

Analisis Kinerja Panel Surya Akibat Akumulasi Debu pada Permukaan Modul Fotovoltaik

Putri Hidayah Ira^{1*}, Ahmad Faisal², Reza Juliangga³

^{1,2,3}Fakultas Sains dan Teknologi, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan, Indonesia

Email: ^{1*}putrihidayahira@gmail.com, ²ahmadfaisal.mt85@gmail.com, ³rezajuliangga@dosen.pancabudi.ac.id
(* Email Corresponding Author: putrihidayahira@gmail.com)

Received: 20 Februari 2026. | Revision: 3 Maret 2026 | Accepted: 3 Maret 2026

Abstrak

Akumulasi debu pada permukaan panel surya merupakan salah satu faktor lingkungan yang berpengaruh signifikan terhadap kinerja sistem fotovoltaik, terutama di wilayah beriklim tropis seperti Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh massa, ketebalan debu, serta suhu permukaan panel terhadap efisiensi dan penurunan daya keluaran panel surya. Pengujian dilakukan menggunakan modul fotovoltaik *polycrystalline* 10 Wp dengan tiga kondisi permukaan, yaitu panel bersih, panel dengan debu 60 gram (massa 729 g/m²; ketebalan rata-rata 1,82 mm), dan panel dengan debu 120 gram (massa 1459 g/m²; ketebalan rata-rata 4,86 mm). Pengambilan data dilakukan selama tiga hari berturut-turut pada kondisi lapangan (*outdoor*) dengan parameter pengukuran meliputi tegangan, arus, daya, intensitas cahaya, dan suhu permukaan panel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan massa dan ketebalan debu tidak hanya menghambat transmisi radiasi matahari ke permukaan sel, tetapi juga meningkatkan suhu kerja panel. Kenaikan suhu ini berpengaruh terhadap penurunan tegangan keluaran akibat karakteristik koefisien suhu negatif pada modul fotovoltaik. Panel bersih menghasilkan efisiensi rata-rata tertinggi sebesar 25–29%, sedangkan panel dengan debu 60 gram dan 120 gram hanya menghasilkan efisiensi di bawah 1%. Penurunan daya pada panel berdebu mencapai lebih dari 98% dibandingkan kondisi panel bersih. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi pengaruh optik (penghalang cahaya) dan termal (kenaikan suhu) akibat debu secara signifikan menurunkan kinerja panel surya.

Kata Kunci: panel surya, debu, suhu panel, efisiensi, penurunan daya

Abstract

The accumulation of dust on the surface of solar panels is one of the environmental factors that significantly affects the performance of photovoltaic systems, particularly in tropical regions such as Indonesia. This study aims to analyze the effects of dust mass, dust thickness, and panel surface temperature on the efficiency and power output degradation of solar panels. The experiments were conducted using a 10 Wp polycrystalline photovoltaic module under three surface conditions: a clean panel, a panel with 60 grams of dust (mass density of 729 g/m²; average thickness of 1.82 mm), and a panel with 120 grams of dust (mass density of 1459 g/m²; average thickness of 4.86 mm). Data were collected over three consecutive days under outdoor conditions, with measurement parameters including voltage, current, power, light intensity, and panel surface temperature. The results indicate that increasing dust mass and thickness not only obstruct the transmission of solar radiation to the cell surface but also increase the operating temperature of the panel. This temperature rise contributes to a reduction in output voltage due to the negative temperature coefficient characteristics of photovoltaic modules. The clean panel produced the highest average efficiency, ranging from 25% to 29%, while panels with 60 grams and 120 grams of dust exhibited efficiencies below 1%. The power output reduction in dusty panels exceeded 98% compared to the clean panel condition. These findings demonstrate that the combined optical effects (light obstruction) and thermal effects (temperature increase) caused by dust significantly degrade solar panel performance.

Keywords: solar panel, dust, panel temperature, efficiency, power degradation

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terletak di wilayah khatulistiwa dan memiliki potensi energi surya yang sangat besar sepanjang tahun. Intensitas radiasi matahari yang relatif tinggi dan stabil menjadikan energi surya sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan untuk mendukung ketahanan energi nasional [1], [2], [3]. Di tengah meningkatnya kebutuhan energi listrik serta dorongan global menuju penggunaan energi bersih dan rendah emisi, pemanfaatan energi surya melalui teknologi fotovoltaik (Photovoltaic/PV) menjadi solusi strategis yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Teknologi fotovoltaik bekerja dengan mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui proses konversi pada material semikonduktor [4], [5]. Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, foton akan membebaskan elektron sehingga menghasilkan arus listrik [6], [7]. Proses ini berlangsung tanpa pembakaran bahan bakar dan tanpa menghasilkan emisi gas rumah kaca selama operasi, sehingga menjadikan sistem PV sebagai salah satu teknologi pembangkit listrik paling bersih. Selain itu, sistem PV memiliki fleksibilitas tinggi dalam penerapan, baik untuk skala rumah tangga, komersial, maupun pembangkit listrik skala besar. Biaya operasional yang relatif rendah setelah instalasi juga menjadi salah satu keunggulan utama teknologi ini [8], [9].

