

Sistem *Monitoring IoT* untuk Menganalisis Pengaruh Suhu, Kelembapan, dan Intensitas Cahaya terhadap Performa PLTS

1st Syachrani Nur Annisa
School of Computing
Telkom University
Bandung, Indonesia

syachraninurannisa@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Dr. Farah Afianti, S.T., M.T.
School of Computing
Telkom University
Bandung, Indonesia

farahafi@telkomuniversity.ac.id

3rd Abdullah Hanifan, S.Kom., M.Kom.
School of Computing
Telkom University
Bandung, Indonesia

abdullahhanifanah@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Kinerja pembangkit listrik tenaga surya dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya, yang dapat menyebabkan fluktuasi daya listrik. Penurunan performa akibat kondisi tersebut dapat menghambat pemanfaatan energi surya secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem monitoring berbasis *Internet of Things (IoT)* untuk memantau parameter lingkungan dan menganalisis pengaruhnya terhadap kinerja sistem. Sistem dibangun menggunakan mikrokontroler serta sensor suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya, dengan data yang divisualisasikan melalui antarmuka web, serta notifikasi peringatan dini melalui Bot Telegram. Hasil penelitian menunjukkan bahwa intensitas cahaya sangat memengaruhi daya keluaran, sementara suhu tinggi cenderung menurunkan efisiensi. Kelembapan menunjukkan pengaruh terhadap daya, namun tidak secara langsung memengaruhi efisiensi panel. Daya maksimum sebesar 2232 W tercapai pada iradiasi 431,4 W/m², suhu 35,81°C, dan kelembapan 26,5%, dengan efisiensi 24,7%. Sedangkan daya minimum sebesar 318 W terjadi saat iradiasi 54,2 W/m², suhu 31,25°C, dan kelembapan 57,7%, dengan efisiensi 28%.

Kata kunci— Sistem *Monitoring, IoT, Suhu, Kelembapan, Intensitas Cahaya, PLTS*

I. PENDAHULUAN

Penurunan cadangan bahan bakar fosil dan peningkatan masalah emisi karbon telah mendorong peralihan dari sistem energi konvensional ke energi terbarukan. Terlebih lagi, tuntutan terhadap keamanan energi dan stabilitas ekonomi semakin meningkat, sehingga fokusnya lebih diarahkan pada pengembangan energi terbarukan[1]. Energi fotovoltaik dipandang sebagai opsi yang ramah lingkungan karena dapat menghasilkan tenaga listrik tanpa mengeluarkan emisi gas rumah kaca atau bahan pencemar berbahaya. Energi fotovoltaik memainkan peran penting dalam mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂) untuk mendukung upaya global dalam melawan pemanasan global. Dengan keunggulan yang dimilikinya, energi fotovoltaik menawarkan potensi untuk menyediakan listrik secara terdesentralisasi, mencapai netralitas karbon, dan mengurangi dampak lingkungan dari produksi listrik[2].

Meskipun demikian, modul fotovoltaik sangat rentan terhadap pengaruh kondisi lingkungan eksternal yang terus berubah. Faktor-faktor seperti fluktuasi suhu, kelembapan, variasi intensitas cahaya matahari, dan perubahan tekanan atmosfer dapat menyebabkan penurunan efisiensi modul serta efektivitas sistem PLTS[3]. Jika tidak ada upaya untuk mengatasi masalah ini, penurunan kinerja tersebut dapat menghambat pemanfaatan optimal dari energi surya sebagai sumber energi terbarukan, menurunkan keandalan pasokan listrik dari PLTS, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi stabilitas energi.

Berbagai penelitian sebelumnya menyebutkan kinerja modul fotovoltaik menurun saat suhu modul tinggi karena panas berlebih mengurangi efisiensi konversi energi. Intensitas radiasi matahari yang tinggi meningkatkan produksi energi, sedangkan penurunan radiasi mengurangi daya yang dihasilkan. Kelembapan relatif yang tinggi berdampak langsung terhadap penurunan intensitas cahaya yang diterima oleh permukaan modul fotovoltaik, sehingga menyebabkan penurunan tegangan keluaran dan mengurangi daya listrik yang dihasilkan[4][5].

