

Pengaruh Efektivitas Panel Surya 20 WP terhadap Polutan dengan Monitoring IoT

¹Nayusrizal, ^{2*}Tony Koerniawan, ³Aas Wasri Hasanah

Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Institut Teknologi PLN

*Corresponding Author e-mail: tony.koerniawan@itpln.ac.id

Received: July 2025; Revised: July 2025; Published: August 2025

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu solusi energi terbarukan yang pemanfaatannya terus berkembang. Namun, panel surya yang terpasang di ruang terbuka sangat rentan terhadap paparan polutan yang dapat menghalangi penyerapan cahaya dan menurunkan efektivitasnya. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh polutan terhadap efisiensi relatif daya panel surya serta mengevaluasi kinerja sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT). Metode penelitian dilakukan melalui eksperimen lapangan dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32, sensor INA219, modul Mini560 step-down, serta platform Blynk dan Google Spreadsheet untuk pemantauan real-time. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi bersih, panel surya menghasilkan daya rata-rata 11,87 W dengan iradiasi 526,57 W/m² dengan efisiensi relatif 100 %. Pada kondisi debu hasil pembakaran 3 gram, daya rata-rata menurun menjadi 9,14 W dengan iradiasi 510,52 W/m² dan efisiensi 77 %. Sementara itu, polutan basah tiga titik menurunkan daya rata-rata menjadi 8,04 W pada iradiasi 500,52 W/m² dengan efisiensi 67,73 %. Penurunan paling signifikan terjadi pada jelaga karbon 5 gram dengan daya rata-rata hanya 5,26 W pada iradiasi 472,63 W/m² dan efisiensi 44,31 %. Temuan ini membuktikan bahwa semakin rendah iradiasi yang diterima akibat polutan, semakin rendah pula daya keluaran panel surya. Polutan kering, terutama jelaga karbon, memberikan dampak paling merugikan dibanding polutan basah. Sistem IoT terbukti efektif dalam merekam data secara real-time, sehingga dapat mendukung pemantauan dan optimalisasi operasional PLTS.

Kata kunci: ESP32, INA219, Internet of Things (IoT), Panel Surya, Polutan

Effect of Effectiveness of 20 WP Solar Panels on Pollutants Using IoT Monitoring

Abstract

Solar Power Plants (PLTS) are a renewable energy solution whose use continues to grow. However, solar panels installed in open spaces are very susceptible to exposure to pollutants which can block light absorption and reduce their effectiveness. This research aims to analyze the influence of pollutants on the relative efficiency of solar panel power and evaluate the performance of an Internet of Things (IoT) based monitoring system. The research method was carried out through field experiments using an ESP32 microcontroller, INA219 sensor, step-down Mini560 module, as well as the Blynk and Google Spreadsheet platforms for real-time monitoring. The research results show that in clean conditions, solar panels produce an average power of 11.87 W with irradiation of 526.57 W/m² with a relative efficiency of 100%. Under conditions of 3 grams of combustion dust, the average power decreased to 9.14 W with irradiation of 510.52 W/m² and efficiency of 77%. Meanwhile, three-point wet pollutant reduces the average power to 8.04 W at irradiation of 500.52 W/m² with an efficiency of 67.73%. The most significant reduction occurred in 5 gram carbon soot with an average power of only 5.26 W at irradiation of 472.63 W/m² and efficiency of 44.31%. This finding proves that the lower the irradiation received due to pollutants, the lower the solar panel output power. Dry pollutants, especially carbon soot, have the most detrimental impact compared to wet pollutants. The IoT system has proven to be effective in recording data in real-time, so that it can support monitoring and optimizing PLTS operations.

Keywords: ESP32, INA219, Internet of Things (IoT), Solar Panels, Pollutants

How to Cite: Nayusrizal, N., Koerniawan, T., & Hasanah, A. W. (2025). Pengaruh Efektivitas Panel Surya 20 WP terhadap Polutan dengan Monitoring IoT. *Journal of Authentic Research*, 4(Special Issue), 1081–1102. <https://doi.org/10.36312/jar.v4iSpecial Issue.3474>



<https://doi.org/10.36312/jar.v4iSpecial Issue.3474>

Copyright© 2025, Nayusrizal et al.

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) License.



PENDAHULUAN

Energi terbarukan, terutama energi surya, memiliki banyak manfaat, seperti menurunkan emisi gas rumah kaca, meningkatkan ketahanan energi, dan menciptakan lapangan kerja baru. Selain itu, energi terbarukan juga dapat membantu mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan dan mendukung upaya mitigasi perubahan iklim (Corio et al., 2020). Konversi energi di Indonesia terutama bergantung pada tenaga surya. Indonesia memiliki potensi besar untuk menghasilkan energi terbarukan dari tenaga surya karena lokasinya di khatulistiwa dan memiliki potensi 207.8 Gigawatts tenaga surya, yang merupakan hampir 50% dari potensi total negara (Kurniawan et al., 2022).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu teknologi pembangkit listrik yang mengubah energi panas dari cahaya matahari menjadi energi listrik (Yudho et al., 2025). Inti dari PLTS adalah penggunaan sel surya atau panel surya untuk menangkap energi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik. Efek fotovoltaiik memungkinkan proses ini terjadi; sinar matahari mengeksitasi elektron dalam bahan semikonduktor, menghasilkan arus listrik yang dapat digunakan untuk mengisi berbagai perangkat elektronik. PLTS terdiri dari beberapa bagian utama. Panel surya yang terdiri dari sel surya berfungsi menangkap energi matahari, inverter mengubah arus searah (DC) yang dihasilkan panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) untuk mensuplai listrik ke jaringan rumah atau grid, dan sistem penyangga berupa baterai berperan menyimpan energi surya yang dapat digunakan ketika sinar matahari tidak tersedia (Joisman Edas & Ahmad Baihaqi, 2024).

Sistem PLTS terinterkoneksi (On-Grid) atau Grid Connected PV adalah sistem pembangkit listrik yang menghasilkan listrik dengan memanfaatkan radiasi matahari. Sistem ini terhubung ke jaringan PLN sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara langsung oleh pengguna rumah tangga maupun bangunan komersial. Teknologi ini dinilai ramah lingkungan dan bebas emisi (Koerniawan et al., 2018), sekaligus menjadi bagian penting dari bauran energi Indonesia untuk mencapai keberlanjutan energi dan pengurangan emisi karbon (Syaukani, 2024). Sementara itu, sistem PLTS off-grid digunakan di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik PLN. Sistem ini hanya mengandalkan panel surya dan penyimpanan energi berupa baterai, sehingga dapat menyediakan kemandirian energi bagi pengguna di wilayah terpencil (Wasri Hasanah et al., 2018; Halim & Oetomo, 2020).

Namun, terdapat tantangan besar dalam menjaga efisiensi PLTS, salah satunya adalah kebersihan permukaan panel surya. Kotoran, polutan, dan kondisi iklim seperti hujan, debu, maupun panas berlebih terbukti memengaruhi kinerja panel surya (Talawo et al., 2022). Jelaga karbon bahkan dilaporkan memiliki dampak efisiensi yang lebih parah dibanding polutan basah atau debu ringan karena sifatnya yang sangat menyerap cahaya (Amusan, 2021). Dengan demikian, pemeliharaan panel surya menjadi faktor krusial dalam menjaga keberlanjutan kinerja PLTS. Di sisi lain, perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) telah memungkinkan sistem monitoring PLTS berbasis sensor yang dapat melakukan deteksi performa secara real-

time, memberikan peringatan dini terhadap penurunan daya, dan meningkatkan keandalan operasional (Alombah et al., 2025).

