

TESIS

**SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN PENENTUAN JADWAL
PERAWATAN PERIODIK PANEL SURYA MELALUI METODE
PEMANTAUAN AMBANG BATAS PARAMETER DAN KLASIFIKASI
WAKTU**

*Decision Support System for Scheduling Periodic Solar Panel Maintenance
Using Threshold Parameter Monitoring and Time Classification*

HARIS MUKASIR

D032211005



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

Optimized using
trial version
www.balesio.com

PENGAJUAN TESIS

**SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN PENENTUAN JADWAL
PERAWATAN PERIODIK PANEL SURYA MELALUI METODE
PEMANTAUAN AMBANG BATAS PARAMETER DAN KLASIFIKASI
WAKTU**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Ilmu Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

HARIS MUKASIR

D032211005

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**



TESIS

SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN PENENTUAN JADWAL PERAWATAN PERIODIK PANEL SURYA MELALUI METODE PEMANTAUAN AMBANG BATAS PARAMETER DAN KLASIFIKASI WAKTU

HARIS MUKASIR

D032211005

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 28 Agustus 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal A. Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.
NIP. 19750605 200212 1 004

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Ir. Andani Achmad, MT.
NIP. 19601231 198703 1 022

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Ketua Program Studi
S2 Teknik Elektro



Optimized using
trial version
www.balesio.com

Muhammad Isran Ramli, ST.,MT.,IPM.,ASEAN Eng.
NIP. 1976200012 1 002

Dr. Eng. Ir. Wardi, ST. M.Eng.
NIP. 19720828 199903 1 003

**PERNYATAAN KEASLIAN TESIS
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Haris Mukasir

Nomor Mahasiswa : D032211005

Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Sistem Pendukung Keputusan Penentuan Jadwal Perawatan Periodik Panel Surya Melalui Metode Pemantauan Ambang Batas Parameter dan Klasifikasi Waktu” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr.-Ing.Ir.Faizal Arya Samman, ST,MT, IPU, ACPE. dan Prof. Dr. Ir. Andani Achmad, MT.). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam daftar pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan diprosiding *2023 International Conference on Modeling & E-Information Research, Artificial Learning and Digital Applications (ICMERALDA)* sebagai artikel dengan judul “*Predictive Maintenance System Using Support Vector Machine Algorithm for Dust Cleaning on Solar Panels*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 28 Agustus 2024

Yang menyatakan



Haris Mukasir

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis bisa menyelesaikan penulisan tesis ini. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW, yang merupakan suri tauladan bagi umat manusia.

Penyusunan tesis ini merupakan langkah penting dalam perjalanan akademik penulis, begitu banyak bantuan dan dukungan yang diterima penulis dari berbagai pihak, untuk itu dalam kesempatan ini penulis dengan penuh ketulusan ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, bapak Mukasir A, S.E dan ibu Rahmatia, S.Ag. serta saudara, Sitti Maulidya, S.H dan Hasbi Mukasir, S.Kom. Terima kasih atas kasih sayang dan dukungan selama ini.
2. Bapak Prof. Dr.-Ing.Ir.Faizal Arya Samman, ST,MT, IPU, ACPE., selaku pembimbing I, atas motivasi, bimbingan dan inspirasi dengan ide-ide yang visioner dan Bapak Prof. Dr. Ir. Andani Achmad, MT. selaku pembimbing II, atas bimbingan dan waktu yang telah diberikan sehingga penyusunan tesis ini dapat diselesaikan.
3. Bapak Dr. Eng. Ir. Wardi, ST. M.Eng., Selaku dewan penguji dan Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
4. Bapak Muh Anshar, ST. M.Sc(Research), Ph.D. dan Ibu Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T, M.T., sebagai dewan penguji, terima kasih atas masukan dan arahan dalam penyelesaian tesis ini.
5. Rektor Universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi dalam menempuh program magister.
6. Segenap Dosen Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan.... Serta segenap Pegawai Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang senantiasa membantu dalam pengurusan administrasi.
Maya Itasari, S.T.,M.T., atas bantuan dan dukungan moril selama proses penelitian.



8. Teman seperjuangan Muhammad Hasim Yusuf, S.T., atas bantuan dan dukungan selama proses penelitian.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan untuk kesempurnaan tesis ini. Semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan menjadi pijakan bagi penelitian-penelitian selanjutnya.

Akhir kata, dengan penuh kerendahan hati. Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan semakin memperkaya khazanah ilmu pengetahuan.

Penulis

Haris Mukasir



ABSTRAK

HARIS MUKASIR. Sistem Pendukung Keputusan Penentuan Jadwal Perawatan Periodik Panel Surya Melalui Metode Pemantauan Ambang Batas Parameter dan Klasifikasi Waktu (dibimbing oleh **Faizal Arya Samman, Andani Achmad**).