Untuk mengatasi pengaruh eksternal yang menyebabkan penurunan kinerja dari modul fotovoltaik maka pada penelitian ini, diterapkan penggunaan *IoT* untuk teknologi desain sistem *monitoring* modul fotovoltaik yang memiliki kemampuan untuk melacak berbagai parameter seperti suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya. Penelitian ini akan memanfaatkan konsep *IoT* untuk membuat sistem *monitoring* berbasis website menggunakan sensor suhu, kelembapan dan intensitas cahaya untuk mengumpulkan data yang akan digunakan sebagai acuan analisis terhadap performa PLTS.

II. KAJIAN TEORI

A. Monitoring

Monitoring adalah kegiatan rutin untuk mengumpulkan data dan mengukur kemajuan suatu program, dengan fokus pada proses dan hasil. Tujuan *monitoring* adalah memberikan informasi tentang kondisi atau perkembangan untuk mengevaluasi dan menyesuaikan kebutuhan sehingga program dapat berjalan lebih efisien dan mencapai targetnya[6].

B. Internet of Things

Internet Of Things merupakan konsep teknologi yang merujuk pada perangkat fisik yang saling terhubung melalui internet, Teknologi ini memungkinkan perangkat fisik tersebut dapat melakukan pengumpulan, berbagi hingga bertukar data otomatis, Konsep *IoT* ini sendiri mencakup berbagai jenis perangkat seperti sensor, aktuator, hingga perangkat pintar yang dapat berkomunikasi satu sama lain tanpa memerlukan campur tangan manusia[7].

C. Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem pembangkit listrik yang mengubah energi dari sinar matahari menjadi energi listrik, PLTS berjalan dengan menggunakan panel surya (PV) untuk menangkap cahaya matahari kemudian di konversi menjadi arus listrik melalui konversi fotovoltaik, Energi yang dihasilkan dari PLTS dapat langsung digunakan atau disimpan melalui sistem penyimpanan seperti battery, PLTS merupakan salah satu inovasi energi terbarukan yang ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca atau polusi dan juga tidak menggunakan bahan bakar untuk pengoperasiannya.

D. Panel Surya

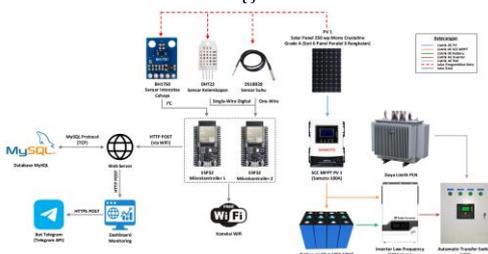
Panel surya atau modul fotovoltaik adalah susunan dari sel-sel surya yang menjadi komponen sentral dalam sistem PLTS untuk melakukan konversi energi cahaya menjadi energi listrik. Efisiensi dan performa panel surya menjadi faktor penentu utama dalam total produksi energi sebuah sistem dan dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal seperti tingkat iradiasi, suhu operasional, dan kondisi cuaca. Batas teoritis tertinggi efisiensi sel surya silikon tunggal adalah sekitar 33% menurut konsep Shockley-Queisser. Modul monokristalin komersial umumnya memiliki efisiensi rata-rata di kisaran 19–21%, dengan produk terbaik di pasaran mampu mencapai sekitar 22–23%, sedangkan rekor tertinggi di laboratorium dapat menembus 25%. Oleh karena itu, untuk modul komersial, efisiensi $\geq 20\%$ dapat digolongkan sebagai kategori *high-efficiency*[8].

E. Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah unit pemrosesan utama dalam sistem embedded yang dirancang untuk mengontrol perangkat eksternal. Mikrokontroler berfungsi untuk memantau data yang diperoleh dari sensor dan mengolahnya untuk menghasilkan sinyal kendali yang digunakan untuk mengaktifkan perangkat seperti LED, relai, atau motor servo. Sebagai inti dari sistem embedded, mikrokontroler tidak hanya bertanggung jawab dalam pemrosesan data, tetapi juga dalam komunikasi antar perangkat untuk memastikan sistem berfungsi secara efisien sesuai dengan fungsi yang dirancang[9].

