTS

ini diharapkan dapat mendukung kebijakan pemerintah dalam memanfaatkan energi yang ramah lingkungan dan peduli terhadap isu pemanasan global.

2. Metode

2.1. Perencanaan

Diagram alir dari Tugas Akhir berjudul “Implementasi dan Evaluasi Performa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) on grid Studi Kasus SMP N 3 Purwodadi” ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Berdasarkan Gambar 1 menunjukkan bahwa pelaksanaan tugas akhir ini diawali dengan studi literatur yakni pemahaman dasar teori tentang pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) antara lain prinsip kerja PLTS, sitem-sitem pada PLTS, komponen-komponen yang diperlukan, dan metode untuk evaluasi kinerja PLTS. Studi literatur dilakukan dari beberapa referensi seperti buku dan jurnal. Setelah itu dilakukan pengumpulan data-data yang diperlukan untuk pelaksanaan tugas akhir. Data-data yang dimaksud antara lain adalah lokasi penelitian, iradiasi matahari di lokasi tersebut, beban harian di lokasi, dan yang lainnya. Setelah pertimbangan kebutuhan dan besar anggaran dilakukan pembuatan desain rancangan PLTS yang akan diimplementasikan, yakni PLTS on grid berkapasitas 1350 Wp. Tahap selanjutnya adalah melakukan instalasi komponen-komponen sesuai dengan desain rancangan. Setelah instalasi PLTS selesai,

dilakukan pengujian panel surya untuk mengetahui kondisi panel surya yang digunakan. Kemudian dilakukan pengujian pengoperasian PLTS untuk menguji sistem PLTS secara keseluruhan dan mengevaluasi kinerja *inverter*. Setelah itu PLTS sudah mulai beroperasi dan akan mulai dilakukan pemantauan atau *monitoring* selama dua bulan untuk mengetahui kinerja atau performa PLTS. Tahapan akhir penelitian adalah penarikan kesimpulan dari data yang telah dianalisis, serta kemudian diberikan saran untuk menunjang dan mengembangkan penelitian serupa di masa mendatang.

2.2. Lokasi Penelitian

Pada pelaksanaan tugas akhir ini PLTS diimplementasikan di SMP N 3 Purwodadi, Kabupaten Grobogan, Jawa Tengah. Potensi energi surya di lokasi jika ditinjau dari nilai *global horizontal irradiation* (GHI) adalah sebesar 5,265 kWh/m²/hari [7].

2.3. Penentuan Rancangan PLTS

2.3.1. Komponen Utama

A. Panel Surya

Panel surya yang digunakan pada pengimplementasian ini adalah ini adalah panel surya tipe *monocrystalline* dengan merek JA Solar. Spesifikasi dari panel surya ini diperoleh dari *datasheet* produk seperti yang terdapat pada tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi panel surya

Spesifikasi	Nilai
Daya maksimum (P_{max})	450 Wp
Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc})	49.7 V
Tegangan daya maksimum (V_{mp})	41.52 V
Arus hubung singkat (I_{sc})	11.36 A
Arus daya maksimum (I_{mp})	10.84 A
Efisiensi	20.2 %
Luas permukaan	2,23 m ²

Modul surya yang akan digunakan sebanyak 3 buah dan dirangkai secara seri (*string*). Pada *string* panel surya nilai arus sama dengan arus pada tiap panel surya, sedangkan nilai tegangan *string* adalah penjumlahan dari tegangan tiap panel surya [8], sehingga karakteristik dari *string* panel surya pada PLTS ini adalah:

Tabel 2. Spesifikasi *string* panel surya

Spesifikasi	Nilai
Daya maksimum (P_{max})	1350 Wp
Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc})	149,1 V
Tegangan daya maksimum (V_{mp})	124,56 V
Arus hubung singkat (I_{sc})	11.36 A
Arus daya maksimum (I_{mp})	10.84 A
Luas permukaan	6,69 m ²

B. Inverter

Inverter yang digunakan dalam pengimplementasian PLTS ini adalah *inverter on grid* merek Solis seri mini 1500 4g. Spesifikasi *inverter* ditunjukkan pada tabel 3 berikut.