Meskipun memiliki berbagai kelebihan, kinerja sistem fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, kelembapan udara, kecepatan angin, serta kondisi kebersihan permukaan panel merupakan variabel yang secara langsung memengaruhi daya keluaran dan efisiensi sistem. Salah satu permasalahan yang sering terjadi pada instalasi panel surya, khususnya di wilayah beriklim tropis dan berdebu, adalah akumulasi partikel debu pada permukaan modul. Fenomena ini dikenal sebagai soiling, yaitu penumpukan partikel halus seperti debu tanah, pasir, polutan udara, serta partikel organik yang menempel pada kaca pelindung panel surya.

Akumulasi debu pada permukaan panel surya dapat menyebabkan terjadinya hambatan transmisi cahaya menuju sel fotovoltaik[10]. Lapisan debu yang menutupi permukaan panel akan mengurangi jumlah radiasi matahari yang mampu menembus kaca dan mencapai lapisan semikonduktor. Akibatnya, arus listrik yang dihasilkan menjadi lebih kecil karena jumlah elektron yang tereksitasi berkurang. Penurunan arus ini secara langsung memengaruhi daya keluaran panel, mengingat daya merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus. Semakin tebal lapisan debu, semakin besar pula potensi penurunan daya yang terjadi[11].

Selain menghambat transmisi cahaya, lapisan debu juga dapat memengaruhi karakteristik termal panel surya. Permukaan panel yang tertutup debu cenderung menyerap dan menahan panas lebih lama dibandingkan panel yang bersih. Peningkatan suhu kerja panel memiliki dampak negatif terhadap kinerja listrik modul fotovoltaik. Secara umum, sel surya memiliki koefisien suhu negatif, yang berarti bahwa kenaikan suhu akan menyebabkan penurunan tegangan keluaran. Dengan demikian, efek debu terhadap kinerja panel surya tidak hanya bersifat optik, tetapi juga termal. Kombinasi kedua efek ini berpotensi menyebabkan penurunan efisiensi yang signifikan.

Kondisi ini menjadi semakin relevan di Indonesia yang memiliki karakteristik iklim tropis dengan tingkat kelembapan tinggi serta periode musim kemarau yang cukup panjang di beberapa wilayah[12], [13], [14]. Pada musim kemarau, tingkat kekeringan dan aktivitas angin dapat meningkatkan penyebaran partikel debu di udara. Aktivitas manusia seperti lalu lintas kendaraan, konstruksi bangunan, serta aktivitas industri juga berkontribusi terhadap meningkatnya konsentrasi partikel di atmosfer. Partikel-partikel tersebut berpotensi mengendap pada permukaan panel surya dan membentuk lapisan yang semakin tebal apabila tidak dibersihkan secara berkala.

Dalam praktiknya, banyak sistem panel surya dipasang pada atap bangunan atau lokasi terbuka tanpa sistem pembersihan otomatis. Pemeliharaan panel sering kali dilakukan secara manual dan tidak terjadwal dengan baik. Akibatnya, akumulasi debu dapat berlangsung dalam waktu yang lama sebelum dilakukan pembersihan. Kondisi ini berpotensi menyebabkan penurunan kinerja sistem yang tidak disadari oleh pengguna, terutama pada sistem skala kecil yang tidak dilengkapi dengan sistem pemantauan kinerja secara real-time.

Permasalahan akumulasi debu menjadi penting untuk dikaji secara kuantitatif agar dapat diketahui sejauh mana pengaruh massa dan ketebalan debu terhadap penurunan daya serta efisiensi panel surya[15]. Informasi ini diperlukan sebagai dasar dalam menentukan strategi pemeliharaan yang efektif dan efisien. Tanpa pemahaman yang jelas mengenai hubungan antara ketebalan debu dan degradasi kinerja, upaya pembersihan dapat menjadi kurang optimal, baik dari segi frekuensi maupun metode yang digunakan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis kinerja panel surya akibat akumulasi debu pada permukaan modul fotovoltaik. Penelitian dilakukan dengan pendekatan eksperimen lapangan menggunakan modul fotovoltaik polycrystalline berkapasitas 10 Wp. Variasi perlakuan dilakukan dengan membandingkan kondisi panel bersih sebagai kontrol dengan dua kondisi panel berdebu yang memiliki massa dan ketebalan berbeda. Parameter yang diamati meliputi tegangan, arus, daya keluaran, efisiensi konversi energi, intensitas cahaya, serta suhu permukaan panel.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh langsung peningkatan massa dan ketebalan debu terhadap penurunan daya dan efisiensi panel surya. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis perubahan suhu permukaan panel akibat lapisan debu dan hubungannya terhadap karakteristik kinerja listrik modul. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran menyeluruh mengenai dampak optik dan termal dari akumulasi debu terhadap sistem fotovoltaik.