Meskipun sudah ada penelitian tentang pengaruh kebersihan panel terhadap kinerja PLTS (Talawo et al., 2022; Amusan, 2021) serta pemanfaatan IoT untuk pemantauan sistem energi (Alombah et al., 2025; Yudho, 2021; Inayah et al., 2023), masih terdapat gap riset yang penting untuk diisi. Penelitian sebelumnya cenderung terfokus pada satu aspek saja, misalnya karakteristik polutan tanpa dukungan monitoring real-time, atau sebaliknya pengembangan sistem IoT tanpa menguji pengaruh spesifik polusi lingkungan terhadap efisiensi panel surya. Dengan kata lain, belum banyak penelitian yang secara simultan mengintegrasikan analisis dampak berbagai jenis polutan dengan sistem monitoring berbasis IoT untuk memantau performa PLTS secara lebih komprehensif.

Penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan mengembangkan sistem monitoring berbasis IoT menggunakan ESP32, sensor INA219, dan mini560 step-down converter, dengan output data ditampilkan pada LCD I2C, dashboard Blynk, dan Google Spreadsheet. Eksperimen lapangan dilakukan dengan menguji panel PV dalam kondisi bersih dan terpapar berbagai jenis polutan, meliputi debu hasil pembakaran, jelaga karbon, serta polutan basah. Tujuan utama penelitian ini adalah menghitung efisiensi relatif daya PV terhadap kondisi bersih serta mengevaluasi kemampuan sistem IoT dalam mendeteksi perubahan performa akibat polusi.

Dengan pendekatan ini, penelitian tidak hanya memberikan analisis empiris mengenai variasi dampak polutan terhadap efisiensi panel surya, tetapi juga menilai keefektifan IoT dalam pemantauan real-time penurunan performa. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam pemeliharaan PLTS skala kecil agar lebih efisien dan adaptif terhadap kondisi lingkungan, sekaligus mendukung strategi adopsi energi surya yang berkelanjutan, memperpanjang umur operasional panel, dan mengoptimalkan pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia.

METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen lapangan dengan pendekatan kuantitatif. Tahapan penelitian dimulai dari studi literatur, penentuan variabel, perancangan prototype, pembuatan sistem monitoring, hingga pengujian panel surya dengan variasi polutan. Seluruh data diperoleh melalui sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor INA219, Mini560 Step-Down Converter, dan LCD I2C yang terhubung dengan aplikasi Blynk serta Google Spreadsheet untuk pemantauan real-time.

Alat dan Bahan

Alat utama yang digunakan adalah panel surya tipe monocrystalline dengan kapasitas 20 WP. Panel ini dipilih karena memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan jenis polycrystalline atau thin film, serta dapat memberikan hasil

pengujian yang stabil dalam skala kecil. Spesifikasi teknis panel ditunjukkan pada Tabel 1.




Tabel 1. Spesifikasi Panel Surya







Spesifikasi	Panel Monocrystalline
Kapasitas Maksimum (Pmax)	20 WP
Tegangan Maksimum (Vmp)	17,8 V
Arus Maksimum (Imp)	1,13A
Tegangan Sirkuit Terbuka (Voc)	21,8V
Arus Hubung Singkat (Isc)	1,19A
Tegangan Sistem Maksimal	1000V DC
Suhu Operasi	-40°C hingga +85°C
Dimensi Panel	490 mm x 350 mm x 25 mm


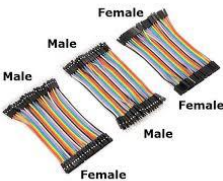





Dari Tabel 1 terlihat bahwa panel surya memiliki kapasitas maksimum 20 WP dengan tegangan maksimum (Vmp) 17,8 V dan arus maksimum (Imp) 1,13 A. Tegangan sirkuit terbuka (Voc) mencapai 21,8 V dengan arus hubung singkat (Isc) 1,19 A. Spesifikasi ini memastikan bahwa panel mampu memberikan daya yang cukup untuk diuji dalam berbagai kondisi polutan.

Selain panel surya, penelitian juga dilengkapi dengan sejumlah perangkat pendukung, seperti solar charge controller, baterai 12V/7,2Ah, sensor INA219, ESP32, Mini560, LCD 20x4, multimeter, solar power meter, timbangan digital, serta perangkat komputer dan smartphone. Daftar lengkap komponen penunjang ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komponen Elektronik Penunjang

No	Nama	Spesifikasi	Gambar
1.	Modul Panel Surya	20 WP	
2.	Solar Charge Controller (SCC)	12V / 24V	
3.	Baterai	12V / 7.2Ah	

No	Nama	Spesifikasi	Gambar
4.	Sensor INA219	-	
5.	ESP32	Wifi Micro USB	
6.	Mini560 Step Down	5V	
7.	LCD	20 x 4	
8.	Multimeter	600VAC/VDC	
9.	Solar Power Meter	SPM -1116SD	




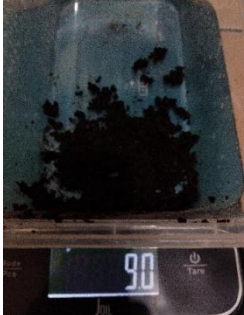


No	Nama	Spesifikasi	Gambar
9.	Timbangan Digital	-	
10.	Kabel Penghantar	-	
11.	Lampu DC dan Kipas Mini	-	
12.	Laptop	-	
13.	Handphone	-	
14.	Kabel USB	-	
15.	Kain Majun	-	

Berdasarkan Tabel 2, sistem monitoring terdiri dari kombinasi perangkat keras yang memungkinkan pencatatan data secara otomatis. Sensor INA219 berfungsi

mengukur tegangan dan arus, ESP32 sebagai pusat pengendali sekaligus penghubung ke jaringan internet, sementara Mini560 Step Down menurunkan tegangan dari panel agar sesuai dengan kebutuhan perangkat monitoring. Seluruh komponen ini bekerja secara terintegrasi untuk mendukung pengambilan data yang akurat.

Variasi polutan yang digunakan dalam penelitian terdiri dari debu hasil pembakaran (3 g dan 5 g), jelaga karbon (3 g dan 5 g), serta pupuk tanaman basah (9 g/3 titik dan 15 g/5 titik). Visualisasi variasi polutan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Visualisasi Variasi Polutan

Jenis Polutan	Dokumentasi	Jenis Polutan	Dokumentasi
Debu Hasil Pembakaran 3 g		Debu Jelaga Karbon 5 g	
Debu Hasil Pembakaran 5 g		Pupuk Tanaman Basah 9 g (3 titik)	
Debu Jelaga Karbon 3 g		Pupuk Tanaman Basah 15 g (5 titik)	

Prosedur Penelitian

Tahap pengujian dimulai dengan memastikan kondisi panel dalam keadaan bersih. Setelah itu dilakukan pengujian dengan menambahkan polutan sesuai variasi yang telah ditentukan. Proses pengambilan data dilakukan dari pukul 08.00 hingga 17.00 WIB. Setiap pengujian meliputi pencatatan tegangan, arus, dan daya yang diperoleh melalui sensor, ditampilkan pada aplikasi Blynk, dan secara otomatis tersimpan di Google Spreadsheet.

Prosedur pengujian meliputi:

1. Kondisi bersih: panel dibersihkan, diukur performanya sebagai baseline.
2. Debu hasil pembakaran: ditaburkan sebanyak 3 g dan 5 g pada permukaan panel, data dicatat melalui sistem monitoring.
3. Jelaga karbon: ditaburkan 3 g dan 5 g, hasil dicatat sama seperti sebelumnya.
4. Polutan basah: pupuk tanaman yang telah dicampur air diaplikasikan pada 3 titik (9 g) dan 5 titik (15 g).

Metode Analisis Data

Pengujian dilakukan untuk mengukur dan memproses *monitoring* arus, tegangan dan daya pada PLTS dalam kondisi tanpa polutan dan terpapar polutan. Pengukuran dilakukan secara periodik, dengan pengukuran dari pukul 08:00 – 17:00 WIB. Tujuannya adalah untuk mengevaluasi tingkat efektivitas PV terhadap polutan pada kinerja PLTS. Selain melakukan pengukuran berbasis IoT tersebut, akan dilakukan perhitungan terkait efisiensi dari PV tersebut. Sehingga dapat diketahui pengaruh polutan terhadap kinerja PV tersebut.