Tabel 3. Spesifikasi *inverter* Solis seri mini 1500 4g

Specification	Value
Daya input maksimal	1800 watt
Tegangan input maksimal	600 V
Arus input maksimal	11 A
Daya output maksimal	1500 Watt
Arus output maksimal	8,1 A
Efisiensi	97,1 %

2.3.2. Komponen Tambahan

A. Kabel PV dan MCB DC

Kabel PV adalah kabel yang digunakan sebagai penghantar antara *string* panel surya dengan *inverter*. Sedangkan MCB DC adalah komponen untuk pembatas arus dan saklar antara *string* panel surya dan *inverter*. Kabel PV dan MCB DC ditentukan berdasarkan arus maksimal dari *string* panel surya. Persamaan berikut ini adalah persamaan arus maksimal *string* untuk menentukan kuat hantar arus (KHA) kabel PV dan rating MCB DC [8] [9].

$$I_{max} = I_{sc} \times 1,25 \quad (1)$$

$$I_{max} = 11,36 \times 1,25$$

$$I_{max} = 14,2 \text{ A} \approx 14 \text{ A.}$$

KHA dari kabel PV yang diperlukan untuk PLTS ini adalah minimal 14 A. Kemudian rating MCB DC yang diperlukan harus lebih dari 14 A. Oleh karena itu kabel PV yang digunakan untuk PLTS ini adalah kabel PV dengan luas penampang 4 mm² yang memiliki KHA hingga 25 A. MCB DC yang digunakan adalah MCB DC 16 A.

B. Kabel AC dan MCB AC

Kabel AC adalah kabel yang digunakan untuk sebagai penghantar antara *inverter* dengan jala-jala. Sedangkan MCB AC diperlukan sebagai proteksi *over current* dan sebagai saklar antara *inverter* dan jala-jala. Kabel AC dan MCB AC ditentukan berdasarkan arus output maksimal dari *inverter*. Persamaan berikut ini adalah persamaan arus maksimal output *inverter* untuk menentukan KHA kabel AC dan rating MCB AC [10].

$$I_{o \max} = I_{max} \times 1,25 \quad (2)$$

$$I_{o \max} = 8,1 \times 1,25$$

$$I_{o \max} = 10,125 \text{ A} \approx 10 \text{ A.}$$

KHA dari kabel AC yang diperlukan untuk PLTS ini adalah minimal 10 A. Kemudian minimal rating MCB AC yang diperlukan adalah 10 A. Oleh karena itu kabel AC yang digunakan untuk PLTS ini adalah kabel AC dengan

luas penampang 1,5 mm² yang memiliki KHA hingga 19 A. MCB AC yang digunakan adalah MCB AC 10 A.

C. SPD DC

Surge protection device (SPD) adalah peralatan yang berfungsi sebagai proteksi terhadap surja petir. SPD DC ditentukan berdasarkan tegangan rangkaian terbuka dari string panel surya. Berikut ini adalah persamaan untuk penentuan rating SPD DC [8] [9].

$$V_{\text{rating}} = V_{\text{oc}} \times 1,2 \quad (3)$$

$$V_{\text{rating}} = 149,1 \times 1,2$$

$$V_{\text{rating}} = 178,9 \text{ V}$$

Rating tegangan SPD DC yang diperlukan untuk PLTS ini adalah minimal 178,9 V. Oleh karena itu SPD DC yang digunakan yaitu SPD DC 500 V.

D. SPD AC

Proteksi surja juga diperlukan pada sisi AC PLTS. SPD AC ditentukan berdasarkan tegangan nominal jala-jala. Berikut ini adalah persamaan untuk penentuan rating SPD AC.

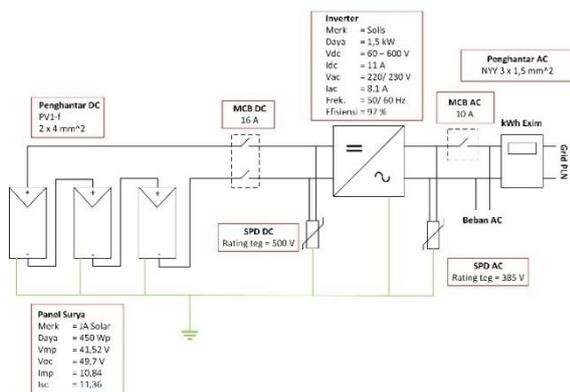
$$V_{\text{rating}} = V_n \times 1,2 \quad (4)$$

$$V_{\text{rating}} = 230 \times 1,2$$

$$V_{\text{rating}} = 276 \text{ V}$$

Rating tegangan SPD AC yang diperlukan untuk PLTS ini adalah minimal 276 V. Oleh karena itu SPD AC yang digunakan yaitu SPD AC 385 V.