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Arsitektur Sistem Monitoring



Gambar 1 Arsitektur Sistem Monitoring

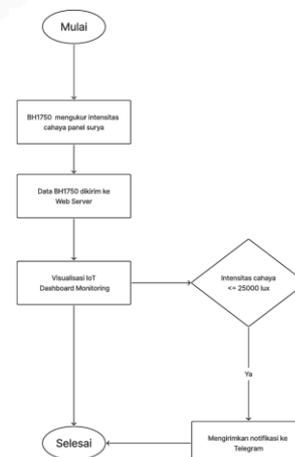
Arsitektur sistem monitoring merupakan representasi skematik yang menggambarkan komponen utama sistem monitoring. Sensor BH1750, DHT22, dan DS18B20 terhubung ke mikrokontroler ESP32 untuk mengakuisisi data intensitas cahaya, kelembaban, dan suhu. Data kemudian dikirim melalui koneksi WiFi ke web server menggunakan protokol HTTP POST, disimpan pada database MySQL, dan ditampilkan pada dashboard monitoring serta pengiriman notifikasi melalui bot Telegram.

B. Flowchart Pengiriman Notifikasi Bot Telegram



Gambar 2 Monitoring Suhu dan Kelembapan Panel Surya

Sensor DS18B20 untuk mengukur suhu panel surya, serta dari sensor DHT22 untuk mengukur tingkat kelembapan panel surya. Berdasarkan penelitian sebelumnya, bahwa Pada suhu di atas 25°C, efisiensi panel cenderung menurun karena peningkatan resistansi dalam sel fotovoltaik sehingga mengurangi kinerja jangka pendek[10] dan kelembapan yang sangat tinggi (di atas 80%) dapat menyebabkan penumpukan kondensasi atau korosi pada komponen panel surya dan mengurangi kinerja jangka panjang[11]. Apabila suhu lingkungan dan tingkat kelembapan panel surya berada di luar batas yang ditetapkan, yaitu suhu diatas 50°C dan tingkat kelembapan diatas 80%, maka sistem akan mengirimkan notifikasi ke telegram bahwa terjadi penurunan efisiensi kinerja panel surya. Data yang diukur oleh sensor ini juga dikirim ke layanan cloud (Web Server) untuk memberikan akses kepada pengguna untuk memantau kondisi lingkungan panel surya dari jarak jauh dan analisis lebih lanjut.



Gambar 3 Monitoring Intensitas Cahaya Panel Surya

Sensor BH1750 untuk mengukur tingkat intensitas cahaya panel surya. Pada intensitas cahaya sekitar hampir 1000 W/m² atau 120.000 lux, yang setara dengan sinar matahari langsung di siang hari pada kondisi cerah, panel akan mencapai efisiensi maksimal dalam mengkonversi cahaya menjadi energi listrik. Ketika intensitas cahaya lebih rendah, seperti pada cuaca mendung atau saat matahari terbenam, efisiensi konversi energi akan menurun, tetapi panel surya masih bisa menghasilkan listrik meskipun dengan daya yang lebih rendah [12]. Apabila tingkat intensitas cahaya panel surya berada di luar batas yang ditetapkan, yaitu tingkat intensitas cahaya di bawah 200 W/m² atau 25.000 lux, maka sistem akan mengirimkan notifikasi ke Telegram bahwa terjadi penurunan efisiensi kinerja panel surya. Data yang diukur oleh sensor ini juga dikirim ke layanan cloud (Web Server) untuk memberikan akses kepada pengguna untuk memantau kondisi lingkungan panel surya dari jarak jauh serta melakukan analisis lebih lanjut

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Parameter Lingkungan

1	id	tanggal	waktu	lux
7981	16220	6/9/2025	17:16:53	6101.5
7982	16221	6/9/2025	17:17:03	6098.13
7983	16222	6/9/2025	17:17:08	6094.76
7984	16223	6/9/2025	17:17:21	6091.39
7985	16224	6/9/2025	17:17:21	6088.02
7986	16225	6/9/2025	17:17:29	6084.65
7987	16226	6/9/2025	17:17:38	6081.28
7988	16227	6/9/2025	17:17:57	6077.91
7989	16228	6/9/2025	17:17:57	6074.54
7990	16229	6/9/2025	17:18:07	6071.17
7991	16230	6/9/2025	17:18:22	6067.8
7992	16231	6/9/2025	17:18:22	6064.43
7993	16232	6/9/2025	17:18:23	6061.06
7994	16233	6/9/2025	17:18:38	6057.69
7995	16234	6/9/2025	17:18:44	6054.32
7996	16235	6/9/2025	17:18:44	6050.95

Gambar 4 Data Hasil Pengukuran Intensitas Cahaya Panel Surya

Gambar 4 merupakan data hasil pengukuran intensitas cahaya panel surya, data ini berasal dari sensor BH1750, sensor intensitas cahaya digital yang digunakan dalam sistem PLTS untuk mengukur jumlah energi cahaya matahari yang jatuh pada permukaan panel surya. Rentang waktu *monitoring* dilakukan dari pukul 9.05 pagi hingga pukul 17.05 sore dengan total waktu *monitoring* selama 6 jam dan total data yang terekam oleh sensor sebanyak 7996 data lux. Nilai lux sangat berpengaruh terhadap kinerja modul fotovoltaik karena semakin tinggi nilai lux, maka semakin banyak energi matahari yang tersedia untuk dikonversi menjadi listrik. *Monitoring* dilakukan untuk mengetahui fluktuasi intensitas cahaya, serta keterkaitannya dengan output daya sistem PLTS.