Adapun untuk menghitung daya pada panel surya dapat menggunakan persamaan di bawah ini (Rajeshkumar et al., 2023):

$$P = V \cdot I$$

Keterangan:

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Dalam setiap variasi kondisi panel surya dalam keadaan berpolutan dan bersih, dilakukan analisis performa panel berdasarkan daya output yang dihasilkan. Untuk membandingkan kinerja tiap kondisi menggunakan nilai daya rata-rata dari tiap kondisi, digunakan untuk mengetahui presentase penurunan daya dari tiap kondisi. Dalam menghitungnya dapat menggunakan persamaan di bawah ini (Rashid et al., 2023):

$$\% \text{ Relatif} = \left(\frac{P \text{ Terpapar Polutan}}{P \text{ Bersih}} \right) \times 100$$

Keterangan:

P Bersih = Daya Bersih (Watt)

$P \text{ Terpapar Polutan} = \text{Daya Terpapar (Watt)}$

HASIL DAN PEMBAHASAN

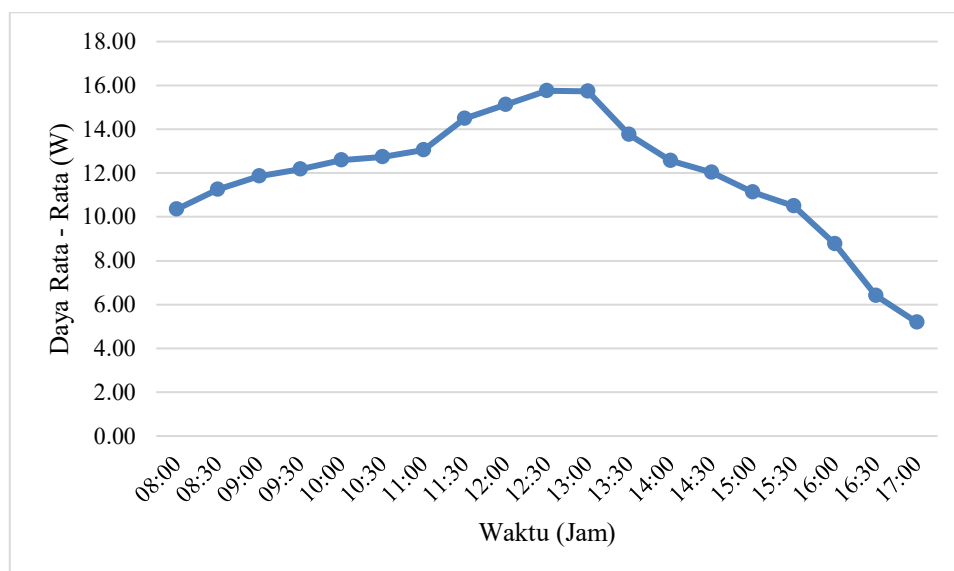
Hasil Pengujian PV dalam Kondisi Bersih

Pengujian awal dilakukan pada panel surya dalam kondisi bersih tanpa adanya polutan sebagai data baseline. Pengukuran dilakukan dari pukul 08.00–17.00 WIB dengan interval pencatatan setiap 30 menit. Data hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengukuran pada PV dalam Kondisi Bersih

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Iradiasi (W/m ²)
08:00	13,85	0,75	10,36	80
08:30	15,98	0,70	11,27	205
09:00	16,62	0,71	11,85	335
09:30	16,38	0,74	12,16	455
10:00	16,52	0,76	12,59	545
10:30	16,28	0,78	12,75	660
11:00	15,86	0,81	13,06	720
11:30	16,31	0,88	14,49	770
12:00	16,46	0,92	15,13	800
12:30	16,57	0,93	15,76	825
13:00	17,94	0,88	15,73	815
13:30	14,40	0,96	13,77	785
14:00	14,84	0,85	12,56	725
14:30	14,21	0,85	12,04	650
15:00	15,36	0,73	11,14	560
15:30	16,20	0,65	10,50	455
16:00	13,23	0,66	8,77	325
16:30	12,45	0,51	6,41	210
17:00	12,38	0,42	5,18	85
Rata-rata	15,36	0,76	11,87	526,57

Berdasarkan Tabel 4, daya rata-rata yang dihasilkan panel dalam kondisi bersih adalah 11,87 W dengan iradiasi rata-rata 526,57 W/m². Nilai ini dijadikan acuan untuk membandingkan kinerja panel saat diberi perlakuan polutan. Grafik variasi daya panel dalam kondisi bersih ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik Variasi Daya (W) PV terhadap Waktu pada Kondisi Bersih

Grafik menunjukkan pola peningkatan daya seiring bertambahnya intensitas cahaya, kemudian menurun kembali pada sore hari. Hal ini menegaskan bahwa kondisi bersih menghasilkan performa optimal.

Hasil Pengujian PV dengan Polutan Debu Hasil Pembakaran

Selanjutnya, panel surya diuji dengan polutan berupa debu hasil pembakaran sebanyak 3 gram dan 5 gram. Data hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Hasil Pengukuran pada PV dalam Kondisi Terpapar Polutan Debu Hasil Pembakaran 3 gram

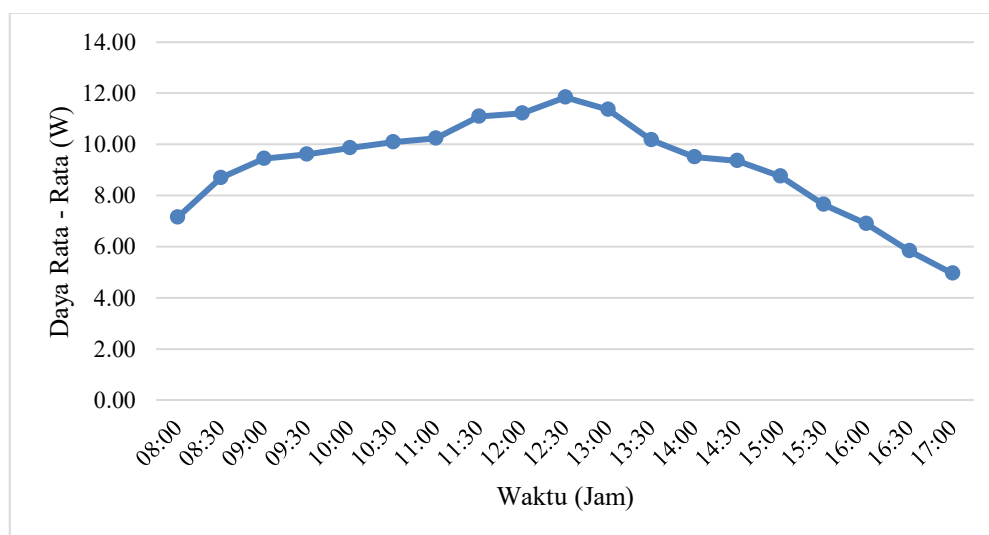
Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Iradiasi (W/m ²)
08:00	14,20	0,50	7,16	75
08:30	13,24	0,66	8,69	205
09:00	12,93	0,73	9,44	320
09:30	13,07	0,73	9,60	440
10:00	13,18	0,75	9,86	540
10:30	13,19	0,77	10,10	630
11:00	13,18	0,78	10,24	690
11:30	13,17	0,84	11,10	745
12:00	13,19	0,85	11,21	795
12:30	13,36	0,89	11,84	795
13:00	13,46	0,84	11,36	785
13:30	13,62	0,75	10,17	760
14:00	13,75	0,69	9,50	705
14:30	13,98	0,67	9,37	625
15:00	14,02	0,62	8,75	535
15:30	14,01	0,55	7,65	450
16:00	13,92	0,49	6,89	330
16:30	13,96	0,42	5,83	190
17:00	14,14	0,35	4,95	85