Berikut ini adalah rangkaian instalasi PLTS sistem on grid berdasarkan komponen-komponen yang telah ditentukan.



Gambar 2. Detail engineering design PLTS

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengujian Panel Surya

Pengujian panel surya pada dasarnya adalah untuk mengetahui apakah data output dari panel surya sesuai dengan yang tertera pada datasheet atau nameplate. Pengujian yang dilakukan meliputi pengukuran iradiasi matahari, suhu sel surya, tegangan open circuit, dan arus short circuit, serta perhitungan daya input, fill factor, daya output, dan efisiensi.

3.1.1. Uji Tegangan Open Circuit dan Arus Short Circuit dari string

Pengujian tegangan open circuit dan arus short circuit bertujuan untuk mendapatkan data yang diperlukan untuk perhitungan daya output string panel surya. Selain itu juga dilakukan pengukuran iradiasi matahari dan suhu panel surya yang mana sangat mempengaruhi konversi listrik oleh panel surya, serta untuk data perhitungan daya input panel surya. Pengujian ini dilakukan selama 1 hari pada tanggal 23 Agustus 2021, dengan interval waktu pengambilan data setiap 30 menit. Hasil data pengujian ini tertera pada tabel 4.

Tabel 4. Data hasil pengujian larik modul panel surya

Jam	Iradiasi (W/m ²)	Suhu (°C)	Isc (A)	Voc (V)
08:00	694,2	32,3	6,72	135,1
08:30	825,8	34,5	7,86	135,8
09:00	866,1	38,8	8,84	135,3
09:30	962,3	41,6	9,47	135,7
10:00	1048,6	43,8	10,28	134,8
10:30	1022,3	45,4	10,44	134,4
11:00	1307,2	48,8	11,35	134,9
11:30	1294,6	48,5	11,37	133
12:00	1243,9	50	10,84	132,5
12:30	1071,6	50	9,5	134,4
13:00	952,7	49,7	9,71	135,1
13:30	1000,8	49,1	9,48	133,8
14:00	862,7	49,3	8,16	134,3
14:30	729	47,7	7,15	133,6
15:00	469,6	45,2	4,43	136,1
15:30	308,3	43,8	3,08	135,0
16:00	184,1	42,3	1,83	133,4

Pada Tabel 4 di atas menunjukkan bahwa iradiasi matahari selalu berubah-ubah tiap waktu, nilai iradiasi meningkat dari pagi hari dan mencapai puncaknya di siang hari yaitu 1307,2 Watt/m² pada pukul 11.00, kemudian nilainya menurun saat peralihan dari siang ke sore hari. Suhu panel surya relatif sebanding dengan suhu lingkungan, dari hasil pengukuran suhu panel surya tertinggi adalah 50°C pada pukul 12.00. Nilai arus short circuit (Isc) berubah-ubah sebanding dengan perubahan iradiasi. Nilai Isc hasil pengukuran terkecil 1,83 A dan terbesar 11,37 A. Sedangkan besar tegangan open circuit relatif konstan berkisar antara 133 V hingga 136 V.

Berdasarkan Tabel 2, Voc dan Isc yang berdasarkan nameplate adalah 149,1 V dan 11,36 A. Sedangkan Voc dan Isc terbesar hasil pengujian adalah 136,1 V dan 11,37 A. Nilai Voc hasil pengukuran lebih kecil dibandingkan dengan nilai yang tertera pada nameplate, hal ini disebabkan karena perbedaan suhu di lapangan dengan suhu pada kondisi STC, suhu STC adalah 25°C sedangkan suhu di lapangan berkisar di antara 32 - 50°C. Nilai Isc pengujian relatif sama dengan yang tertera pada nameplate.