1	id	tanggal	waktu	suhu	kelembapn
4507	8511	6/9/2025	17:17:51	30.25	62
4508	8512	6/9/2025	17:17:57	30.25	62.2
4509	8513	6/9/2025	17:18:01	30.25	62.4
4510	8514	6/9/2025	17:18:06	30.19	62.5
4511	8515	6/9/2025	17:18:10	30.19	62.3
4512	8516	6/9/2025	17:18:22	30.25	62.2
4513	8517	6/9/2025	17:18:22	30.19	62.4
4514	8518	6/9/2025	17:18:25	30.19	62.4
4515	8519	6/9/2025	17:18:29	30.19	62.4
4516	8520	6/9/2025	17:18:32	30.19	62.2
4517	8521	6/9/2025	17:18:38	30.12	62.3
4518	8522	6/9/2025	17:18:42	30.12	62.5
4519	8523	6/9/2025	17:18:45	30.12	62.3
4520	8524	6/9/2025	17:18:49	30.12	62.3
4521	8525	6/9/2025	17:18:52	30.12	62.4
4522	8526	6/9/2025	17:18:56	30.19	62.5

Gambar 5 Data Hasil Pengukuran Suhu dan Kelembapan Panel Surya

Gambar 5 merupakan data hasil pengukuran suhu dan kelembapan panel surya, Data ini berasal dari sensor DS18B20 untuk mengukur suhu panel surya di tempatkan di sekitar permukaan panel surya dan sensor DHT22 untuk mengukur kelembapan panel surya. Rentang waktu *monitoring* dilakukan dari pukul 9.05 pagi hingga pukul 17.05 sore dengan total waktu *monitoring* selama 6 jam dan total data yang terekam oleh sensor sebanyak 4522 data. Kedua kondisi lingkungan parameter ini sesuai dengan logika atmosfer dimana ketika suhu naik (siang hari), kelembapan relatif turun karena udara mengembang, sedangkan saat sore, udara mulai mendingin dan kelembapan meningkat.

Tabel 1 Hasil Pengukuran Daya PLTS

No	Jam	Arus (A)	Volt Panel (V)	Volt Baterai (V)
1	9:05	24.8	90	49.9
2	9:35	23.5	88	50
3	10:05	22.4	86	50.5
4	10:35	24.4	88	50.5
5	11:05	24.1	86	50.7
6	11:35	25.4	66	50.4
7	12:05	11.5	80	50
8	12:35	22.6	90	50.8
9	13:05	11.4	98	49.9
10	13:35	12.5	90	50.2
11	14:05	21.4	90	50.8
12	14:35	19.7	82	50.5
13	15:05	7.3	118	49.9
14	15:35	6.2	106	49.6
15	16:05	5.9	66	49.2
16	16:35	5.4	62	49
17	17:05	5.3	60	48.9

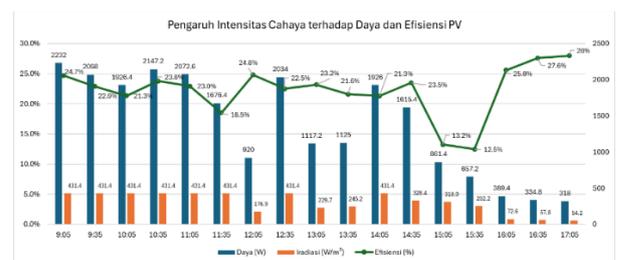
Tabel 1 merepresentasikan data yang diperoleh dari hasil pemantauan sistem PLTS melalui layar panel SCC MPTT dan Inverte. Setiap 30 menit dari pukul 9.05 pagi hingga pukul 17.05 sore dilakukan pengambilan data pada Arus (A), Tegangan Panel (V), dan Tegangan Baterai (V).