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Iradiasi (W/m ²)
Rata-rata	14,20	0,50	7,16	510,52

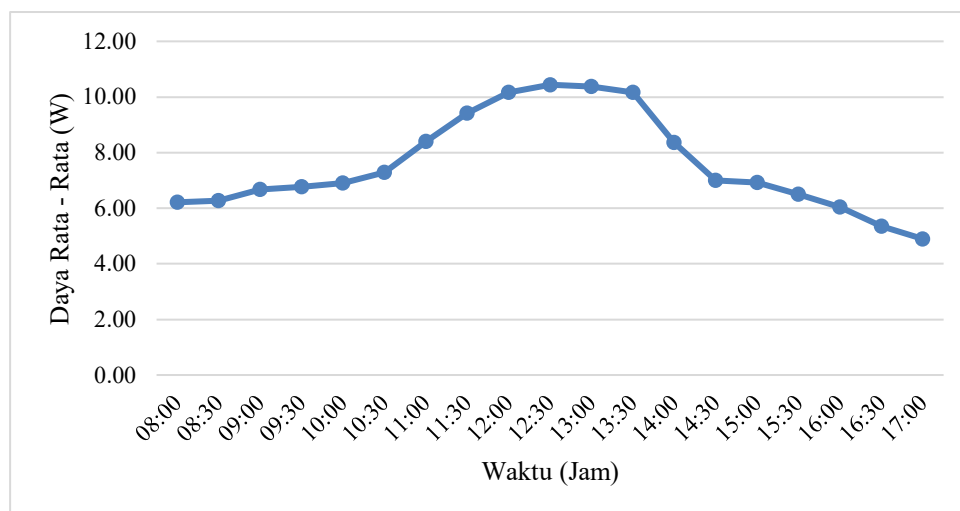
Tabel 6. Hasil Pengukuran pada PV dalam Kondisi Terpapar Polutan Debu Hasil Pembakaran 5 gram

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Iradiasi (W/m ²)
08:00	12,66	0,49	6,20	70
08:30	12,86	0,49	6,27	185
09:00	13,34	0,50	6,67	310
09:30	13,50	0,50	6,76	425
10:00	13,60	0,51	6,90	530
10:30	13,58	0,54	7,30	625
11:00	13,80	0,61	8,40	685
11:30	13,85	0,68	9,42	735
12:00	13,80	0,74	10,16	759
12:30	13,78	0,76	10,44	770
13:00	13,58	0,76	10,38	747
13:30	13,40	0,76	10,16	730
14:00	13,07	0,64	8,35	680
14:30	12,91	0,54	7,00	630
15:00	13,16	0,52	6,91	540
15:30	13,39	0,49	6,51	435
16:00	13,59	0,44	6,05	320
16:30	13,64	0,39	5,34	200
17:00	13,75	0,36	4,89	70
Rata-rata	13,44	0,56	7,58	497,15

Dari tabel terlihat bahwa daya rata-rata menurun menjadi 9,14 W pada polutan 3 g dan 8,72 W pada polutan 5 g. Efisiensi relatif masing-masing tercatat 77% dan 73% dibanding kondisi bersih. Grafik penurunan daya ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Grafik Variasi Daya (W) PV terhadap Waktu Kondisi terpapar Polutan Hasil Pembakaran 3g



Gambar 3. Grafik Variasi Daya (W) PV terhadap Waktu Kondisi terpapar Polutan Hasil Pembakaran 5g

Penurunan efisiensi ini menunjukkan bahwa semakin besar polutan yang menempel, semakin berkurang daya yang dihasilkan oleh panel surya.

Hasil Pengujian PV dengan Polutan Jelaga Karbon

Jenis polutan berikutnya adalah jelaga karbon dengan variasi 3 gram dan 5 gram. Data pengukuran ditunjukkan pada Tabel 7 dan Tabel 8.

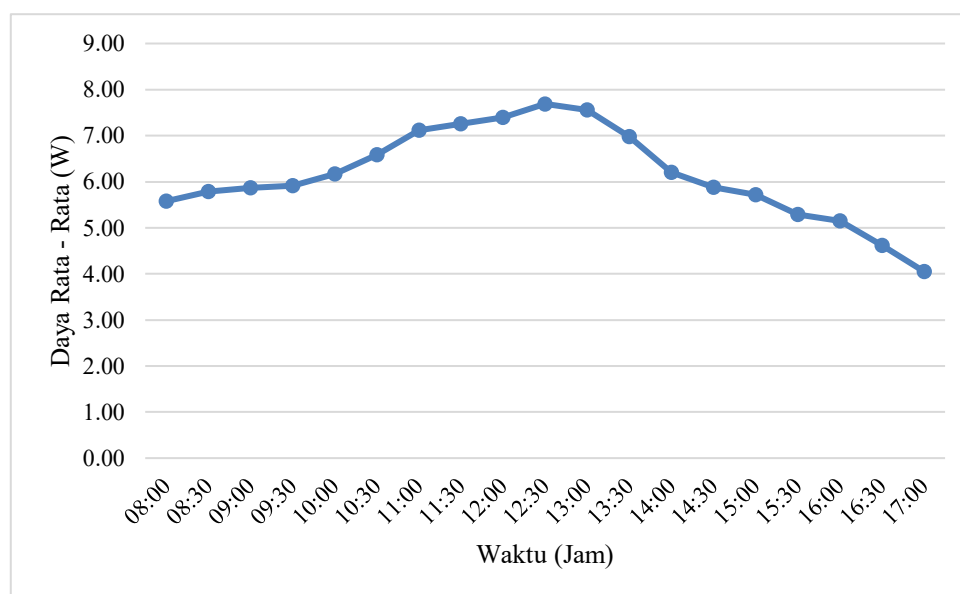
Tabel 7. Hasil Pengukuran pada PV dalam Kondisi Terpapar Polutan Jelaga Karbon 3 gram

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Iradiasi (W/m ²)
08:00	12,50	0,45	5,58	75
08:30	12,49	0,46	5,78	190
09:00	12,52	0,47	5,86	315
09:30	12,55	0,47	5,92	405
10:00	12,58	0,49	6,17	500
10:30	12,59	0,52	6,59	600
11:00	12,63	0,56	7,12	660
11:30	12,71	0,57	7,25	725
12:00	12,79	0,58	7,39	750
12:30	12,95	0,59	7,69	755
13:00	13,58	0,56	7,56	730
13:30	13,40	0,52	6,98	710
14:00	13,07	0,47	6,20	665
14:30	12,91	0,46	5,88	590
15:00	13,16	0,43	5,72	515
15:30	13,39	0,39	5,28	415
16:00	13,59	0,38	5,15	300
16:30	13,64	0,34	4,61	185
17:00	13,75	0,29	4,05	80
Rata-rata	12,99	0,47	6,15	482,36

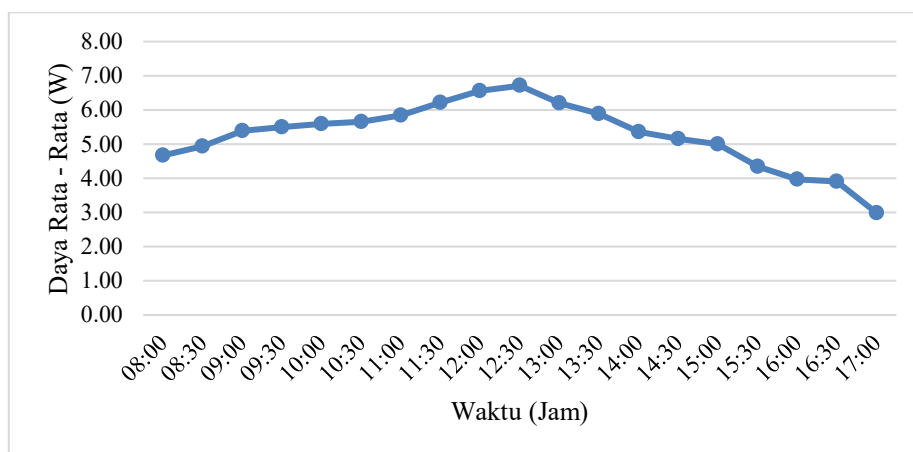
Tabel 8. Hasil Pengukuran pada PV dalam Kondisi Terpapar Polutan Jelaga Karbon 5 gram