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi praktis dalam pengelolaan dan pemeliharaan sistem panel surya, khususnya di wilayah tropis. Informasi mengenai besarnya penurunan daya akibat variasi ketebalan debu dapat menjadi dasar dalam menentukan interval pembersihan yang optimal. Selain itu, temuan penelitian ini juga dapat menjadi referensi dalam pengembangan sistem pembersih panel surya yang lebih efektif dan hemat biaya.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berfokus pada aspek teknis penurunan daya, tetapi juga menekankan pentingnya manajemen pemeliharaan dalam menjaga keberlanjutan dan efisiensi sistem energi surya. Pemanfaatan energi surya yang optimal tidak hanya bergantung pada potensi radiasi matahari yang melimpah, tetapi juga pada kemampuan untuk mengendalikan faktor-faktor eksternal yang dapat menurunkan kinerja modul fotovoltaik. Oleh karena itu, kajian mengenai pengaruh akumulasi debu terhadap panel surya menjadi langkah penting dalam mendukung pengembangan energi terbarukan yang andal dan berkelanjutan di Indonesia.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu Dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan secara lapangan (*outdoor*) pada area terbuka yang mendapat paparan sinar matahari langsung. Eksperimen dilakukan pada lokasi kampus/lapangan yang representatif untuk kondisi tropis dan relatif tidak terhalang bayangan. Waktu pengujian ditetapkan pada jam puncak penyinaran siang hari (pukul 11.45-12.45 WIB) untuk menjaga konsistensi *irradiance* saat pengambilan data.

2.2 Parameter Pengukuran Dan Pegamatan

Parameter yang diukur dan diamati meliputi:

- Tegangan (V) — tegangan keluaran modul (V_{oc} dan V pada kondisi beban).
- Arus (I) — arus keluaran modul (I_{sc} dan I pada kondisi beban).
- Daya keluaran ($P = V \times I$) — daya nyata yang dihasilkan panel.
- Efisiensi (%) — efisiensi konversi dihitung terhadap *irradiance* dan luas modul.
- Penurunan daya (%) — persentase perubahan daya antara kondisi bersih dan berdebu.
- Intensitas cahaya (*Lux* / *irradiance* relatif) — diukur dengan *lux* meter (aplikasi HP) untuk memastikan kondisi pencahayaan konstan.
- Suhu permukaan panel ($^{\circ}C$) — diukur menggunakan termometer inframerah untuk memantau efek termal debu.
- Karakteristik debu — massa partikel dan ketebalan lapisan.

2.3 Model Penelitian

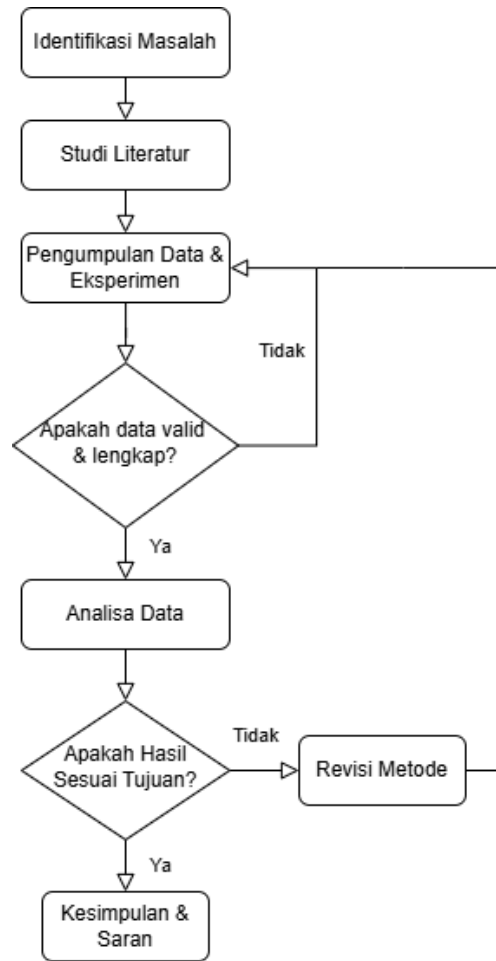
Penelitian menggunakan model eksperimen lapangan sederhana (*field experiment*) dengan dua kondisi utama:

- Kondisi kontrol: panel dalam keadaan bersih (*baseline*).
- Kondisi perlakuan: panel diberi perlakuan debu berdasarkan massa dan ketebalan rata-rata debu.

Objek percobaan adalah satu modul fotovoltaik *polycrystalline* 10 Wp yang dihubungkan ke sistem kecil (*Solar Charge Controller*, baterai 12 V, beban lampu 12 V). Pengukuran listrik dilakukan pada terminal panel sambil beban tetap terhubung untuk kestabilan pembacaan.