Meningkatnya kebutuhan energi dalam peradaban yang maju menyebabkan eksploitasi berbagai sumber energi konvensional. Sumber energi konvensional juga dapat menyebabkan emisi gas rumah kaca dan kerusakan lingkungan. Energi terbarukan, khususnya energi surya, menawarkan solusi efektif untuk masalah ini. Namun, salah satu tantangan utama dalam pemanfaatan energi surya adalah akumulasi debu pada permukaan panel surya, yang dapat mengurangi efisiensi dan meningkatkan biaya pemeliharaan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan terhadap kondisi panel surya. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi biaya pemeliharaan dengan memberikan pemantauan yang akurat terhadap kondisi panel surya. Metode yang digunakan melibatkan integrasi nilai ambang batas dan pendekatan berbasis waktu. Pengambilan dataset dari pengukuran tegangan dan intensitas cahaya panel surya digunakan untuk menetapkan nilai ambang batas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa akumulasi debu secara signifikan menurunkan tegangan keluaran panel surya meskipun intensitas cahaya tetap sama. Pada kondisi tanpa debu, tegangan mencapai 13,16 V dengan intensitas cahaya 54.612,5 lux, sementara pada kondisi dengan debu, tegangan menurun menjadi 11,91 V. Pengujian sistem yang dikembangkan mampu mendeteksi kondisi panel surya dengan akurasi 100%, sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Penggunaan nilai ambang batas yang disesuaikan dengan waktu juga terbukti efektif, dengan tegangan ambang batas ditetapkan sebesar 12,10 V pada siang hari dan secara bertahap menurun di sore hari. Sistem yang dihasilkan dapat diandalkan dalam mendeteksi penurunan kinerja panel surya akibat akumulasi debu, sehingga membantu memaksimalkan pemeliharaan dengan pengambilan keputusan yang tepat waktu. Hal ini berpotensi mengurangi frekuensi pembersihan yang tidak perlu serta menekan biaya operasional pemeliharaan panel surya. Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas pemeliharaan panel surya, serta mendukung upaya global dalam pemanfaatan energi terbarukan yang berkelanjutan.

Kata Kunci: energi surya, akumulasi debu, pengambilan keputusan, efisiensi operasional, nilai ambang batas



ABSTRACT

HARIS MUKASIR. *Decision Support System for Scheduling Periodic Solar Panel Maintenance Using Threshold Parameter Monitoring and Time Classification* (supervised by **Faizal Arya Samman, Andani Achmad**).

The increasing demand for energy in an advanced civilization has led to the exploitation of various conventional energy sources. Conventional energy sources contribute to greenhouse gas emissions and environmental degradation. Renewable energy, particularly solar energy, offers an effective solution to these challenges. However, one of the main obstacles in utilizing solar energy is the accumulation of dust on the surface of solar panels, which can reduce efficiency and increase maintenance costs. This research aims to design and implement a monitoring system for the condition of solar panels, aimed at improving operational efficiency and reducing maintenance costs by providing accurate monitoring of solar panel conditions. The method employed involves integrating threshold values and a time-based approach. Data collected from voltage and light intensity measurements of the solar panels are used to determine the threshold values. The research findings indicate that dust accumulation significantly reduces the output voltage of solar panels even though the light intensity remains the same. In dust-free conditions, the voltage reached 13.16 V with a light intensity of 54,612.5 lux, whereas under dusty conditions, the voltage dropped to 11.91 V. The developed system was able to detect the condition of the solar panels with 100% accuracy, matching the actual field conditions. The use of time-adjusted threshold values also proved effective, with a threshold voltage set at 12.10 V during the day and gradually decreasing in the afternoon. The resulting system is reliable in detecting performance degradation of solar panels due to dust accumulation, helping to optimize maintenance through timely decision-making. This has the potential to reduce unnecessary cleaning frequency and lower the operational costs of solar panel maintenance. This research significantly contributes to improving the efficiency and effectiveness of solar panel maintenance, supporting global efforts in the sustainable utilization of renewable energy.

Keywords: solar energy, dust accumulation, decision-making, operational efficiency, threshold values



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN TESIS.....	ii
PERSETUJUAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Ruang lingkup Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait	5
2.2 Energi Matahari	8
2.3 Pemeliharaan Panel Surya	8
2.4 Monitoring Panel Surya	13
2.5 Pengaruh Debu terhadap Efisiensi Panel Surya.....	14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	16
3.1 Desain Penelitian.....	16
3.2 Perancangan Sistem.....	17
3.2.1 Desain Perangkat Keras.....	17
3.2.2 Desain Perangkat Lunak.....	21
Cara Kerja Sistem	22
Instrumen Penelitian	24



3.5	Penentuan Nilai Ambang Batas Berdasarkan Waktu	24
3.6	Logika Kondisi Sistem	25
3.7	Teknik Pengujian	27
3.8	Teknik Pengumpulan Data	27
3.9	Teknik Analisis Data	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		29
4.1	Hasil Perancangan Sistem	29
3.1.1	Hasil Perancangan Perangkat Keras	29
3.1.2	Hasil Perancangan Perangkat Lunak	31
4.2	Hasil Pengujian Integrasi Sistem	32
4.3	Pengembangan dan Implementasi Sistem	32
4.3.1	Pengumpulan Dataset	32
4.3.2	Penerapan Nilai Ambang Batas	36
4.3.3	Penerapan Logika Kondisi	37
4.3.4	Hasil Pengujian dan Evaluasi Sistem	37
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		40
5.1	Kesimpulan	40
5.2	Saran	40
DAFTAR PUSTAKA		42
LAMPIRAN		45