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Iradiasi (W/m ²)
08:00	12,89	0,36	4,67	65
08:30	12,60	0,39	4,94	190
09:00	12,57	0,43	5,39	295
09:30	12,56	0,44	5,50	400
10:00	12,52	0,45	5,59	500
10:30	12,52	0,45	5,66	580
11:00	12,49	0,47	5,84	650
11:30	12,47	0,50	6,22	695
12:00	12,46	0,53	6,56	720
12:30	12,46	0,54	6,71	740
13:00	12,45	0,50	6,20	735
13:30	12,44	0,47	5,88	710
14:00	12,47	0,43	5,36	640
14:30	12,40	0,42	5,15	585
15:00	12,42	0,40	5,00	500
15:30	12,44	0,35	4,34	405
16:00	12,38	0,32	3,97	300
16:30	12,45	0,31	3,91	195
17:00	12,38	0,24	2,99	75
Rata-rata	12,49	0,42	5,26	472,63

Pada kondisi 3 g, daya rata-rata turun menjadi 7,84 W, sedangkan pada kondisi 5 g hanya sebesar 5,26 W. Efisiensi relatifnya masing-masing 66,07% dan 44,31%. Grafik perbandingan daya ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Variasi Daya (W) PV terhadap Waktu Kondisi terpapar Polutan Jelaga Karbon 3g



Gambar 5. Variasi Daya (W) PV terhadap Waktu Kondisi terpapar Polutan Jelaga Karbon 5g

Hasil ini memperlihatkan bahwa jelaga karbon memberikan dampak paling signifikan terhadap penurunan efisiensi panel surya dibandingkan polutan lainnya.

Hasil Pengujian PV dengan Polutan Basah

Pengujian terakhir dilakukan dengan menambahkan polutan basah berupa pupuk tanaman yang dicampur air dan diaplikasikan pada 3 titik (9 g) serta 5 titik (15 g). Data pengukuran ditunjukkan pada Tabel 9 dan Tabel 10.

Tabel 9. Hasil Pengukuran pada PV dalam Kondisi Terpapar Polutan Basah 3 titik

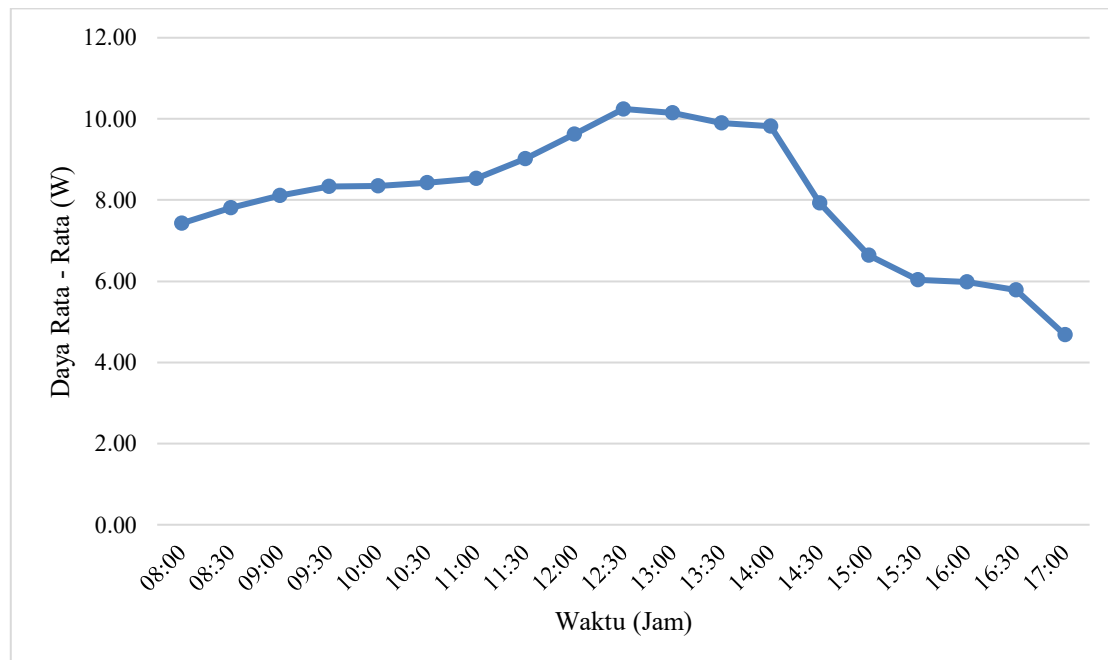
Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Iradiasi (W/m ²)
08:00	12,63	0,59	7,43	70
08:30	12,83	0,61	7,80	200
09:00	12,81	0,63	8,11	320
09:30	12,91	0,65	8,33	425
10:00	12,93	0,65	8,35	535
10:30	12,99	0,65	8,42	620
11:00	13,03	0,65	8,53	700
11:30	13,06	0,69	9,01	745
12:00	13,12	0,73	9,63	780
12:30	13,08	0,78	10,25	760
13:00	13,23	0,77	10,15	765
13:30	13,27	0,75	9,90	745
14:00	13,16	0,75	9,82	695
14:30	12,94	0,61	7,93	625
15:00	12,57	0,53	6,63	525
15:30	12,57	0,48	6,04	430
16:00	12,51	0,48	5,98	300
16:30	12,40	0,47	5,78	195
17:00	12,37	0,38	4,68	75
Rata-rata	12,86	0,62	8,04	500,52

Tabel 10. Hasil Pengukuran pada PV dalam Kondisi Terpapar Polutan Basah 5 titik

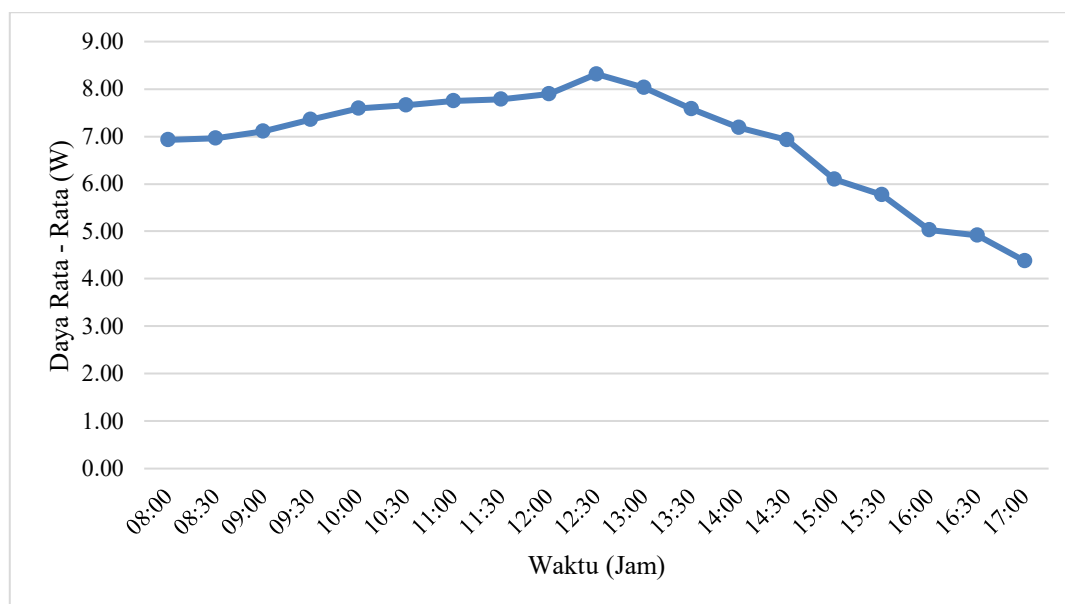
Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Iradiasi (W/m ²)
08:00	12,25	0,57	6,93	80
08:30	12,02	0,58	6,96	200