B. Analisis Hasil Pengujian

Tabel 2 Hasil Pengujian Kondisi Lingkungan dan Performa Panel Surya

No	Jam	Arus (A)	Volt Panel (V)	Daya (W)	Intensitas Cahaya (Lux)	Iradiasi (W/m ²)	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Efisiensi (%)
1	9:05	24.8	90	2232	54612.5	431.4	35.81	26.5	24.7%
2	9:35	23.5	88	2068	54612.5	431.4	36.63	27.3	22.9%
3	10:05	22.4	86	1926.4	54612.5	431.4	39	26	21.3%
4	10:35	24.4	88	2147.2	54612.5	431.4	37.17	26.7	23.8%
5	11:05	24.1	86	2072.6	54612.5	431.4	37.81	31.4	23.0%
6	11:35	25.4	66	1676.4	54612.5	431.4	39.01	33.1	18.5%
7	12:05	11.5	80	920	22395.8	176.9	35.94	39	24.8%
8	12:35	22.6	90	2034	54612.5	431.4	38.5	35.2	22.5%
9	13:05	11.4	98	1117.2	29081.7	229.7	36.38	46.4	23.2%
10	13:35	12.5	90	1125	31040.8	245.2	37.13	43.4	21.6%
11	14:05	21.4	90	1926	54612.5	431.4	36.38	42.2	21.3%
12	14:35	19.7	82	1615.4	41570.5	328.4	37.69	42.2	23.5%
13	15:05	7.3	118	861.4	39363.3	310.9	35.56	46.9	13.2%
14	15:35	6.2	106	657.2	31928.3	252.2	34.25	51.2	12.5%
15	16:05	5.9	66	389.4	9191.67	72.6	31	59	25.6%
16	16:35	5.4	62	334.8	7325.83	57.8	31.12	58.5	27.6%
17	17:05	5.3	60	318	6872.84	54.2	31.25	58.7	28%

Pada tabel 2 merupakan data hasil uji kinerja sistem panel surya berdasarkan kondisi lingkungan serta efisiensi panel surya, yang diperoleh melalui pengambilan data setiap 30 menit mulai pukul 9:05 hingga 17:05. Setiap sesi pengukuran mencatat arus dan tegangan dari panel, daya keluaran, parameter lingkungan seperti intensitas cahaya, suhu, dan kelembapan, serta efisiensi panel surya.



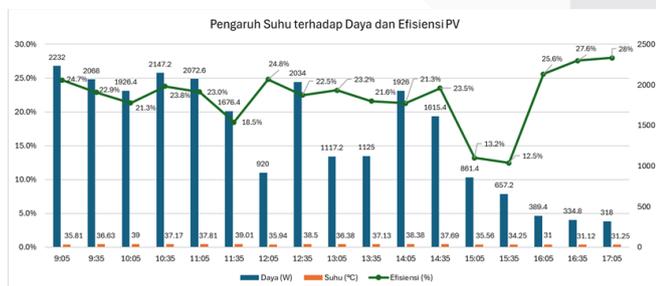
Gambar 6 Grafik Pengaruh Intensitas cahaya, Daya, dan Efisiensi Panel Surya

Grafik pada Gambar 6 menunjukkan hubungan antara intensitas cahaya (W/m^2), daya listrik (W), dan efisiensi (%) yang dihasilkan dari panel surya. Data pada grafik diambil dalam rentang waktu pengujian dari pukul 9:05 hingga 17:05 WITA. Terlihat bahwa performa daya serta efisiensi panel surya bergantung pada besar kecilnya intensitas cahaya matahari. Pada awal pengujian pukul 09.05, intensitas cahaya tercatat sebesar 54.612,5 lux dengan iradiasi 431,4 W/m^2 , menghasilkan daya 2232 W dan efisiensi 24,7%. Meskipun intensitas cahaya pada rentang waktu 09.35 hingga 11.35 relatif konstan di angka 54.612,5 lux dengan iradiasi yang sama, daya dan efisiensi yang dihasilkan mengalami fluktuasi. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara intensitas cahaya dan daya tidak selalu linier.

Pada pukul 12.05 intensitas cahaya menurun menjadi 22395,8 lux dengan iradiasi 176,93 W/m^2 , dan daya yang dihasilkan panel surya juga ikut menurun menjadi 920 W, dengan efisiensi 24,8%. Kemudian pada pukul 12.35, intensitas cahaya kembali meningkat ke 54612,5 lux dengan iradiasi 431,4 W/m^2 , dan daya yang dihasilkan panel surya juga naik kembali menjadi 2034 W dan efisiensi 22,5%.