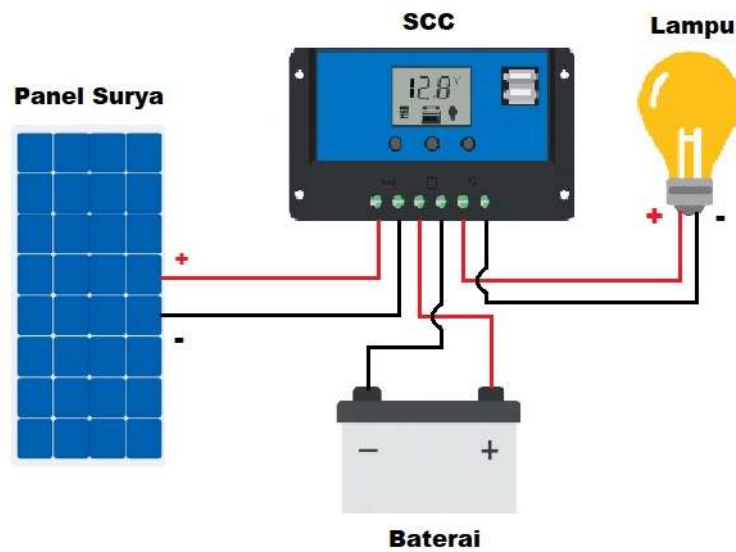
2.4 Rancangan Penelitian

Penelitian ini diawali dengan identifikasi permasalahan berupa penurunan efisiensi dan daya keluaran panel surya akibat penumpukan debu pada permukaan modul fotovoltaik. Permasalahan ini relevan dengan kondisi lingkungan tropis Indonesia yang memiliki tingkat paparan debu cukup tinggi. Tahap berikutnya adalah studi literatur untuk memperoleh landasan teori terkait prinsip kerja *photovoltaic* (PV), karakteristik debu, serta parameter kinerja panel surya seperti tegangan, arus, daya, dan efisiensi. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data melalui eksperimen dengan variasi massa dan ketebalan debu pada panel surya. Data hasil pengujian kemudian dievaluasi untuk memastikan validitas dan kelengkapannya. Data yang valid dianalisis untuk mengetahui pengaruh debu terhadap penurunan daya, efisiensi, dan perubahan suhu panel. Hasil analisis selanjutnya menjadi dasar dalam penarikan kesimpulan dan penyusunan saran. Alur penelitian secara keseluruhan ditampilkan dalam *flowchart* pada gambar berikut.

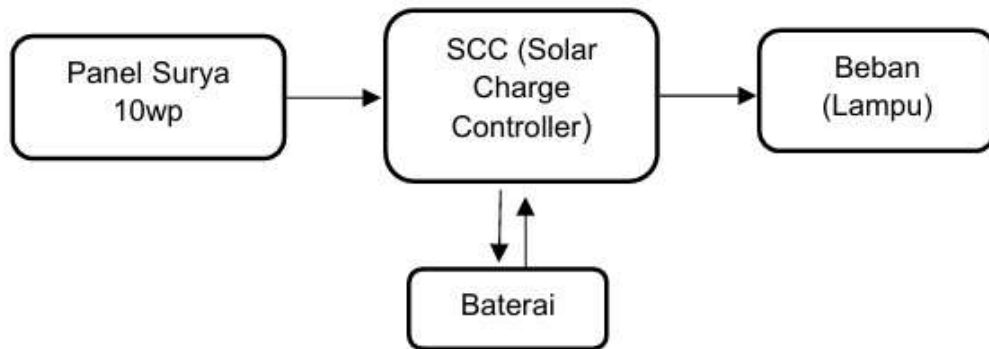


Gambar 1. Flowchart Rancangan Pengujian

Dalam merancang penelien ini, diperlukan juga rangkaian sistem dan blok diagram yang menjadi acuan dari penelitian ini. Berikut gambar rangkaian sistem dan blok diagramnya.



Gambar 2. Rangkaian Sistem



Gambar 3. Blok Diagram Sistem

2.5 Metode Pengujian Alat

Pengujian alat dilakukan untuk mengetahui pengaruh massa dan ketebalan debu terhadap kinerja panel surya, yang ditinjau dari daya keluaran, efisiensi, dan suhu permukaan panel. Pengujian dilaksanakan secara eksperimen lapangan (*outdoor*) dengan memanfaatkan sinar matahari langsung sebagai sumber energi utama.

Objek pengujian berupa modul fotovoltaik *polycrystalline* 10 Wp yang dipasang pada dudukan dengan orientasi dan sudut kemiringan tetap selama pengujian. Panel dihubungkan ke rangkaian pengujian yang terdiri dari *Solar Charge Controller* (SCC), baterai 12 V, dan beban lampu DC untuk mensimulasikan kondisi operasi nyata. Pengukuran parameter listrik dilakukan pada terminal keluaran panel dengan kondisi beban yang konstan agar pembacaan data stabil.

Pengujian dilakukan pada tiga kondisi permukaan panel, yaitu:

- Panel bersih sebagai kondisi kontrol.
- Panel dengan debu 60 gram, dengan massa debu sebesar 729 g/m^2 dan ketebalan rata-rata 1,82 mm.
- Panel dengan debu 120 gram, dengan massa debu sebesar 1459 g/m^2 dan ketebalan rata-rata 4,86 mm.

Debu yang digunakan disebarkan secara merata pada permukaan panel untuk memperoleh ketebalan yang relatif homogen. Ketebalan debu diukur menggunakan alat ukur ketebalan secara sampling pada beberapa titik permukaan panel, kemudian dirata-ratakan.

Pengambilan data dilakukan selama tiga hari berturut-turut pada rentang waktu pukul 11.45-12.45 WIB, yang merepresentasikan kondisi intensitas penyinaran matahari tinggi. Parameter yang diukur meliputi:

- Tegangan keluaran panel (V),
- Arus keluaran panel (I),
- Intensitas cahaya (*Lux*),
- Suhu permukaan panel ($^{\circ}\text{C}$).