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Konsep pembersihan berbasis aliran udara paksa (Kazem et al., 2020)	10
Gambar 2 Sistem pembersihan air panel surya otomatis (Kazem et al., 2020) ...	12
Gambar 3 Pembersihan Manual (Kazem et al., 2020)	12
Gambar 4 PV yang dibersihkan secara otomatis (Kazem et al., 2020)	13
Gambar 5 Akumulasi Debu pada Modul PV (Nezamisavojbolaghi <i>et al.</i> , 2023).	15
Gambar 6 Diagram Alir Tahapan Penelitian	16
Gambar 7 Kerangka Kerja Sistem.....	17
Gambar 8 Blok Diagram Sistem	18
Gambar 9 Skematik Sistem.....	19
Gambar 10 Blok diagram alur data desain <i>website</i>	21
Gambar 11 Diagram alir Kerja Sistem	23
Gambar 12 Hasil Akhir Rancangan Fisik Panel Surya	30
Gambar 13 Sistem Kontrol	30
Gambar 14 Tampilan Antarmuka <i>Website</i>	31
Gambar 15 Grafik dataset kondisi tanpa debu	33
Gambar 16 Grafik dataset pemberian debu	34
Gambar 17 Penerapan nilai ambang batas	36
Gambar 18 Penerapan logika kondisi.....	37
Gambar 19 Tampilan <i>website</i> kondisi normal	38
Gambar 20 Tampilan <i>website</i> kondisi tidak normal.....	38



DAFTAR TABEL

Tabel 1 <i>State of the art</i>	5
Tabel 2 Spesifikasi <i>Arduino Nano</i>	19
Tabel 3 Spesifikasi <i>ESP32</i>	20
Tabel 4 Spesifikasi Sensor <i>ACS712</i>	20
Tabel 5 Sensor Tegangan <i>DC</i>	20
Tabel 6 Spesifikasi Sensor <i>BH1750</i>	20
Tabel 7 Panel Surya.....	20
Tabel 8 Spesifikasi <i>Solar control charger (SCC) PWM</i>	21
Tabel 9 Spesifikasi baterai.....	21
Tabel 10 Logika Kondisi Sistem.....	26
Tabel 11 Hasil Pengujian Integrasi Sistem.....	32
Tabel 12 Dataset kondisi tanpa debu.....	33
Tabel 13 Dataset kondisi dengan debu.....	34
Tabel 14 Hasil keputusan sistem.....	39



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Proses pembuatan rangka dan perakitan komponen ..	45
Lampiran 2 Dokumentasi proses pengambilan data	46
Lampiran 3 Kode program <i>Mikrokontroller</i>	47
Lampiran 4 Kode Program <i>Website</i>	50
Lampiran 5 Tampilan website kondisi malam hari.....	56



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya kebutuhan energi dalam peradaban yang maju menyebabkan eksploitasi berbagai sumber energi konvensional. Sumber energi konvensional juga dapat menyebabkan emisi gas rumah kaca dan kerusakan lingkungan lainnya (Awasthi, et al., 2020). Energi Terbarukan adalah solusi efektif yang tersedia saat ini. Diantara sumber daya tersebut, energi surya sangat menjanjikan (Akhtar *et al.*, 2021). Teknologi energi surya telah mendapatkan perhatian yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Pembangkit listrik berbasis energi surya tidak hanya mengatasi masalah lingkungan tetapi juga meningkatkan keamanan energi dan mengurangi efek yang dihasilkan oleh pembangkit listrik konvensional. Perhatikan bahwa emisi energi matahari adalah $3,8 \times 10^{23}$ kW/s. Namun, hanya sejumlah kecil sekitar $1,8 \times 10^{14}$ kW yang dicegat oleh bumi karena letak bumi sekitar 150 juta km (Shufat, et al., 2019). Penyinaran matahari cenderung berubah sebagian besar sepanjang hari, perbedaan dapat dilihat antara jam sinar matahari awal dan selama jam sibuk (Phoolwani *et al.*, 2020). Sel fotovoltaik mengubah radiasi sinar matahari menjadi energi listrik ketika sinar matahari mengenai permukaannya. Untuk menjadi kompetitif dengan sumber energi konvensional, biaya produksi energi surya harus dikurangi dan sistem harus efisien. Efisiensi proses konversi energi secara langsung berkaitan dengan berbagai faktor seperti jenis sel fotovoltaik, orientasi dan sudut kemiringan modul, jenis instalasi, lokasi, suhu sel dan pengendapan debu pada permukaan modul (Unluturk, et al., 2019). Namun demikian, salah satu tantangan pada panel surya yaitu akumulasi debu pada permukaannya yang dianggap sebagai salah satu faktor signifikan yang sangat mempengaruhi kinerjanya dan mengakibatkan penurunan efisiensi serta peningkatan biaya produksi energi. Seperti yang dilaporkan dalam penelitiannya, pengendapan debu dapat menyebabkan pengurangan listrik lebih dari hari dan dapat mencapai hingga 80% per bulan tergantung pada kondisi ususnya pada kondisi iklim kering dan semi kering dengan radiasi tinggi (et al., 2020a). Oleh karena itu, pemeliharaan rutin menjadi sangat penting



untuk memastikan kinerja optimal dari panel surya dengan mengembangkan teknik yang terus memantau dengan tepat dan mendeteksi pembentukan *hotspot* serta memantau perubahan arus, tegangan, daya keluaran, efisiensi dan faktor pengisian di bawah kondisi yang berbeda (Akhtar, et al., 2021).