Menjelang sore hari, penurunan sinar matahari semakin nyata. Pukul 15.05, intensitas cahaya turun ke 39363,3 lux dengan iradiasi 310,9 W/m^2 , dan daya yang dihasilkan panel surya 861,4 W dan efisiensi 13,2%. Nilai ini terus menurun secara konsisten pada pukul 15.35 hingga 17.05, ketika intensitas mencapai titik terendah yaitu 6872,8 lux dengan iradiasi 54,2 W/m^2 , dan daya yang dihasilkan panel surya juga menurun menjadi 318 W. Meskipun demikian, efisiensi panel surya justru meningkat menjadi 28%.

Secara keseluruhan, grafik menunjukkan bahwa intensitas cahaya memiliki pengaruh yang signifikan terhadap daya yang dihasilkan oleh panel surya. Meskipun terdapat sedikit deviasi pada beberapa titik waktu akibat faktor eksternal seperti suhu lingkungan, kondisi atmosfer, atau efisiensi kerja sistem MPPT, hubungan umum antara kedua variabel ini tetap konsisten. Selain itu, data juga menunjukkan bahwa efisiensi konversi energi panel surya tidak selalu sebanding dengan intensitas cahaya, hal ini disebabkan saat kondisi intensitas cahaya tinggi, panel cenderung memanas yang dapat menyebabkan penurunan efisiensi konversi energi akibat meningkatnya resistansi internal. Sebaliknya, pada intensitas cahaya rendah meskipun daya yang dihasilkan panel surya menurun, efisiensi bisa lebih tinggi karena penurunan suhu kerja panel yang meningkatkan performa sel fotovoltaik.



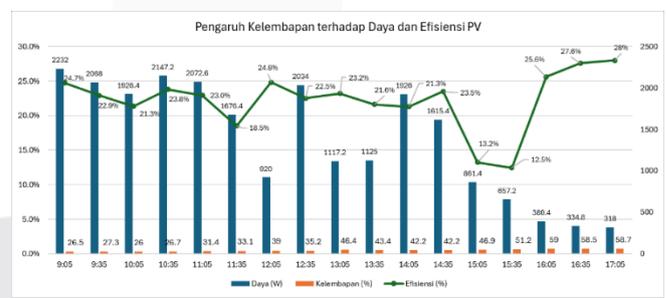
Gambar 7 Pengaruh Suhu lingkungan terhadap Daya dan Efisiensi

Gambar 7 ditampilkan grafik pengaruh suhu terhadap daya dan efisiensi terlihat suhu lingkungan selama pengujian berkisar antara 31°C hingga 39,01°C. Panel surya menunjukkan respons yang cukup signifikan terhadap fluktuasi suhu tersebut. Pada pukul 9.05 – 10.05 efisiensi turun dengan diikuti naiknya suhu lingkungan. Pada pukul

10.35 – 11.05, efisiensi mengalami peningkatan seiring dengan penurunan suhu lingkungan. Kemudian, pada pukul 11.35, ketika suhu mencapai 39,01°C, panel surya menghasilkan daya sebesar 1280,2 W dengan efisiensi 18,5%. Pada pukul 12:05, ketika suhu menurun menjadi 35,94°C, daya juga menurun menjadi 920 W, tetapi efisiensi justru meningkat menjadi 24,8%. Ini menunjukkan bahwa meskipun penurunan suhu dapat menyebabkan penurunan daya akibat berkurangnya intensitas cahaya, efisiensi konversi energi panel surya justru meningkat. Peningkatan efisiensi ini disebabkan oleh suhu kerja panel yang lebih rendah.

Hal serupa juga terjadi pada pukul 12:35 – 13:35, dimana kenaikan suhu diikuti penurunan efisiensi dan sebaliknya. Pada pukul 14:05, saat suhu kembali naik menjadi 38,38°C, panel menghasilkan daya sebesar 1926 W dengan efisiensi 21,2%. Selanjutnya, pada pukul 14:35, suhu turun menjadi 37,69°C, menghasilkan daya 1615,4 W dan efisiensi 23,5%. Akan tetapi, pada saat suhu menurun ke kisaran 34,25°C – 35,56°C pada pukul 15:05 – 15:35, efisiensi hanya sebesar 12,4% – 13,2%. Hal ini disebabkan oleh ketidakmampuan panel surya dalam mengonversi energi matahari secara optimal akibat perubahan posisi matahari atau terhalangnya sinar langsung ke permukaan panel. Pada pukul 16:05 – 17:05, suhu mulai stabil, sehingga efisiensi kembali mengalami peningkatan.