3.1.2. Perhitungan Daya Panel Surya

A. Daya Input

Perhitungan daya input bertujuan untuk mengetahui besar daya yang diterima modul panel surya yang mana dapat digunakan untuk mengetahui efisiensi modul panel surya. Data yang digunakan adalah data iradiasi matahari pada

Tabel 4. Daya input didapat dari hasil perkalian iradiasi (W/m^2) dengan luas permukaan *string* panel surya (m^2) [11]. Luas permukaan *string* panel surya adalah $6,69 m^2$, sehingga daya input pada pukul 8.00 adalah

$$P_{in} = E \times A \quad (5)$$

$$P_{in} = 694,2 W/m^2 \times 6,69 m^2$$

$$P_{in} = 4644,19 W.$$

B. Perhitungan Fill Factor

Fill factor (FF) adalah rasio antara daya aktual dari panel surya dengan arus dan tegangan maksimal yang mana adalah arus *short circuit* dan tegangan *open circuit*. PLTS yang menggunakan teknologi MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) daya aktualnya adalah pada saat tegangan dan arus pada kondisi daya maksimum atau tegangan *maximum power* (V_{mp}) dan arus *maximum power* (I_{mp}). Sehingga persamaan *fill factor* adalah rasio antara tegangan dan arus pada keadaan atau titik daya maksimum (P_{mp}) dengan tegangan *open circuit* (V_{oc}) dan arus *short circuit* (I_{sc}) panel surya. Data V_{mp} dan I_{mp} serta V_{oc} dan I_{sc} panel surya tertera pada *nameplate* panel surya. Data pada *nameplate* menunjukkan bahwa V_{mp} dan I_{mp} panel surya adalah $41,52 V$ dan $10,84 A$ serta V_{oc} dan I_{sc} adalah $49,7 V$ dan $11,36 A$. Dari data-data tersebut dapat diketahui nilai *fill factor* dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [8]:

$$FF = (V_{mp} \times I_{mp}) / (V_{oc} \times I_{sc}) \quad (6)$$

$$= (41,52 \times 10,84) / (49,7 \times 11,36)$$

$$= 0,7971$$

C. Daya Output Maksimum

Daya output maksimum dari panel surya dapat dihitung dari data hasil pengukuran V_{oc} , I_{sc} , dan nilai *fill factor* [11]. Berikut ini adalah perhitungan daya output maksimum pada pukul 8.00:

$$P_{out} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (7)$$

$$P_{out} = 135,1 \times 6,72 \times 0,7971$$

$$P_{out} = 723,39 W$$

D. Efisiensi Panel Surya

Efisiensi modul panel surya adalah rasio atau perbandingan antara nilai daya output oleh panel surya dengan daya input dari iradiasi matahari. Pada pukul 8.00 telah diketahui bahwa daya input dan daya output adalah $4644,19 Watt$ dan $723,39 Watt$. Sehingga efisiensi panel surya pada saat itu adalah

$$\eta = P_{out} / P_{in} \times 100\% \quad (8)$$

$$\eta = 723,39 / 4644,19 \times 100\%$$

$$\eta = 15,57\%$$

Dengan melakukan perhitungan yang sama akan didapat nilai efisiensi *string* panel surya tiap waktu pengujian yang dimuat pada tabel 5.

Tabel 5. Data hasil perhitungan efisiensi *string* panel surya

Jam	Iradian (W/m^2)	Suhu ($^{\circ}C$)	Pin (W)	Po (W)	η (%)
08:00	694,2	32,3	4644,19	723,21	15,57
08:30	825,8	34,5	5524,60	850,28	15,39
09:00	866,1	38,8	5794,20	952,77	16,44
09:30	962,3	41,6	6437,78	1023,69	15,90
10:00	1048,6	43,8	7015,13	1103,88	15,73
10:30	1022,3	45,4	6839,18	1117,73	16,34
11:00	1307,2	48,8	8745,16	1219,68	13,94
11:30	1294,6	48,5	8660,87	1204,62	13,90
12:00	1243,9	50	8321,62	1144,15	13,74
12:30	1071,6	50	7169,01	1017,09	14,18
13:00	952,7	49,7	6373,56	1044,99	16,39
13:30	1000,8	49,1	6695,35	1010,42	15,09
14:00	862,7	49,3	5771,46	872,98	15,12
14:30	729	47,7	4877,01	760,94	15,60
15:00	469,6	45,2	3141,62	480,28	15,28
15:30	308,3	43,8	2062,52	331,22	16,05
16:00	184,1	42,3	1231,62	194,46	15,78
Rata-rata					15,32