Pemeliharaan preventif yang dilakukan secara rutin untuk pencegahan sering kali tidak efisien, karena tidak memperhitungkan kondisi aktual debu pada panel. Hal ini dapat menyebabkan biaya operasional tinggi dan waktu henti yang tidak diperlukan. Menjaga kebersihan permukaan modul adalah kunci untuk menjaga daya yang dihasilkan panel surya. Partikel debu pada permukaan modul menyebabkan hilangnya optik dan pengurangan cahaya yang diserap oleh panel surya, terutama di lingkungan gersang (Oh, 2019). Oleh karena itu, kebersihan permukaan panel menjadi salah satu aktifitas pemeliharaan pokok pada pengoperasian panel surya. Dengan melakukan *monitoring* terhadap panel surya secara *real time* sangat diperlukan untuk melihat kondisi panel surya tersebut.

Banyak sistem *monitoring* terhadap pemeliharaan panel surya telah dikaji sebelumnya. Misalnya, penelitian yang dilakukan oleh Rouibah et al. (2019) menggunakan teknologi *Internet of Things (IoT)* untuk memantau data seperti tegangan *PV*, arus *PV*, tegangan beban, arus beban dan *duty cycle* secara *real-time* melalui di situs web. Teknologi ini memungkinkan peningkatan pemantauan, kinerja, dan pemeliharaan fotovoltaiik. Sistem yang dirancang dapat menganalisis dan memeriksa status parameter yang diukur dalam sistem fotovoltaiik, serta mengontrol perubahan daya keluaran maksimum secara *online*, dengan semua data disimpan menggunakan sistem manajemen *database MySQL*. Penelitian lain yang juga membahas tentang monitoring panel surya dilakukan oleh LÓpez-Vargas, Fuentes and Vivar (2018). Dalam penelitian ini, konsep *Internet of Things (IoT)* digunakan dalam sistem pengukuran yang memungkinkan pemantauan sistem *fotovoltaiik off-grid* kecil melalui *web*, yang meningkatkan kinerja dan pemeliharaan sistem. *Datalogger* dirancang untuk mengukur radiasi, suhu lingkungan, kelembaban, kecepatan angin, dan curah hujan. Hasil dari penelitian ini



dapat kemampuan untuk memantau parameter listrik biaya rendah, tegangan keluaran *fotovoltaiik*, tegangan baterai, tegangan beban, arus *fotovoltaiik*, arus baterai, dan arus beban secara *real-time* melalui *web*.

Berdasarkan uraian diatas, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem *monitoring* kondisi panel surya dengan metode pengambilan keputusan yang efisien dan akurat dalam mendeteksi perubahan tegangan akibat akumulasi debu pada permukaan panel surya. Pendekatan ini diharapkan tindakan pembersihan atau pemeliharaan secara tepat waktu, mengurangi kerugian efisiensi dan biaya operasional. Pendekatan ini menjanjikan penghematan biaya dibandingkan pemeliharaan yang tidak menggunakan sistem *monitoing* kondisi panel surya, karena pemeliharaan akan dilakukan hanya jika diperlukan ketika kondisi panel tidak normal. Dengan demikian, penelitian ini akan memberikan kontribusi yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas pemeliharaan panel surya serta mendukung upaya global dalam pemanfaatan energi terbarukan yang berkelanjutan. Adapun judul dari penelitian ini, yaitu “Sistem Pendukung Keputusan Penentuan Jadwal Perawatan Periodik Panel Surya Melalui Metode Pemantauan Ambang Batas Parameter dan Klasifikasi Waktu”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem pemantauan kondisi panel surya terhadap akumulasi debu pada permukaan panel surya?
2. Bagaimana dampak akumulasi debu terhadap perubahan tegangan luaran panel surya?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Merancang sistem pemantauan kondisi panel surya terhadap akumulasi debu pada permukaan panel surya.
2. Menguji dampak akumulasi debu terhadap perubahan tegangan luaran panel surya.



Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat yang signifikan dalam dua aspek. Pertama, praktis, penelitian ini diharapkan dapat meminimalisir biaya pemeliharaan

panel surya dengan memberikan informasi pemantauan waktu yang efektif untuk melakukan pemeliharaan berdasarkan hasil informasi dari pemantauan kondisi panel surya. Kedua, dari sudut pandang akademis, penelitian ini dapat menjadi referensi untuk penelitian yang serupa di masa depan atau dapat dikembangkan lebih lanjut, serta memberikan kontribusi pada perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam memajukan peradaban dan kesejahteraan manusia.