Secara keseluruhan, suhu lingkungan berpengaruh signifikan terhadap efisiensi panel surya. Saat suhu tinggi, efisiensi menurun meskipun daya tetap tinggi, sedangkan suhu rendah cenderung meningkatkan efisiensi. Di sisi lain, daya lebih dipengaruhi oleh intensitas cahaya. Faktor seperti posisi matahari dan hambatan cahaya juga ikut memengaruhi performa panel, sehingga efisiensi tidak semata ditentukan oleh suhu dan intensitas, tetapi juga kondisi lingkungan sekitar.



Gambar 8 Pengaruh Kelembapan lingkungan terhadap Daya dan Efisiensi

Gambar 8 ditampilkan grafik pengaruh kelembapan terhadap daya dan efisiensi Kelembapan selama pengujian meningkat secara bertahap dari 26,5% pada pukul 9.05 hingga 58,7% pada pukul 17.05. Pada pukul 11:35, saat kelembapan berada pada 33%, panel surya menghasilkan daya sebesar 1676,4 W dengan efisiensi 18,5%. Selanjutnya, saat kelembapan meningkat menjadi 39% pada pukul 12:05, daya menurun menjadi 920 W, namun efisiensi justru meningkat menjadi 24,8%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kelembapan dapat menyebabkan penurunan daya, tetapi tidak selalu diikuti oleh penurunan efisiensi.

Hal serupa juga terjadi pada pukul 12:35–14:05, di mana peningkatan kelembapan diikuti oleh penurunan daya yang dihasilkan oleh panel surya. Menjelang sore hari, kelembapan terus meningkat hingga mencapai 58,7%, sementara daya

yang dihasilkan semakin menurun dengan efisiensi yang menunjukkan variasi. Secara keseluruhan, kelembapan memiliki pengaruh terhadap daya. Peningkatan kelembapan cenderung menurunkan daya yang dihasilkan, sementara efisiensi tidak selalu menunjukkan pola yang sejalan. Hal ini menunjukkan bahwa selain kelembapan, terdapat faktor lain seperti suhu, intensitas cahaya, yang turut memengaruhi performa konversi energi panel surya.

Tabel 3 Hasil Analisis Statistik

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error				Tolerance	VIF
1	(Constant)	1940,475	1430,991		1,356	,198		
	Iradiasi (W/m ²)	3,057	,970	,635	3,152	,008	,133	7,500
	Suhu (°C)	-13,917	39,909	-,053	-,349	,733	,231	4,321
	Kelembapan (%)	-24,325	9,691	-,404	-2,510	,026	,209	4,783

a. Dependent Variable: Daya (W)

Hasil uji statistik pada Tabel 3 dapat dilihat iradiasi memiliki koefisien 3,057 dengan nilai signifikansi 0,008, yang berarti setiap kenaikan 1 W/m² iradiasi meningkatkan daya sebesar 3,06 W. Hasil ini selaras dengan prinsip kerja fotovoltaik, di mana peningkatan intensitas cahaya akan meningkatkan jumlah energi listrik yang dihasilkan. Kelembapan memiliki koefisien -24,325 dengan nilai signifikansi 0,026, yang berarti setiap kenaikan kelembapan 1% akan menurunkan daya sebesar 24,33 W. Penurunan ini dapat disebabkan oleh uap air dalam udara yang lembab dapat menyerap energi matahari yang seharusnya mencapai panel surya. Sementara itu, suhu memiliki koefisien -13,917 dengan nilai signifikansi 0,733, sehingga pengaruhnya terhadap daya tidak signifikan dalam kondisi pengujian ini. Secara keseluruhan, intensitas cahaya menjadi faktor positif dominan terhadap daya, sedangkan kelembapan menjadi faktor negatif yang signifikan.

V. KESIMPULAN

Dari hasil perancangan dan pengujian sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) di SMK Telkom Makassar, penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan berpengaruh terhadap performa PLTS. Daya tertinggi sebesar 2232 W diperoleh saat panel menerima iradiasi 431,4 W/m² dengan suhu 35,81°C dan kelembapan 26,5%, menghasilkan efisiensi 24,7%. Sedangkan daya terendah sebesar 318 W terjadi pada iradiasi 54,2 W/m² dengan suhu 31,25°C dan kelembapan 57,7%, menghasilkan efisiensi 28%. Berdasarkan standar efisiensi, nilai tersebut menunjukkan bahwa panel surya yang digunakan masih tergolong cukup efisien serta berada dalam kisaran rata-rata efisiensi panel surya.