Tabel 5 di atas adalah data hasil perhitungan daya input, daya output, dan efisiensi *string* modul panel surya. Berdasarkan tabel tersebut daya output panel surya tertinggi adalah $1219 Watt$, yang mana lebih rendah dari *nameplate* yang mana kapasitas maksimal adalah $1350 Wp$. Hal tersebut disebabkan karena rata-rata efisiensi aktual perhitungan $15,32\%$ lebih rendah dari efisiensi yang tertera pada *nameplate* yakni $20,2\%$. Efisiensi aktual hasil perhitungan cenderung lebih kecil daripada efisiensi yang tertera pada *nameplate* dikarenakan suhu panel surya di lapangan yang lebih tinggi dari suhu pada kondisi STC (*Standart Test Conditions*) yakni $25^{\circ}C$.

3.2. Evaluasi Kinerja Inverter

Evaluasi kinerja *inverter* dilakukan untuk mengetahui kinerja *inverter* dalam mengkonversi listrik DC dari *array* panel surya menjadi listrik AC yang sinkron dengan *grid*. Beberapa parameter yang digunakan dalam evaluasi *inverter* antara lain tegangan, arus, daya, dan frekuensi output *inverter* dan daya dari *array* panel surya. Pengambilan data dilakukan selama 1 hari pada tanggal 9 September 2021, dengan interval waktu pengambilan data setiap 15 menit. Berikut adalah data hasil *monitoring* yang dimuat pada tabel 6 [12].

Berdasarkan data pada tabel 6 di atas, dapat dilihat bahwa data input dari PV yang diterima *inverter* selalu berubah mengikuti iradiasi yang dipengaruhi oleh cuaca. Tegangan output *inverter* selalu berubah dengan *range* berkisar antara $233 V$ sampai dengan $261 V$. Frekuensi output dari *inverter* juga selalu berubah, namun masih dalam kisaran $50 Hz$. Hal ini disebabkan karena *inverter* yang selalu mensinkronkan tegangan dan frekuensi outputnya dengan jala-jala, sehingga sistem antara PLTS dan jala-jala dapat terinterkoneksi. Tegangan jala-jala di lokasi penelitian tidak memenuhi standar karena melebihi batas standar yakni 5% di atas tegangan nominal. Sedangkan perubahan besar arus output adalah berdasarkan nilai tegangan dan

daya output. Misalnya pada pukul 7.45, besar tegangan dan daya output adalah 237,6 V dan 725,81 Watt, besar arus outputnya 2,9 A. Sedangkan pada pukul 8.00 besar tegangan dan daya output adalah 237,5 V dan 781,78 Watt, besar arus outputnya adalah 3,2 A.

Tabel 6. Data hasil monitoring inverter

Jam	Ppv (W)	Voutput (V)	Ioutput (A)	Pout (W)	Frek (Hz)
07:00	505	246,80	1,90	490,60	49,94
07:15	588	241,20	2,30	570,46	50,11
07:30	673	245,10	2,50	653,63	50,10
07:45	748	237,60	2,90	725,81	49,99
08:00	805	237,50	3,20	781,78	49,94
08:15	880	236,10	3,40	853,78	50,00
08:30	934	237,40	3,70	906,86	50,10
08:45	962	236,40	3,70	933,57	50,01
09:00	1000	233,50	4,00	970,64	50,03
09:15	1051	235,30	4,20	1019,49	49,96
09:30	1102	235,00	4,30	1069,04	49,99
09:45	1087	250,40	4,00	1055,15	50,03
10:00	1142	247,70	4,20	1107,76	50,03
10:15	1142	242,80	4,30	1108,50	50,03
10:30	1145	237,60	4,40	1111,10	49,98
10:45	1135	233,00	4,50	1101,31	50,00
11:00	1185	240,70	4,50	1149,63	50,01
11:15	186	232,40	0,80	180,83	50,01
11:30	1155	234,30	4,50	1121,03	50,01
11:45	1082	235,40	4,30	1049,86	50,00
12:00	1077	236,90	4,20	1044,82	50,10
12:15	1149	239,50	4,40	1114,67	50
12:30	1132	239,50	4,40	1098,12	49,99
12:45	307	250,30	1,20	298,41	49,98
13:00	212	250,60	0,80	206,15	49,94
13:15	1020	261,60	3,60	990,28	49,99
13:30	660	261,10	2,30	641,08	49,94
13:45	817	257,50	2,90	792,55	49,96
14:00	204	254,40	0,80	198,62	49,97
14:15	136	253,40	0,60	132,56	49,94
14:30	159	257,90	0,70	154,78	50,01
14:45	223	254,80	0,90	217,19	49,98
15:00	586	257,00	2,10	568,56	50,04
15:15	503	257,40	1,80	488,11	50,01
15:30	115	257,90	0,60	112,33	49,98
15:45	104	258,20	0,50	101,11	50,00
16:00	91	258,80	0,50	88,49	50,01