Pengukuran tegangan dan arus dilakukan menggunakan multimeter digital, sedangkan intensitas cahaya diukur menggunakan *lux* meter berbasis aplikasi. Suhu permukaan panel diukur menggunakan termometer inframerah dengan titik ukur yang sama pada setiap kondisi pengujian untuk menjaga konsistensi data.

2.6 Metode Pengolahan/Analisa Data

Data yang diperoleh dari hasil pengujian selanjutnya diolah dan dianalisis secara kuantitatif untuk mengetahui pengaruh massa dan ketebalan debu terhadap kinerja panel surya. Tahapan pengolahan dan analisa data dilakukan sebagai berikut:

1. Perhitungan Daya Keluaran Panel

Daya keluaran panel surya dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan persamaan:

$$P = V \times I \quad (a)$$

Perhitungan dilakukan untuk setiap titik waktu pengukuran pada masing-masing kondisi panel.

2. Konversi Intensitas Cahaya

Nilai intensitas cahaya yang diperoleh dalam satuan *lux* dikonversi ke irradiansi (W/m^2) menggunakan pendekatan konversi:

$$\frac{1\text{W}}{\text{m}^2} \approx 120 \text{ lux} \quad (b)$$

Konversi ini digunakan untuk memperkirakan energi radiasi matahari yang diterima permukaan panel.

3. Perhitungan Efisiensi Panel Surya

Efisiensi panel surya dihitung menggunakan persamaan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{G \times A} \times 100\% \quad (c)$$

di mana P_{out} adalah daya keluaran panel (W), G adalah irradiansi matahari (W/m^2), dan A adalah luas permukaan panel (m^2).

4. Perhitungan Penurunan Daya

Persentase penurunan daya akibat akumulasi debu dihitung dengan membandingkan daya panel berdebu terhadap daya panel bersih menggunakan persamaan:

$$\Delta P(\%) = \left(\frac{P_{bersih} - P_{berdebu}}{P_{bersih}} \right) \times 100\% \quad (d)$$

5. Analisis Suhu Panel

Data suhu permukaan panel dianalisis untuk melihat kecenderungan kenaikan suhu akibat peningkatan massa dan ketebalan debu. Perubahan suhu kemudian dikaitkan dengan penurunan efisiensi panel berdasarkan karakteristik koefisien suhu negatif modul fotovoltaik.

6. Perhitungan Nilai Rata-rata Harian

Untuk mengurangi fluktuasi data akibat perubahan cuaca sesaat, seluruh parameter (daya, efisiensi, irradiansi, dan suhu) dihitung nilai rata-ratanya untuk setiap hari pengujian dan setiap kondisi panel.

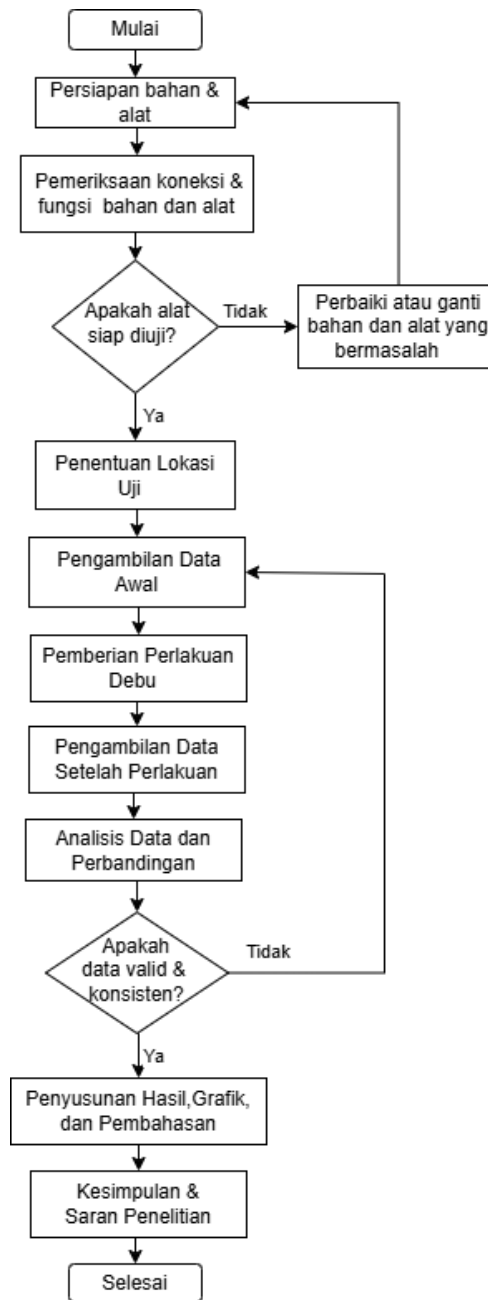
7. Analisis Perbandingan Antar Perlakuan

Nilai rata-rata yang diperoleh selanjutnya dibandingkan antara panel bersih, panel dengan debu 60 gram, dan panel dengan debu 120 gram untuk mengetahui pengaruh massa dan ketebalan debu terhadap daya, efisiensi, dan suhu panel.

8. Penyajian Data dalam Bentuk Tabel dan Grafik

Hasil pengolahan data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memperjelas tren hubungan antara massa debu, ketebalan debu, suhu panel, efisiensi, dan penurunan daya.