1.5 Ruang lingkup Penelitian

Dalam penelitian ini, pembahasan akan dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Sistem pengambilan keputusan kondisi dengan tampilan pemantauan *website*.
2. Anomali yang digunakan dalam pengujian berupa debu pada permukaan panel surya.
3. Parameter yang dievaluasi dalam sistem ini meliputi tegangan, intensitas cahaya, dan waktu pengukuran.
4. Setiap rentang waktu memiliki ambang batas tersendiri untuk tegangan dan intensitas cahaya yang dianggap sebagai kondisi normal.
5. Tidak membahas mengenai cara pemeliharaan langsung secara fisik.
6. Sistem yang dirancang untuk membantu dalam memaksimalkan *preventive maintenance*.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Penelitian ini merupakan tindak lanjut dari penelitian sebelumnya terkait pengembangan sistem *monitoring* yang dapat memberikan informasi yang akurat terkait kondisi panel surya untuk melakukan tindakan pemeliharaan. Pada tabel 1 di bawah ini memperlihatkan *state of the art* mengenai perkembangan penelitian teknologi pemeliharaan pada panel surya dengan fokus penelitian penggunaan *machine learning* untuk pemeliharaan *preventive*.

Tabel 1 *State of the art*

No	Judul	Metode	Hasil	Referensi
1	<i>Real-time Solar Array Data Acquisition and Fault Detection using Neural Networks</i>	Algoritma Neural Network dengan smart monitoring device (SMD) untuk pengukuran arus dan tegangan secara real time.	Hasil concrete NN dropout memiliki kinerja terbaik dengan akurasi pelatihan dan pengujian masing-masing sebesar 92,52% dan 92,23%.	(Rao, et al., 2023)
2	<i>Anomaly detection using K-Means and long-short term memory for predictive maintenance of large-scale solar (LSS) photovoltaic plant</i>	K-Means untuk clustering dan Long-Short Term Memory (LSTM) untuk mendeteksi anomaly.	Metode LSTM mengidentifikasi anomali dalam prediksi arus keluaran modul string dengan lebih akurat dan dengan kesalahan relatif lebih rendah dibandingkan teknik ANN konvensional.	(Zulfauzi, et al., 2023)
3	<i>Research on Fault Diagnosis of Photovoltaic Array Based on Random Forest Algorithm</i>	Menggunakan <i>algoritme Random Forest</i> untuk mendeteksi kesalahan penyusunan pada fotovoltaik.	Penggunaan <i>Random Forest</i> dapat mendeteksi lima kesalahan: open circuit, short circuit, hotspot, abnormal aging, dan partial shadow dengan akura	(Yun, et al., 2021)
4	<i>Machine learning for monitoring and classification in inverters from solar photovoltaic energy plants</i>	<i>Machine learning</i> untuk monitoring inverter panel surya untuk mengklasifikasikan, memprediksi kesalahan, dan untuk analisis keandalan pada inverter.	<i>Algoritme machine laerning</i> menampilkan pola pada subsistem inverter untuk pemantauan dan pemeliharaan yang lebih baik.	(Pereira & Silva, 2024)
5	<i>Creation of an Internet of Things (IoT) system for the live and remote monitoring of solar photovoltaic plants.</i>	Sistem ini menggunakan sensor konvensional (sensor suhu, arus, tegangan, dan daya) dan IoT-enabled cloud database	Efisiensi sistem ini mencapai 95%, memastikan pemanfaatan energi terbarukan secara efektif.	(Mostofa & Islam, 2023)
	<i>Advanced solar panel fault and maintenance prediction using decision tree with</i>	Menggunakan algoritma DT-LGB (Decision Trees with Light Gradient Boosting) yang disarankan untuk menganalisis data daya dan	Model yang disarankan memperoleh nilai 8,74 MSEs ((Mean Square Errors), 2,96 RMSEs (Root Mean Square Errors), dan	(Lakshmi P, et al., 2023)