Efisiensi inverter merupakan perbandingan daya output dan daya input dari inverter, dimana daya input inverter merupakan daya yang dihasilkan dari array panel surya. Berdasarkan Tabel 6 pada pukul 10:00 diketahui besar daya output 1107,76 W dan daya input PV 1142 W. Pada saat itu efisiensi inverter adalah

$$\eta = P_{out} / P_{in} \times 100\% \tag{9}$$

$$\eta = 1107,76 / 1142 \times 100\%$$

$$\eta = 97\%$$

Dengan menggunakan perhitungan efisiensi inverter seperti di atas, didapatkan data nilai efisiensi inverter pada waktu yang lain yang dimuat pada Tabel 7 berikut ini.

Tabel 7. Data hasil perhitungan efisiensi inverter

Jam	P _{out} (W)	P _{in} (W)	η (%)
07:00	490,60	505	97,15
07:15	570,46	588	97,01
07:30	653,63	673	97,12
07:45	725,81	748	97,03
08:00	781,78	805	97,11
08:15	853,78	880	97,02
08:30	906,86	934	97,09
08:45	933,57	962	97,04
09:00	970,64	1000	97,06
09:15	1019,49	1051	97,00
09:30	1069,04	1102	97,00
09:45	1055,15	1087	97,06
10:00	1107,76	1142	97,00
10:15	1108,50	1142	97,06
10:30	1111,10	1145	97,03
10:45	1101,31	1135	97,03
11:00	1149,63	1185	97,01
11:15	180,83	186	97,22
11:30	1121,03	1155	97,05
11:45	1049,86	1082	97,03
12:00	1044,82	1077	97,01
12:15	1114,67	1149	97,01
12:30	1098,12	1132	97,00
12:45	298,41	307	97,20
13:00	206,15	212	97,24
13:15	990,28	1020	97,08
13:30	641,08	660	97,13
13:45	792,55	817	97,00
14:00	198,62	204	97,36
14:15	132,56	136	97,47
14:30	154,78	159	97,34
14:45	217,19	223	97,39
15:00	568,56	586	97,02
15:15	488,11	503	97,04
15:30	112,33	115	97,67
15:45	101,11	104	97,22
16:00	88,49	91	97,24
Rata-rata			97,12

Berdasarkan data perhitungan efisiensi inverter, didapatkan bahwa rata-rata efisiensi inverter sebesar 97,12% dengan nilai efisiensi tertinggi adalah 97,67% dan nilai efisiensi terendah adalah 97,00%. Efisiensi dari hasil perhitungan relatif sama dengan yang tertera pada datasheet inverter yakni 97,1%. Nilai efisiensi inverter yang tinggi menandakan bahwa tidak banyak losses dalam pengkonversian listrik DC dari panel surya ke listrik AC.

3.3. Produksi Listrik Harian PLTS

Data-data produksi listrik harian dianalisis untuk mengetahui kinerja PLTS dalam memproduksi listrik. Pengambilan data ini dilakukan selama dua bulan yaitu pada bulan September dan Oktober 2021. Sebagai tambahan data produksi PLTS bulanan ini juga dapat digunakan sebagai analisis performa sistem PLTS. Berikut ini adalah data hasil produksi listrik harian yang dimuat pada Tabel 8.