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Iradiasi (W/m ²)
09:00	12,01	0,59	7,11	305
09:30	12,02	0,61	7,35	430
10:00	12,01	0,63	7,59	510
10:30	12,00	0,64	7,66	610
11:00	11,98	0,65	7,74	670
11:30	12,27	0,63	7,79	735
12:00	12,37	0,64	7,89	750
12:30	12,39	0,67	8,32	765
13:00	12,37	0,65	8,03	760
13:30	12,27	0,62	7,58	720
14:00	12,31	0,58	7,19	670
14:30	12,36	0,56	6,93	600
15:00	12,33	0,49	6,09	520
15:30	12,32	0,47	5,77	425
16:00	12,37	0,41	5,03	310
16:30	12,40	0,40	4,92	195
17:00	12,37	0,35	4,37	70
Rata-rata	12,23	0,57	6,91	490,78

Daya rata-rata yang dihasilkan panel pada kondisi 3 titik adalah 8,04 W dengan efisiensi 67,73%, sedangkan pada kondisi 5 titik daya rata-rata 7,63 W dengan efisiensi 64,30%. Grafik hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Variasi Daya (W) PV terhadap Waktu Kondisi terpapar Polutan Basah 3 titik

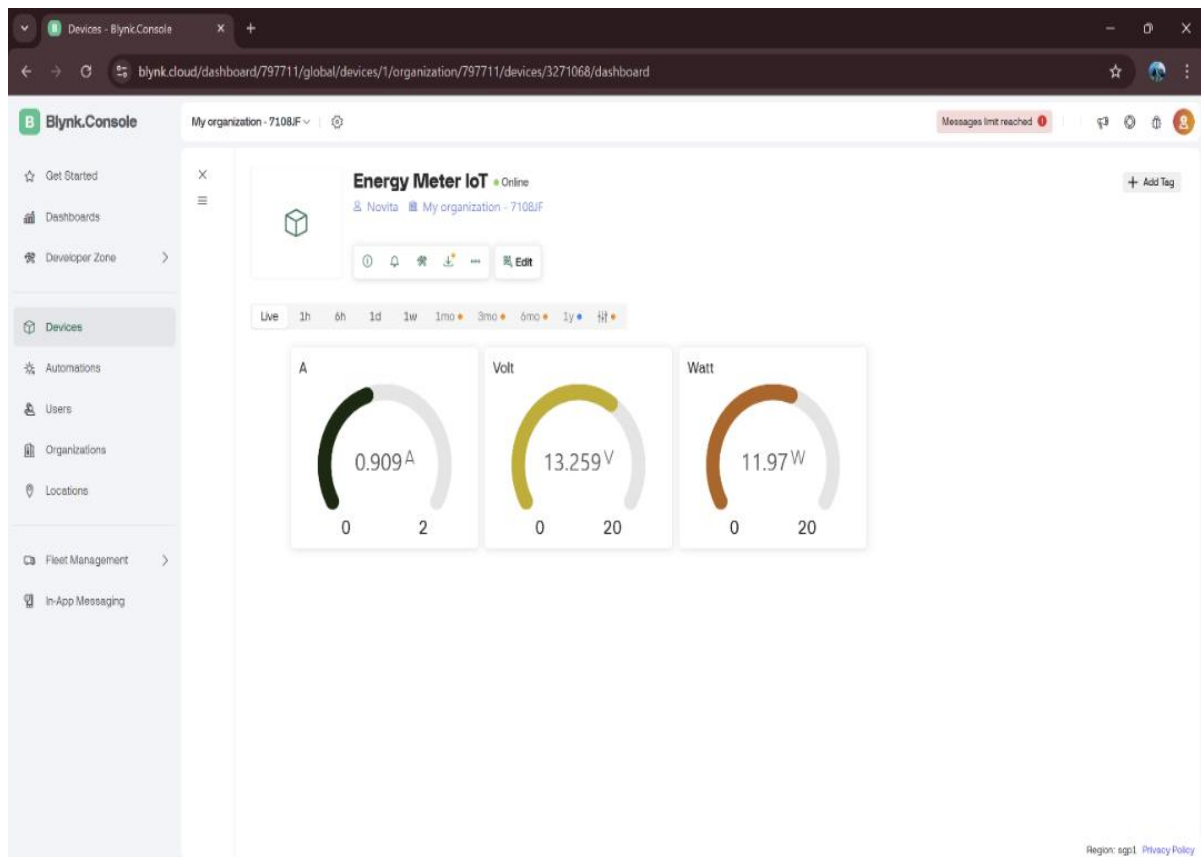


Gambar 7. Variasi Daya (W) PV terhadap Waktu Kondisi terpapar Polutan Basah 5 titik

Hasil ini menunjukkan bahwa polutan basah juga menurunkan daya keluaran panel, meskipun penurunannya tidak sebesar polutan jelaga karbon.

Hasil Implementasi dan Pemantauan PV dengan Sistem IoT

Untuk mengamati kinerja PV selama pengujian pada berbagai kondisi paparan polutan, di sini digunakan sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem ini terdiri dari komponen utama seperti ESP32 sebagai mikrokontroler pengendali, sensor INA219 yang mengukur arus, tegangan dan daya PV, dan mini560 *step-down converter* yang menurunkan tegangan PV untuk memenuhi kebutuhan ESP32 dan sensor. Untuk memungkinkan pengukuran parameter secara langsung, sensor INA219 ditempatkan pada jalur *output* panel surya. ESP32 bertindak sebagai pusat kontrol dan mengumpulkan data dari INA219 dan mengirimkannya ke dua *platform* pemantauan, *Blynk* dan *Spreadsheet*, melalui jaringan *Wi-Fi*. Penggunaan ESP32 ideal untuk sistem pemantauan *real-time* berbasis IoT karena memiliki konektivitas *Wi-Fi* bawaan, pemrosesan cepat dan kapasitas memori besar. Kemudian dengan konsumsi daya yang rendah dan komunikasi I2C yang efisien, INA219 memiliki kemampuan untuk mengukur tegangan, arus dan daya secara akurat dalam satu chip. Dan untuk Mini 560 *Step-down Converter* memiliki efisiensi tinggi dan bentuk yang ringkas untuk menstabilkan tegangan PV ke level yang aman untuk ESP32.



Gambar 8. Tampilan Dashboard Blynk sebagai Pemantauan PV

Selain menampilkan data secara *real-time* melalui aplikasi Blynk, sistem monitoring ini juga mengirim dan menyimpan data arus, tegangan, dan daya secara otomatis ke Google *Spreadsheet*. Proses pencatatan berbasis *cloud* ini memungkinkan data terdokumentasi secara kronologis tanpa pencatatan manual, sehingga meminimalkan kesalahan dan mempermudah analisis lebih lanjut. Keunggulan sistem ini terletak pada kemampuannya mencatat data secara konsisten dan dapat diakses kapan saja, memungkinkan peneliti memantau performa panel surya terhadap pengaruh polutan secara efisien. Berikut ditampilkan hasil pencatatan data otomatis dari sistem monitoring ke dalam Google *Spreadsheet*.