Sebelum dilakukan pengolahan, data sebelumnya didapatkan mengikuti alur penelitian pada gambar berikut ini.



Gambar 4. Diagram Alur Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari data yang didapatkan, diperoleh nilai efisiensi dan penurunan daya pada panel bersih dan berdebu pada hari pertama, kedua dan ketiga. Tabel berikut akan menyajikan hasil perhitungan persentase nilai penurunan efisiensi dan penurunan daya pada panel.

Tabel 1. Hasil Pengujian

Hari	Kondisi Panel	Daya Rata-rata (W)	Irradiansi Rata-Rata (W/m ²)	Efisiensi Rata-Rata (%)	Penurunan Daya (%)
1	Bersih	8.41	378.15	27.04	–
	Debu 60 g/ Ketebalan rata-rata: 1,82 mm	0.132	367.25	0.44	98.43
	Debu 120 g/ Ketebalan rata-rata: 4,86 mm	0.034	340.15	0.12	99.60
2	Bersih	11.30	474.02	28.95	–

3	Debu 60 g/ Ketebalan rata-rata: 1,82 mm	0.053	450.83	0.14	99.53
	Debu 120 g/ Ketebalan rata-rata: 4,86 mm	0.028	455.24	0.07	99.75
	Bersih	11.50	543.69	25.72	–
	Debu 60 g/ Ketebalan rata-rata: 1,82 mm	0.208	548.80	0.46	98.19
	Debu 120 g/ Ketebalan rata-rata: 4,86 mm	0.014	499.86	0.03	99.88



(a)



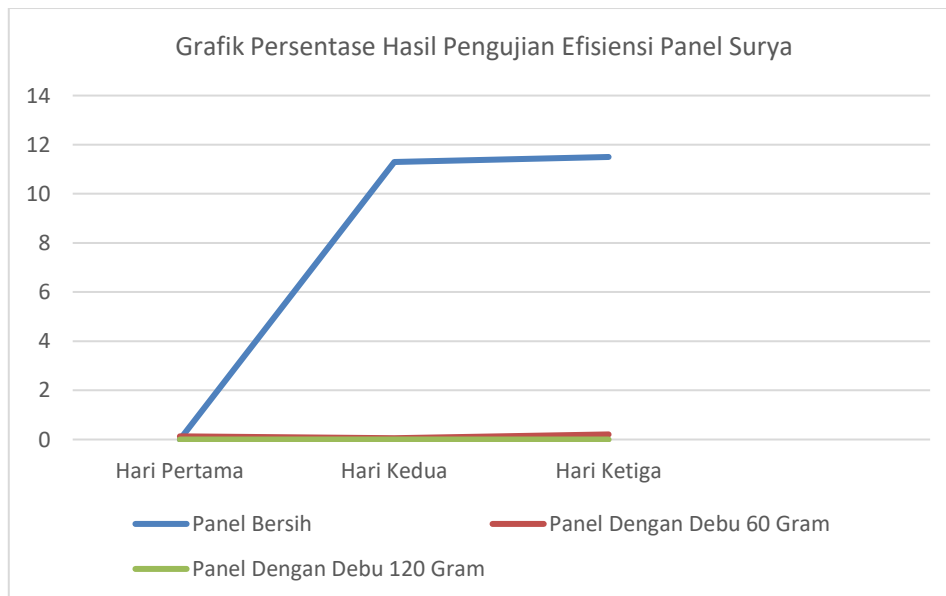
(b)



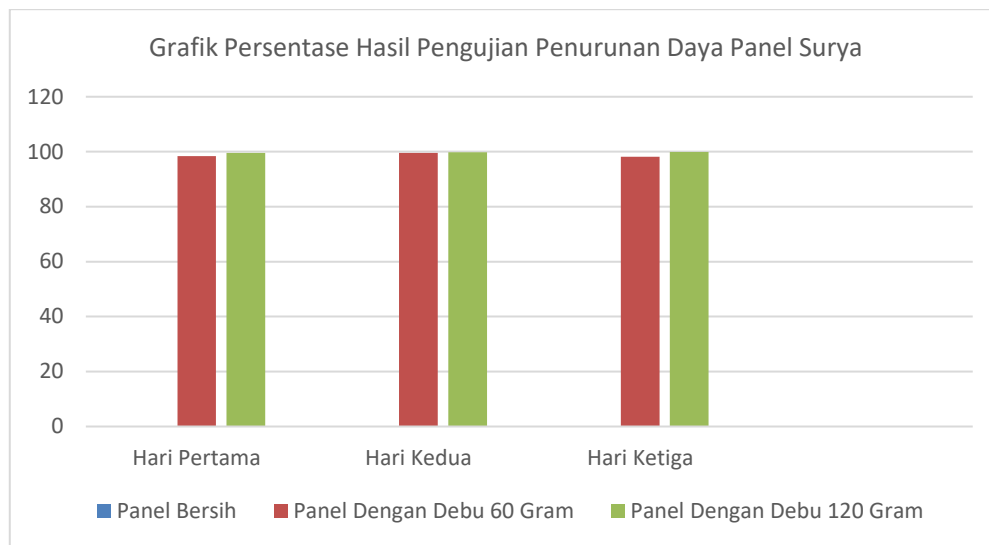
(c)

Gambar 5. (a)(b)(c)Pengujian hari pertama sampai ke 3

Dari hasil dan perhitungan yang didapatkan, berikut grafik tampilan hasil akhir dari penelitian.