	<i>light gradient boosting</i>	memprediksi kesalahan untuk pemeliharaan pembangkit listrik tenaga surya	nilai R2 sebesar 0,9939 yaitu masing-masing meningkat 12,8%, 6,8%, dan 11,08% dibandingkan metode yang sudah ada.	
7	<i>Intelligent solar panel monitoring system and shading detection using artificial neural networks</i>	Menggunakan teknologi Artificial Neural Network (ANN) untuk deteksi bayangan dan kesalahan pv dan ZigBee, Wi-Fi dan LoRa untuk komunikasi di antarmuka python secara real time	Teknologi ANN secara akurat mendeteksi bayangan dan kesalahan lainnya, sedangkan platform IoT memungkinkan pemantauan jarak jauh dan analisis data.	(Abdallah et al., 2023)
8	<i>Smart Solar Energy Monitor Using ESP 32 Controller</i>	Menggunakan teknologi internet of things, Esp32, untuk mengukur arus, tegangan dan daya dengan tampilan Platform Blynk IoT	Melakukan pemantauan cerdas dan menampilkan pemanfaatan energi terbarukan sehari-hari. Ini membantu pengguna menganalisis penggunaan energi.	(Babu et al., 2023)
9	<i>A low-cost digital twin for real-time monitoring of photovoltaic panels</i>	Menggunakan metode digital twin (DT) dan eksplisit dari Single Diode Model (SDM) berdasarkan fungsi Lambert W dan menggunakan metode berbasis fungsi Lambert W eksplisit untuk menghitung kurva karakteristik I-V dan P-V panel PV.	Akurasi tinggi dengan kesalahan rendah dibandingkan data IoT. DT memungkinkan deteksi anomali dan perbandingan <i>real-time</i> perilaku yang diharapkan dan aktual.	(Hueros-Barrios et al., 2023)
10	<i>Sistem Deteksi Debu dan Kotoran pada Permukaan Panel Surya Menggunakan Algoritme Reduced Random Forest</i>	Menggunakan Algoritma <i>Reduced Random Forest</i>	Hasil implementasi dengan akurasi 99% dalam mendeteksi anomali pada panel surya.	(Martati, 2023)
11	<i>Energy yield database management system based on solar photovoltaic cells using internet of things technology</i>	<i>ESP32, sensor Hall-effect, thingsboard, mean squared error</i> dan analisis persamaan regresi linier.	Mampu prediksi kinerja sistem pembangkit listrik fotovoltaik dan peringatan pemeliharaan tepat waktu	(Boonnam and Lanteng, 2024)

Penelitian mengenai pemantauan dan pemeliharaan panel surya telah dilakukan dengan berbagai pendekatan dan teknologi. Misalnya, Rao et al. (2023) menggunakan *Neural Network* untuk akuisisi data dan deteksi kesalahan secara *real-time* pada panel surya, dengan hasil akurasi yang sangat tinggi. Kemudian Martati (2023) mengembangkan sistem deteksi debu dan kotoran pada permukaan panel surya menggunakan *algoritme Reduced Random Forest*, yang mencapai 99% dalam mendeteksi anomali pada panel surya. Zulfauzi et al. (2023) menggunakan metode *K-Means* dan *LSTM* untuk mendeteksi anomali dalam prediksi



arus listrik, menunjukkan kesalahan relatif yang lebih rendah dibandingkan metode *ANN* konvensional.

Yun et al. (2021) menerapkan algoritma *Random Forest* untuk mendeteksi berbagai jenis kesalahan pada *fotovoltaik*, seperti *open circuit* dan *short circuit*, dengan akurasi tinggi. Pereira dan Silva (2024) menggunakan *machine learning* untuk memantau dan mengklasifikasikan kesalahan pada *inverter* panel surya, memberikan alarm pada nilai ekstrem untuk meningkatkan pemeliharaan.

Mostofa dan Islam (2023) mengembangkan sistem *IoT* untuk pemantauan jarak jauh fasilitas *fotovoltaik*, mencapai efisiensi hingga 95%. Kemudian Abdallah et al. (2023) menggunakan *ANN* untuk deteksi bayangan dan kesalahan lainnya pada panel surya, dengan komunikasi *real-time* melalui *ZigBee*, *Wi-Fi* dan *LoRa*. Babu et al. (2023) memanfaatkan teknologi *IoT* dengan *ESP32* untuk pemantauan cerdas dan analisis penggunaan energi terbarukan sehari-hari. Hueros-Barrios et al. (2023) mengimplementasikan metode *digital twin* untuk pemantauan *real-time* panel *PV*, mengurangi kesalahan dibandingkan data perangkat *IoT*.

Boonnam dan Lanteng (2024) mengembangkan sistem manajemen *database* hasil energi dengan *ESP32* dan sensor *Hall-effect split-core*, menampilkan data di *Thingsboard* dan menggunakan *regresi linier* untuk memprediksi kinerja dan memberikan peringatan pemeliharaan tepat waktu.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, penelitian ini akan merancang sistem pemantauan kondisi panel surya menggunakan metode nilai ambang batas dan klasifikasi waktu yang diimplementasikan melalui *website*. pembuatan sistem ini, akan mengumpulkan data historis terlebih dahulu untuk menentukan nilai ambang batas berdasarkan waktu, misalnya dari jam 08:00-10:00 dan seterusnya, serta menggunakan *ESP32* untuk mengirimkan data ke *server web*.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih efektif dan efisien dalam memantau kinerja panel surya secara *real-time*, serta mengurangi biaya operasional melalui informasi kondisi yang akurat untuk kegiatan pemeliharaan yang akan dilakukan diwaktu yang tepat.