Tabel 8. Data produksi listrik harian PLTS

September		Oktober	
Hari Ke-	Produksi Listrik (kWh)	Hari Ke-	Produksi Listrik (kWh)
1	6,4	1	6,4
2	5,2	2	6,6
3	5,6	3	6,1
4	6,5	4	5,5
5	3,8	5	6,3
6	6,1	6	6,2
7	6,6	7	6,8
8	6,8	8	5,9
9	6,4	9	6,6
10	6,7	10	6,8
11	4,1	11	6,4
12	4,8	12	7,0
13	4,0	13	6,5
14	3,3	14	5,7
15	6,8	15	5,8
16	7,3	16	5,0
17	7,0	17	5,6
18	7,4	18	5,7
19	6,3	19	4,8
20	7,0	20	6,2
21	4,1	21	6,5
22	5,3	22	5,3
23	5,9	23	5,2
24	6,5	24	6,0
25	6,7	25	6,1
26	4,6	26	5,9
27	6,0	27	5,7
28	6,5	28	5,8
29	7,4	29	5,2
30	7,3	30	4,7
-	-	31	4,8
Total	178,4	Total	183,1
Total Bulan September & Oktober		361,5	
Rata-rata harian		5,92	

Berdasarkan tabel 8 diketahui bahwa pada bulan September PLTS mampu menghasilkan energi listrik hingga 178,3 kWh dengan produksi paling banyak dalam sehari adalah 7,4 kWh sedangkan paling rendah 3,3 kWh. Sedangkan pada bulan Oktober PLTS mampu menghasilkan listrik hingga 183,1 kWh dengan produksi harian tertinggi adalah 7,0 kWh dan terendah sebesar 4,7 kWh. Total produksi listrik selama dua bulan adalah sebesar 361,5 kWh dengan rata-rata 5,92 kWh per hari. Besar energi harian yang dibangkitkan PLTS selalu berbeda. Hal tersebut terjadi sebab produksi listrik oleh PLTS sangat dipengaruhi oleh cuaca sekitar yang mana berdampak pada iradiasi matahari yang diterima modul panel surya.

3.4. Analisis Performa PLTS

Performa atau kinerja PLTS dianalisis berdasarkan nilai *performance ratio* (PR) yaitu suatu rasio antara besar energi aktual hasil produksi PLTS dengan energi output PLTS hasil perhitungan. Semakin tinggi nilai PR maka PLTS beroperasi dengan performa yang bagus [13], dengan kata lain energi aktual yang dihasilkan PLTS mendekati atau sesuai dengan yang diperkirakan. Berdasarkan Tabel 8, energi aktual hasil PLTS pada bulan

September adalah 178,4 kWh. Kemudian nilai *global horizontal irradiance* (GHI) di lokasi PLTS yaitu 5,265 kWh/m²/hari sehingga total GHI pada bulan September adalah 157,95 kWh/m². Sementara itu *string* panel surya memiliki luas 6,69 m² serta efisiensi panel surya menurut *datasheet* adalah 20,2%. Nilai PR pada bulan September dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [14]:

$$PR = \frac{\text{Energi aktual output PLTS}}{GHI \times \text{area} \times \eta} \tag{10}$$

$$PR = \frac{178,4}{157,95 \times 6,69 \times 20,2\%}$$

$$PR = \frac{178,4}{213,45}$$

$$PR = 0,835 \text{ atau } 83,5\%$$

Dengan menggunakan perhitungan yang sama, didapat nilai *performance ratio* (PR) bulan Oktober, dan total selama dua bulan yang dimuat dalam tabel 9.