Gambar 6. Grafik Persentase Hasil Pengujian Efisiensi Panel Surya



Gambar 7. Grafik Persentase Hasil Pengujian Penurunan Daya Panel Surya

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan massa dan ketebalan debu menyebabkan penurunan daya keluaran panel surya yang sangat signifikan. Panel dengan massa debu 60 gram (729 g/m^2) dan ketebalan rata-rata 1,82 mm menghasilkan daya rata-rata kurang dari 0,25 W, sedangkan panel dengan massa debu 120 gram (1459 g/m^2) dan ketebalan rata-rata 4,86 mm hanya menghasilkan daya di bawah 0,05 W.

Sebagai perbandingan, panel bersih mampu menghasilkan daya rata-rata antara 8–11,5 W. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan debu hampir 3 mm (dari 1,82 mm menjadi 4,86 mm) menyebabkan penurunan daya yang jauh lebih besar, meskipun irradiansi lingkungan relatif sama.

Pengukuran suhu menunjukkan bahwa panel dengan debu memiliki suhu kerja yang lebih tinggi dibandingkan panel bersih. Panel dengan debu 60 gram (ketebalan 1,82 mm) menunjukkan suhu permukaan pada kisaran $45\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$, sedangkan panel dengan debu 120 gram (ketebalan 4,86 mm) mencapai suhu hingga $\pm 67 \text{ }^\circ\text{C}$.

Lapisan debu yang lebih tebal berfungsi sebagai penyerap panas dan menghambat pelepasan panas dari permukaan kaca panel. Dengan bertambahnya massa debu dari 60 gram menjadi 120 gram, akumulasi panas pada permukaan panel meningkat, sehingga suhu kerja panel menjadi lebih tinggi dan berpotensi menurunkan kinerja listrik panel.

Efisiensi panel surya menurun secara drastis seiring dengan meningkatnya massa dan ketebalan debu. Panel dengan debu 60 gram (1,82 mm) hanya menghasilkan efisiensi rata-rata 0,14–0,46%, sedangkan panel dengan debu 120 gram (4,86 mm) menghasilkan efisiensi lebih rendah lagi, yaitu 0,03–0,12%.

Selain penghalang optik, kenaikan suhu panel akibat lapisan debu juga berpengaruh terhadap penurunan tegangan keluaran. Dengan koefisien suhu negatif modul fotovoltaik sebesar sekitar 0,3–0,5% per $^\circ\text{C}$, kenaikan suhu beberapa derajat Celsius akibat lapisan debu tebal semakin memperparah penurunan efisiensi panel.

Panel dengan massa debu 60 gram (ketebalan 1,82 mm) mengalami penurunan daya sebesar 98,19–99,53%, sedangkan panel dengan massa debu 120 gram (ketebalan 4,86 mm) mengalami penurunan daya sebesar 99,60–99,88%. Hasil ini menunjukkan bahwa ketebalan lapisan debu merupakan parameter yang sangat dominan, di mana peningkatan ketebalan hampir tiga kali lipat menyebabkan penurunan daya mendekati kondisi tidak menghasilkan energi listrik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa akumulasi debu pada permukaan modul fotovoltaik memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap kinerja listrik dan termal panel surya. Peningkatan massa debu dari 60 gram dengan kerapatan 729 g/m^2 dan ketebalan 1,82 mm hingga 120 gram dengan kerapatan 1459 g/m^2 dan ketebalan 4,86 mm terbukti menyebabkan penurunan daya keluaran dan efisiensi panel secara drastis. Panel surya dalam kondisi bersih mampu menghasilkan daya dan efisiensi tertinggi, sedangkan keberadaan lapisan debu menyebabkan degradasi kinerja yang ekstrem, di mana panel dengan massa debu 60 gram mengalami penurunan daya lebih dari 98% dan panel dengan massa debu 120 gram menunjukkan penurunan daya yang mendekati 100%. Selain berdampak pada aspek listrik, akumulasi debu juga memengaruhi karakteristik termal panel surya. Ketebalan lapisan debu yang semakin besar menyebabkan peningkatan suhu kerja panel, dengan suhu permukaan tertinggi teramati pada panel yang tertutup debu setebal 4,86 mm. Kondisi ini menunjukkan bahwa debu tidak hanya menghalangi transmisi radiasi matahari ke sel surya, tetapi juga menyerap dan menahan panas sehingga meningkatkan suhu panel. Kombinasi antara hambatan optik

akibat berkurangnya intensitas cahaya yang mencapai sel dan kenaikan suhu kerja panel menjadi faktor utama penyebab penurunan kinerja modul fotovoltaik. Dengan demikian, ketebalan lapisan debu dapat dinyatakan sebagai parameter kritis yang secara langsung menentukan besarnya penurunan daya dan efisiensi panel surya, sehingga pengelolaan kebersihan permukaan panel menjadi aspek penting dalam menjaga performa sistem fotovoltaik secara optimal.