2.2 Energi Matahari

Energi matahari adalah sumber energi yang gratis, berlimpah dan bersih (Unluturk, Kulaksiz and Unluturk, 2019). Energi matahari memasok energi ke bumi dalam bentuk radiasi. Sistem energi surya terkena jumlah sinar matahari yang berbeda, yang mengontrol jumlah daya yang dihasilkan oleh sistem konversi energi surya. Dengan kata lain, sistem menghasilkan lebih banyak daya ketika terkena sinar matahari dalam jumlah yang lebih besar. Setiap tahun ada sekitar $3,9 \times 10^{24}$ J ($1,08 \times 10^{18}$ kWh). Sepanjang tahun, jarak antara matahari dan bumi bervariasi antara $(1,47-1,52) \cdot 10^8$ km. Akibatnya, irradiasi berfluktuasi antara 1,325–1,412 W/m². Atmosfer bumi menarik kembali dan mengurangi radiasi matahari melalui proses refleksi, penyerapan (ozon, uap air, oksigen dan karbon dioksida) dan hamburan (molekul udara, partikel debu atau polusi). Untuk cuaca cerah pada siang hari, radiasi yang mencapai permukaan bumi adalah 1 W/m² (Samaulah *et al.*, 2018). Dengan memanfaatkan radiasi matahari yang berlimpah dan gratis secara alami, teknologi fotovoltaik surya (PV) menjadi sistem pengumpulan energi bersih yang paling menjanjikan dan teknologi energi terbarukan yang tumbuh paling cepat karena penurunan harga yang mencolok dan nol kebisingan selama operasi (Darwish, Sopian and Fudholi, 2021).

2.3 Pemeliharaan Panel Surya

Panel surya adalah peralatan utama sistem pembangkit listrik tenaga surya yang berfungsi untuk mengkonversikan energi cahaya matahari menjadi energi listrik secara langsung. Besar daya keluaran yang dihasilkan dari proses konversi tersebut ditentukan oleh beberapa kondisi lingkungan. Kondisi lingkungan yang selalu berubah-ubah setiap waktu menyebabkan daya keluaran panel surya juga ikut berfluktuasi (Sinaga and Prabowo, 2018).

Sel surya mendapatkan efisiensi tergantung pada jumlah radiasi matahari tetapi tidak pada suhu. Padahal, suhu tinggi justru dapat merusak panel surya dan juga dapat mengakibatkan titik panas. Hanya satu titik panas dapat menyebabkan tidak berfungsinya beberapa sel, karena sel surya dikonfigurasi dalam *string*. Menghilangkan ini, semua kontak listrik harus diubah dan bayangan harus dihindari. Untuk mencapai *output* daya yang optimal, perawatan panel menjadi sangat penting (Kadiyan, Pandey and akash, 2018). Biasanya, iklim yang lebih



kering meninggalkan endapan kotoran yang signifikan sehingga pembersihan mekanis diperlukan untuk mempertahankan kinerja yang optimal. Masalah ini tidak begitu terlihat di daerah dengan curah hujan yang signifikan karena hujan cenderung membersihkan panel surya (Bosman *et al.*, 2020). Di lingkungan berdebu, kotoran menjadi perhatian utama. Dalam kasus sistem komersial besar, beberapa pembersihan per tahun akan diperlukan, yang akan menjadi sangat mahal dan bahkan dapat menurunkan motivasi beralih ke panel surya. Seseorang dapat mengatasi masalah kotoran dengan lebih rajin dan meminta pembersihan panel sebagai bagian dari garansi. Terlihat bahwa panel dengan sudut kemiringan kurang dari 5 derajat mengalami lebih banyak kotoran. Di lingkungan yang sangat berdebu, akan bermanfaat untuk memiliki sudut kemiringan yang lebih besar, meskipun penyinaran matahari lebih banyak jika sudut kemiringan kurang dari 5 derajat. Pembersihan panel sangat penting untuk mempertahankan keluaran energi yang sangat baik. Agar efektif secara ekonomi, algoritma harus digunakan mengenai seberapa sering panel harus dibersihkan. Seseorang harus membersihkan panel ketika total biaya energi yang hilang menjadi lebih besar daripada biaya pembersihan. Untuk menghitung energi yang hilang, kita harus membandingkan energi aktual yang dihasilkan dengan produksi yang diharapkan. Jika biaya energi yang hilang ditemukan lebih dari biaya pembersihan panel, panel dapat dibersihkan (Kadiyan, Pandey and akash, 2018).

Salah satu cara termudah untuk membersihkan PV adalah pembersihan manual, yang mengandalkan air untuk menghilangkan debu yang terkumpul di PV. Penggunaan metode tradisional ini membutuhkan tenaga kerja selain biayanya yang tinggi, terutama ketika air bersih langka dan kadang-kadang tidak tersedia. (Alvarez, Al-Sumaiti and Rivera, 2020) menyelidiki frekuensi dan biaya metode pembersihan. Studi tersebut mengusulkan metodologi pembersihan untuk memilih strategi terbaik yang berkaitan dengan biaya, efisiensi peralatan, dan parameter sistem lainnya. Sebagian besar PV dilapisi dengan kaca borosilikat yang dikeraskan, yang mudah dibersihkan dengan air. Pada PV yang baru diproduksi,

at digunakan untuk membantu menyerap cahaya dan mengurangi as, tetapi bahkan permukaan ini juga rentan terhadap akumulasi dan nanopartikel halus dan juga memerlukan pembersihan yang efektif.