	A	B	C	D
8645	13,33211	0,6808	9,034	
8646	13,33089	0,6686	8,868	
8647	13,32969	0,6568	8,714	
8648	13,3284	0,644	8,54	
8649	13,31911	0,6314	8,366	
8650	13,31766	0,6169	8,18	
8651	13,32434	0,603	8,006	
8652	13,30649	0,5844	7,746	
8653	13,31058	0,5858	7,766	
8654	13,3147	0,5869	7,78	
8655	13,3108	0,5882	7,79	
8656	13,31105	0,5903	7,826	
8657	13,31148	0,5949	7,884	
8658	13,3083	0,6031	7,992	
8659	13,29645	0,565	7,484	
8660	13,31937	0,6333	8,396	
8661	13,32962	0,6558	8,7	
8662	13,3485	0,6851	9,104	
8663	13,36434	0,7236	9,618	
8664	13,36664	0,746	9,92	
8665	13,37619	0,7628	10,152	
8666	13,39737	0,7739	10,302	
8667	13,39826	0,7825	10,424	
8668	13,41194	0,7993	10,654	
8669	13,41983	0,7986	10,644	
8670	13,41281	0,8081	10,778	
8671	13,41719	0,8118	10,82	
8672	13,4224	0,8244	10,998	
8673	13,43045	0,8248	11,006	
8674	13,43072	0,8175	10,912	

Gambar 9. Tampilan Google Spreadsheet Log Data Sensor

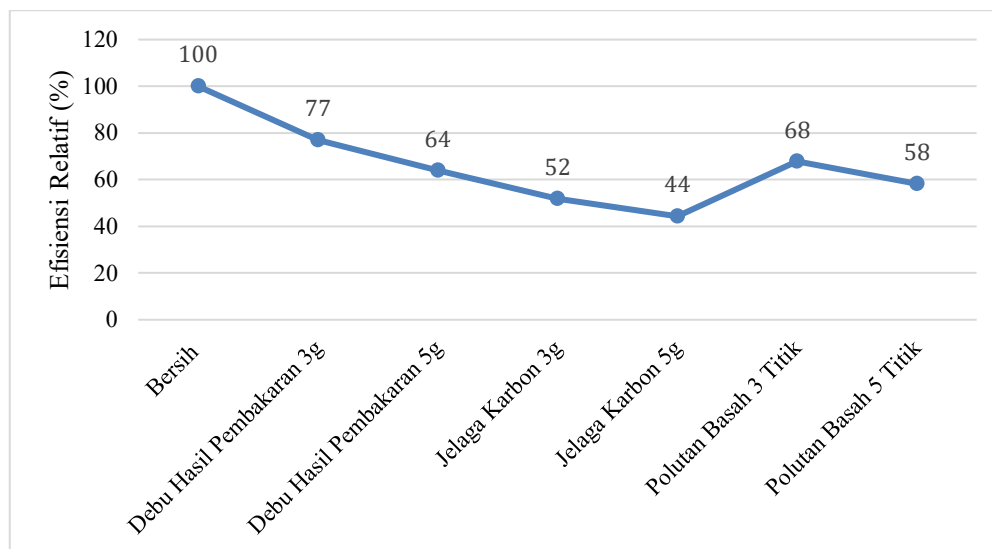
Perbandingan Efisiensi Relatif

Rekapitulasi daya rata-rata dan efisiensi relatif panel surya pada berbagai kondisi disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Efisiensi Relatif Keluaran PV

No.	Kondisi	Daya (W)	Efisien Relatif (%)
1.	Bersih (Tanpa Polutan)	11,87	100
2.	Debu Hasil Pembakaran 3g	9,14	77
3.	Debu Hasil Pembakaran 5g	7,58	63,85
4.	Debu Jelaga Karbon 3g	6,15	51,81
5.	Debu Jelaga Karbon 5g	5,26	44,31
6.	Polutan Basah 3 Titik	8,04	67,73
7.	Polutan Basah 5 Titik	6,91	58,21

Dari Tabel 11 terlihat bahwa urutan penurunan efisiensi dimulai dari kondisi bersih (100%), debu hasil pembakaran (77%-73%), polutan basah (67,73%-64,30%), hingga yang terendah pada jelaga karbon (66,07%-44,31%). Grafik perbandingan efisiensi ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Perbandingan Efisiensi Relatif PV pada Kondisi Tanpa dan Dengan Paparan Polutan

Temuan ini menegaskan bahwa jenis polutan memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja panel surya, dengan jelaga karbon sebagai faktor yang paling merugikan.

Pembahasan

1. Analisis Daya Keluaran PV pada Kondisi Bersih

Pengujian awal menunjukkan bahwa panel surya dalam kondisi bersih menghasilkan daya rata-rata 11,87 W dengan iradiasi 526,57 W/m². Nilai ini menjadi acuan dasar untuk menilai dampak polutan terhadap performa panel. Grafik variasi daya memperlihatkan pola yang konsisten dengan perubahan intensitas matahari sepanjang hari, di mana daya tertinggi dicapai pada siang hari dan menurun kembali saat sore. Kondisi ini menegaskan bahwa tanpa adanya polutan, panel surya mampu bekerja optimal dan mendekati kapasitas maksimumnya. Pada konteks PLTS skala besar, temuan ini mengindikasikan potensi maksimal energi surya dapat benar-benar dioptimalkan apabila panel terjaga dari hambatan eksternal, sehingga pasokan energi listrik yang stabil dan berkelanjutan dapat dicapai.

2. Dampak Polutan Debu Hasil Pembakaran

Hasil pengujian dengan polutan debu menunjukkan adanya penurunan daya rata-rata sebesar 22–27% dibanding kondisi bersih. Penurunan ini terjadi karena debu hasil pembakaran menutupi sebagian permukaan panel sehingga menghambat penyerapan foton. Semakin besar jumlah debu, semakin besar pula penurunan daya yang dihasilkan. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa akumulasi polutan kering secara signifikan mengurangi efisiensi panel surya melalui blocking effect pada cahaya yang masuk. Dalam konteks PLTS skala besar, akumulasi debu dalam jumlah luas dapat berimplikasi pada kehilangan daya yang signifikan dan menurunkan keandalan sistem. Oleh karena itu, strategi pemeliharaan dan pembersihan panel secara berkala merupakan faktor penting dalam menjaga keberlanjutan energi dari pembangkit tenaga surya.

3. Dampak Polutan Jelaga Karbon

Jenis polutan jelaga karbon terbukti memberikan dampak paling merugikan terhadap kinerja panel. Pada dosis 5 g, daya rata-rata turun drastis hingga hanya 5,26 W dengan efisiensi 44,31%. Jelaga karbon memiliki sifat lebih pekat dan mampu menyerap cahaya, sehingga intensitas cahaya yang diteruskan ke permukaan sel surya menjadi sangat berkurang. Penurunan ini lebih parah dibanding polutan basah maupun debu biasa, yang membuktikan bahwa jenis polutan juga menentukan besarnya penurunan efisiensi panel. Penelitian lain juga menegaskan bahwa jelaga karbon memperburuk performa PV karena sifat optiknya yang menyerap lebih banyak energi radiasi. Pada PLTS skala besar, kondisi ini dapat menjadi ancaman serius terutama di daerah perkotaan atau kawasan industri yang memiliki tingkat emisi tinggi, sehingga perlunya strategi mitigasi berbasis monitoring otomatis menjadi sangat relevan untuk menjaga stabilitas pasokan listrik dari energi surya.

4. Dampak Polutan Basah

Polutan basah yang diaplikasikan dalam bentuk pupuk tanaman dengan 3 titik (9 g) dan 5 titik (15 g) juga menurunkan daya keluaran panel, masing-masing hingga 67,73% dan 64,30% dari kondisi bersih. Meskipun penurunan ini cukup signifikan, hasilnya masih lebih baik dibanding polutan jelaga karbon. Hal ini dapat dijelaskan karena polutan basah hanya menutupi sebagian permukaan panel, dan masih memungkinkan sebagian cahaya masuk melalui bagian yang tidak tertutupi. Dengan demikian, sifat polutan basah lebih pada blocking fisik ketimbang penyerapan energi cahaya. Jika fenomena ini terjadi pada PLTS skala besar, distribusi penurunan daya bisa berbeda-beda antar modul panel, sehingga berpotensi menimbulkan ketidakseimbangan sistem. Oleh sebab itu, sistem monitoring otomatis yang mampu mendeteksi variasi performa antar panel akan sangat membantu dalam menjaga efisiensi total pembangkit.