REFERENCES

- [1] F. Afif and A. Martin, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia," *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 6, no. 1, p. 43, 2022, doi: 10.30588/jeemm.v6i1.997.
- [2] Anisa Niwanda, Elsa Kardiana, Muhammad Arif, Putri Rahmadani, Ridho Amalan Saufi, and Suandro Mangihut Manik, "Analisis Potensi Pemanfaatan Energi Matahari Melalui Panel Surya di Kota Medan," *Sos. J. Ilm. Pendidik. IPS*, vol. 3, no. 3, pp. 01–11, 2025, doi: 10.62383/sosial.v3i3.967.
- [3] A. F. Nurhasanah, S. Sudarti, and Y. Yushardi, "Kajian Perubahan Iklim Terhadap Efisiensi Panel Surya Sebagai Sumber Energi Alternatif Di Indonesia," *Opt. J. Pendidik. Fis.*, vol. 7, no. 2, pp. 366–375, 2023, doi: 10.37478/optika.v7i2.3284.
- [4] R. Rahmani, K. Khairul, and A. Junaidi, "Model and Analysis of Photovoltaic Modules with Irradiation and Temperature Variations using Simulation Technology," *Procedia Eng. Life Sci.*, vol. 4, 2023, doi: 10.21070/pels.v4i0.1386.
- [5] I. G. A. Gunadi, Dewi Oktofa Rachmawati, Sonia Dewi Parna.T, Bella Eka Wahyuningtias, and Ni ketut Lisa Maheni, "A Review: Proses Konversi Energi, Tantangan dan Peluang Pemanfaatan Energi Matahari Sebagai Alternatif Energi Terbarukan," *Wahana Mat. dan Sains J. Mat. Sains, dan Pembelajarannya*, vol. 18, no. 3, pp. 44–55, 2025, doi: 10.23887/wms.v18i3.90888.
- [6] Sandra Dewi, Annisya Agustina, Zauzza Stabita, and Bintang Purba, "Analisis Pengaruh Radiasi Matahari Terhadap Cahaya yang Dihasilkan oleh Panel Surya," *Edukasi Elit. J. Inov. Pendidik.*, vol. 2, no. 1, pp. 276–281, 2024, doi: 10.62383/edukasi.v2i1.1032.
- [7] M. Hartanti and D. Amilian, "Efek Fotolistrik dan Aplikasinya Dalam Teknologi Surya," *J. Sci. Technol. Alpha*, vol. 1, no. 2, pp. 48–54, 2025, doi: 10.70716/alpha.v1i2.174.
- [8] M. A. Rahmanta, A. Syamsuddin, F. Tanbar, and N. Damanik, "Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV) Untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) Di Indonesia," *J. Offshore Oil, Prod. Facil. Renew. Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 22–33, 2023, doi: 10.30588/jo.v7i1.1509.
- [9] M. Karjadi, "Optimalisasi Efisiensi Panel Surya dalam Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Skala Rumah Tangga," *Ranah Res. J. Multidiscip. Res. Dev.*, vol. 7, no. 4, pp. 3002–3010, 2025, doi: 10.38035/rrj.v7i4.1579.
- [10] R. H. Pramana, W. K. Najila, A. N. Fauziati, S. Hidayat, and D. W. Kahar, "Systematic Literature Review : Efektivitas Teknologi Pembersihan Panel Surya Otomatis dalam Meningkatkan Efisiensi Energi di Area Berdebu," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 6, no. 1, pp. 14–42, 2026, doi: 10.14710/jebt.2025.25074.
- [11] A. F. Ahmad, N. D. Fajarningrum, R. M. Sulistiyo, and A. R. Saleh, "Analisis Potensi Kerusakan Akibat Erosi pada Cyclone Separator Akibat Aliran Pasir Steel Grit dengan Metode Computational Fluid Dynamics," *J-Protksion J. Kaji. Ilm. dan Teknol. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 2, pp. 170–177, 2026.
- [12] A. A. Sinaga, D. Silvia, D. Arianti, J. A. Sinaga, O. Siska, and R. Purba, "Curah Hujan di Indonesia," *J. Intelek dan Cendekiawan Nusantara*, vol. 2, no. 6, pp. 11497–11504, 2025, [Online]. Available: <https://jicnusantara.com/index.php/jicn>
- [13] M. E. Wahyudi *et al.*, "Analisis Pengaruh Cuaca terhadap Kualitas Berbagai Jenis Tembakau. Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan," *J. Ilm. Wahana Pendidik.*, vol. 10, no. 11, pp. 448–453, 2024.
- [14] C. Amelia *et al.*, "Analisis Sebaran Nuri Maluku, Kakatua Seram, Pohon Torem & Pakis Binaiya Ditinjau dari Kondisi Fisiografis dan Iklim Tropis di Kepulauan Maluku," *MUDABBIR J. Res. Educ. Stud.*, vol. 5, no. 2, pp. 3483–3496, 2025.
- [15] M. I. Hidayatullah, P. Jannus, and B. Nainggolan, "Analisa Soiling Debu PLTS On-Grid di Gedung Administration PT PLN Indonesia Power UBP Suralaya," in *Seminar Nasional Teknik Mesin*, 2024, pp. 594–599. [Online]. Available: <http://prosiding.pnj.ac.id>