Intensitas cahaya memiliki pengaruh yang signifikan dalam menentukan seberapa besar daya yang dapat dihasilkan. Akan tetapi, efisiensi konversi energi tidak selalu meningkat seiring bertambahnya intensitas, karena suhu tinggi justru dapat menurunkan kinerja panel akibat peningkatan resistansi internal. Selain itu, kelembapan yang tinggi cenderung mengurangi daya yang dihasilkan, meskipun tidak selalu berbanding lurus dengan efisiensi, karena efisiensi juga dipengaruhi oleh suhu panel dan posisi keberadaan matahari. Secara keseluruhan, suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya terbukti saling memengaruhi dan berdampak pada performa PLTS. Oleh karena itu, pemantauan berbasis IoT sangat penting untuk menjaga efisiensi dan keandalan sistem PLTS secara berkelanjutan.

REFERENSI

- [1] S. Ansari, A. Ayob, M. S. Hossain Lipu, M. H. Md Saad, and A. Hussain, "A review of monitoring technologies for solar pv systems using data processing modules and transmission protocols: Progress, challenges and prospects," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 15, 2021, doi: 10.3390/su13158120.
- [2] A. Ordoñez *et al.*, "Design and implementation of an autonomous device with an app to monitor the performance of photovoltaic panels," *Energy Reports*, vol. 12, no. April, pp. 2498–2510, 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.07.062.
- [3] M. Tradacete-Ágreda, E. Santiso-Gómez, F. J. Rodríguez-Sánchez, P. J. Hueros-Barrios, J. A. Jiménez-Calvo, and C. Santos-Pérez, "High-performance IoT Module for real-time control and self-diagnose PV panels under working daylight and dark electroluminescence conditions," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 25, no. June 2023, p. 101006, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2023.101006.
- [4] B. Bylykbashi and R. V. Filkoski, "Optimization of a photovoltaic system: a case study Kosovo," *International Journal of Innovation Science*, vol. 16, no. 2, pp. 286–295, 2024, doi: 10.1108/IJIS-01-2023-0003.
- [5] A. R. Kalaiarasi, A. C. V. Devi, V. Yeshwanth, S. Pravinraj, and M. Prabakaran, "Internet of things based smart photovoltaic panel monitoring system," *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 341–351, 2024, doi: 10.11591/ijres.v13.i2.pp341-351.
- [6] A. D. Pangestu, F. Ardianto, and B. Alfaresi, "Sistem Monitoring Beban Listrik Berbasis Arduino Nodemcu Esp8266," *Jurnal Ampere*, vol. 4, no. 1, p. 187, 2019, doi: 10.31851/ampere.v4i1.2745.
- [7] A. Selay *et al.*, "INTERNET OF THINGS," *Karimah Tauhid*, vol. 1, no. 2963–590X, pp. 861–862, 2022.
- [8] Dr. M. K. Sinha, "Exploring efficiency limits in emerging photovoltaic technologies: A comparative analysis," *International Journal of Advanced Academic Studies*, vol. 6, no. 1, pp. 86–90, Jan. 2024, doi: 10.33545/27068919.2024.v6.i1a.1292.
- [9] K. C. Wang, "Embedded and Real-Time Operating Systems Second Edition."
- [10] P. Kusumaning Tiyas and M. Widyartono, "Pengaruh Efek Suhu Terhadap Kinerja Panel Surya," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 09 Nomor 01, pp. 871–876, Jan. 2020.
- [11] A. Aslam, N. Ahmed, S. A. Qureshi, M. Assadi, and N. Ahmed, "Advances in Solar PV Systems; A Comprehensive Review of PV Performance, Influencing Factors, and Mitigation Techniques," Oct. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/en15207595.
- [12] L. M. Musanga, W. H. Barasa, and M. Maxwell, "The Effect of Irradiance and Temperature on the Performance of Monocrystalline Silicon Solar Module in Kakamega," *Physical Science International Journal*, vol. 19, no. 4, pp. 1–9, Oct. 2018, doi: 10.9734/psij/2018/44862.