Tabel 9. Hasil perhitungan performance ratio

Bulan	Energi aktual (kWh)	Prediksi energi (kWh)	PR (%)
September	178,4	213,45	83,5
Oktober	183,1	220,56	83,01
Total	361,5	434,01	83,29

Berdasarkan hasil perhitungan PR pada tabel 9 didapatkan nilai PR pada bulan September adalah 83,5%. Hal ini berarti diperkirakan 16,5% dari potensi energi solar matahari pada periode tersebut tidak dikonversi menjadi energi listrik dikarenakan beberapa faktor seperti *losses* pada penghantar atau kabel, *thermal losses*, atau *losses* yang lain. Nilai PR pada bulan Oktober dan total selama dua bulan tidak berbeda jauh dengan bulan September yakni sebesar 83,01% dan 83,29%. Dari nilai PR tersebut dapat mengindikasikan bahwa selama periode September dan Oktober, PLTS 1350 Wp di SMP N 3 Purwodadi beroperasi dengan baik karena memiliki PR lebih dari 80% sehingga tidak terdapat banyak *losses* dalam pengoperasian PLTS [15].

4. Kesimpulan

Pembangkit listrik tenaga surya 1350 Wp di SMP N 3 Purwodadi telah diimplementasikan dan beroperasi dengan baik. Panel surya yang digunakan dalam kondisi bagus namun memiliki efisiensi 15,32% yang mana lebih rendah dari efisiensi yang tertera pada *nameplate* yang diakibatkan oleh suhu panel surya di lapangan yang lebih tinggi dari kondisi STC. *Inverter* yang digunakan beroperasi dengan baik dan memiliki efisiensi 97,12% yang mana sesuai dengan *nameplate*. Selama pengoperasian pada bulan September dan Oktober, PLTS telah membangkitkan energi listrik sebanyak 361 kWh dengan rata-rata 5,92 kWh. PLTS memiliki *performance ratio* (PR) 83% yang mengindikasikan bahwa PLTS beroperasi dengan baik dan tidak banyak *losses* dalam pengkonversian energi matahari menjadi energi listrik.

Referensi

- [1]. Triananta M. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Di Indonesia. Jakarta: Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2019.
- [2]. Price G. Renewable power and energy photovoltaic systems. vol. I. New York: Momentum Press Engineering. 2018.
- [3]. Kaltschmitt M, Streicher W, dan Wiese A. Renewable energy Technology, and environment economics. Fankfurt: Springer. 2007.
- [4]. Anthony J. Handbook for Rooftop Solar Development in Asia. Mandaluyong: Asian Development Bank. 2014.
- [5]. Suharyati S, Pambudi S, Wibowo J, dan Pratiwi N. Outlook Energi Indonesia 2019. Jakarta: Dewan Energi Nasional. 2019.
- [6]. Rachmi A, Prakoso B, Hanny B, Devi S, dan Winne. Panduan Perencanaan dan Pemanfaatan PLTS atap di Indonesia. Jakarta: Indonesia Clean Energy Development (ICED). 2020.
- [7]. Global Solar Atlas, Solargis “Global horizontal irradiation in Purwodadi” <https://globalsolaratlas.info/map?c=-7.081126,110.917287,11&s=-7.081126,110.917287&m=site>. Diakses: Okt. 17, 2021.
- [8]. Ramadhani B. Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dos & Don'ts. Jakarta: Energising Development (EnDev) Indonesia. 2018.
- [9]. SNI IEC. 62446-2016. *Sistem fotovoltaik terhubung ke jaringan listrik - Persyaratan minimum untuk sistem dokumentasi, uji komisioning dan inspeksi*. Jakarta. Badan Standar Nasional. 2016.
- [10]. SNI. 0225. *Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUIL 2011)*. Jakarta. Badan Standar Nasional. 2011.
- [11]. Windarta J, Pratama A, Denis, dan Nugroho A. Testing of Solar Power Plant Components Off-Grid Systems and Engineering Economic Analysis at Cemara Island, Brebes Regency, Indonesia. *International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering (IJRSEEE)*. 2019; 5(2): 9-17.
- [12]. Solis Inverter, “PV monitoring.” <https://m.ginlong.com/main.html>. Diakses: Nov. 01, 2021.
- [13]. Sharma V dan Chandel S. Performance analysis of a 190kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. *Elsevier*. 2013; 55: 476-485.
- [14]. Syahindra K, Ma'Arif S, Widayat A, Fauzi A, dan Setiawan E. *Solar PV system performance ratio evaluation for electric vehicles charging stations in transit-oriented development (TOD) areas*. E3S Web of Conferences.2021; 231.
- [15]. *Performance ratio - Quality factor for the PV plant*, SMA Solar Technology AG, Niestetal, Jerman, 2016.