5. Evaluasi Kinerja Sistem Monitoring IoT

Sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) yang dikembangkan terbukti mampu merekam data tegangan, arus, dan daya secara real-time melalui aplikasi Blynk dan Google Spreadsheet. Keunggulan utama sistem ini bukan hanya pada kemampuannya menampilkan data historis, tetapi juga pada fungsinya dalam mendukung efisiensi energi secara menyeluruh. Dengan adanya IoT, data performa panel yang terpapar polutan dapat dianalisis secara prediktif untuk menentukan waktu pembersihan paling optimal, meminimalisir biaya operasional, serta mengurangi potensi kehilangan energi akibat keterlambatan perawatan. Integrasi IoT pada PLTS skala besar juga membuka peluang penerapan algoritma kecerdasan buatan untuk mengidentifikasi pola penurunan daya, sehingga keputusan operasional tidak lagi reaktif tetapi berbasis prediksi. Dengan demikian, IoT berperan strategis dalam menghubungkan aspek teknis monitoring dengan isu keberlanjutan energi, yakni memastikan bahwa energi surya yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara maksimal, efisien, dan ekonomis.

6. Perbandingan Efisiensi Antar Polutan

Rekapitulasi perbandingan efisiensi menunjukkan urutan penurunan kinerja sebagai berikut: kondisi bersih (100%), polutan debu (77–73%), polutan basah (67–64%), dan yang terendah polutan jelaga karbon (66–44%). Temuan ini mengindikasikan bahwa jenis polutan berperan penting dalam menentukan efektivitas panel surya. Dampak paling merugikan berasal dari jelaga karbon karena sifatnya yang pekat dan menyerap cahaya. Polutan debu dan basah menurunkan kinerja panel, tetapi tidak seberat jelaga karbon. Pada konteks keberlanjutan energi, hasil ini memperlihatkan bahwa faktor lingkungan harus menjadi pertimbangan utama dalam perencanaan dan pengelolaan PLTS. Pemeliharaan berbasis data yang didukung teknologi IoT menjadi langkah strategis untuk mengurangi kerugian energi, meningkatkan efisiensi operasional, serta memastikan kontribusi energi surya dalam transisi menuju energi bersih dapat berlangsung secara optimal dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa polutan yang menempel pada permukaan panel surya berpengaruh signifikan terhadap penurunan daya keluaran dan efisiensi relatif. Panel dalam kondisi bersih menghasilkan daya rata-rata 11,87 W dengan efisiensi 100%. Polutan debu hasil pembakaran menurunkan efisiensi menjadi 77–73%, polutan basah 67–64%, sedangkan penurunan paling drastis terjadi pada jelaga karbon hingga 44%. Hal ini membuktikan bahwa semakin pekat dan menyerap cahaya sifat polutan, semakin besar dampaknya terhadap kinerja panel. Sistem monitoring berbasis IoT terbukti efektif dalam merekam data secara real-time, sehingga memudahkan identifikasi penurunan performa akibat polusi.

Berdasarkan hasil tersebut, disarankan agar pemeliharaan rutin panel surya dilakukan secara berkala, terutama pada area dengan potensi paparan polutan tinggi. Pembersihan panel dari debu, jelaga, maupun polutan basah dapat memperpanjang umur pakai dan menjaga kinerja optimal. Selain itu, pengembangan sistem monitoring berbasis IoT dapat terus ditingkatkan dengan menambahkan fitur notifikasi otomatis ketika terjadi penurunan performa signifikan, sehingga operator dapat segera melakukan tindakan korektif untuk menghindari kerugian energi yang lebih besar.

REFERENSI

- Alombah, N. H., Mungwe, J. N., Harrison, A., Mbasso, W. F., & Fotsin, H. B. (2025). Advanced IoT-based monitoring system for real-time photovoltaic performance evaluation: Conception, development and experimental validation. *Scientific African*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02763>
- Amusan, J. A. (2021). THE EFFECT OF BLACK SOOT ON THE OUTPUT PERFORMANCE OF SOLAR MODULE. *Global Scientific*, 10. www.globalscientificjournal.com
- Corio, D., Ramadian, A., Sahlendar Asthan, R., & Maria Ulfah, M. (2020). Comparison of Solar Tracking and Solar Fix Mode on the Efficiency Electric Energy Generation Based on Microcontroller. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 537(1), 1. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/537/1/012030>

- Halim, L., & Oetomo. (2020). PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI AWAL SOLAR INVERTER UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA OFF GRID. *Jurnal Teknologi, Universitas Muhammadiyah Jakarta*, 12(1), 31–38. <https://doi.org/10.24853/jurtek.12.1.31-38>
- Inayah, I., Hayati, N., Nurcholis, A., Dimyati, A., & Prasetia, M. G. (2023). Realtime Monitoring System of Solar Panel Performance Based on Internet of Things Using Blynk Application. *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, 7(2), 135–143. <https://doi.org/10.21831/elinvo.v7i2.53365>
- Joisman Edas, F., & Ahmad Baihaqi, M. (2024). Jurnal INTRO (Informatika dan Teknik Elektro) Pengelolaan Daya pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya dengan SCADA untuk Monitoring dan Kontrol Jarak Jauh. In *Jurnal INTRO* (Vol. 3, Issue 1). <https://ejournal.upm.ac.id/index.php/intro>
- Koerniawan, T., Aas,) ;, Hasanah, W., Elektro, T., & Tinggi Teknik -Pln, S. (2018). KAJIAN SISTEM KINERJA PLTS OFF-GRID 1 kWp DI STT-PLN. *ENERGI & KELISTRIKAN*, 10(1), 1–93.
- Kurniawan, I., Ichwani, R., Fionasari, R., Batubara, A., & Huda, A. (2022). Indonesia's Renewable Energy Outlook: What to Expect in The Future Renewable Energy of Indonesia. A Brief Review. *Elkawanie*, 8(2), 298. <https://doi.org/10.22373/ekw.v8i2.18738>
- Rajeshkumar, G., Rajesh Kanna, P., Sriram, S., Sades, S., Karunamoorthi, R., & Mahudapathi, P. (2023). Home Automation System Using Nodemcu (ESP8266). *Proceedings of International Conference on Advanced Communications and Machine Intelligence*, 293–302. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2768-5_28
- Rashid, M., Yousif, M., Rashid, Z., Muhammad, A., Altaf, M., & Mustafa, A. (2023). Effect of dust accumulation on the performance of photovoltaic modules for different climate regions. *Heliyon*, 9(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23069>
- Syaukani, I. (2024). Simulasi Perancangan PLTS On-Grid untuk Meningkatkan. *Renewable Energy Technologies Journal*, 2(4), 22–31.
- Talawo, D. C. P., Ilham, J., & Amali, L. M. K. (2022). Pengaruh Polutan pada Permukaan Panel Surya Terhadap Kinerja Panel Surya Kapasitas 10 Wp. *Jambura Industrial Review*, 2(1), 8. <https://doi.org/10.37905/jirev.2.1.31-38>
- Wasri Hasanah, A., Koerniawan, T., Elektro, T., & Tinggi Teknik -PLN, S. (2018). KAJIAN KUALITAS DAYA LISTRIK PLTS SISTEM OFF-GRID DI STT-PLN. *JURNAL ENERGI & KELISTRIKAN*, 10(2).
- Yudho, S. (2021). Aplikasi Monitoring Energi SHS Off-Grid Menggunakan Lora. *ENERGI & KELISTRIKAN*, 13(1), 26–32. <https://doi.org/10.33322/energi.v13i1.1149>
- Yudho, S., Koerniawan, T., Hasanah, A. W., Qosim, M. N., Sirait, R., Gifson, A., & Mangapul, J. (2025). Cloud-Based PLTS Technology Education at SMAN 7 South Tangerang. *DINAMISIA*, 9(3), 824–834. <https://doi.org/10.31849/dinamisia.v9i3.23950>