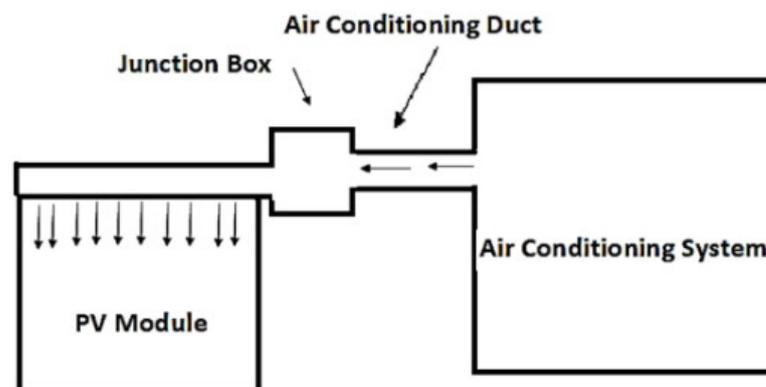


Metode pembersihan saat ini termasuk cara manual dan semi-otomatis yang membutuhkan sejumlah besar air dan tenaga kerja yang berat, sehingga meningkatkan biaya.

Ada banyak metode pembersihan PV, termasuk manual, mekanis, kimia, elektrostatis, dan bahkan penggunaan manusia, dan beberapa metode ini mungkin efektif di beberapa daerah tetapi mungkin tidak efektif di daerah lain. Selain itu, beberapa metode ini mungkin mempercepat proses korosi PV karena interaksinya dengan jenis kotoran tertentu. Teknik pembersihan modern seperti daya elektrostatis sedang dipertimbangkan menggunakan robot untuk membersihkan PV dan penggunaan pembersih air reflektif tinggi dari metode modern yang telah terbukti efektif dalam membersihkan PV. Berikut merupakan beberapa metode paling penting dan terbaru yang saat ini digunakan untuk pembersihan PV.

1. Aliran udara paksa dari sistem pendingin udara

Metode ini telah digunakan di UAE serta dapat diterapkan di banyak negara maju lainnya di mana pendingin udara digunakan secara luas. Dalam metode ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, aliran udara dari kipas yang digunakan dalam sistem pendingin udara diarahkan langsung ke panel surya untuk menghilangkan debu secara paksa.



Gambar 1 Konsep pembersihan berbasis aliran udara paksa (Kazem et al., 2020)

2. Pembersihan alami menggunakan hujan dan angin



Dalam pembersihan alami, air hujan yang jatuh di permukaan PV yang miring dan karena panel biasanya dipasang pada sudut kemiringan untuk menangkap mereka menangkap radiasi optimal. Salah satu kelemahan metode ini adalah bahwa metode ini tidak sepenuhnya membersihkan PV karena proses

pembersihan ini meninggalkan debu yang menempel di permukaan PV akibat interaksinya dengan kelembapan atmosfer. Molekul adhesi ini biasanya memerlukan hujan deras untuk dihilangkan.

3. Pembersihan air

Dalam metode ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, selang dari aliran air diarahkan ke permukaan PV untuk menghilangkan partikel debu yang terkumpul. Metode ini membutuhkan sejumlah besar air dan penggunaan pompa untuk mencapai tekanan tinggi yang diperlukan. Dalam metode modern, air bertekanan kadang-kadang dicampur dengan agen pembersih khusus yang membantu menghilangkan debu lebih efektif. Air juga berguna untuk pendinginan PV dan sangat mirip dengan membersihkan PV dengan air hujan. Kelemahan metode ini adalah kesulitan menggunakan air di daerah yang langka. Metode ini juga menyebabkan kehilangan air yang besar, selain kemungkinan menyebabkan endapan kimia di tepi PV. Penggunaan pompa air bertekanan tinggi berarti mengonsumsi sebagian daya yang dihasilkan PV, yang berarti mengurangi efisiensi; ada juga risiko penyumbatan atau kerusakan pipa air, selain kemungkinan terjadinya kejutan termal pada PV yang panas ketika air yang lebih dingin jatuh ke permukaannya. Pembersihan PV biasanya dilakukan pada tengah hari setelah matahari terbenam, dan karena PV ini akan basah dan kemudian mengering, ada risiko menarik lebih banyak partikel debu untuk menumpuk di permukaan PV terutama karena stagnasi udara dan periode deposisi partikel debu yang paling penting dimulai setelah matahari terbenam. Kejutan termal biasanya dihindari dengan menggunakan air pada suhu yang mendekati suhu PV dengan cara meninggalkan tangki air dipanaskan oleh matahari.





Gambar 2 Sistem pembersihan air panel surya otomatis (Kazem et al., 2020)

4. Pembersihan manual

Dalam pendekatan ini, PV dibersihkan dari debu dan kotoran yang menumpuk menggunakan teknik seperti membersihkan jendela gedung dengan menggunakan sikat berbulu lembut yang dapat menghindari goresan pada permukaan bersih seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Pada sikat-sikat ini terdapat kemungkinan pasokan air pencuci yang langsung dan terus-menerus. Ini dapat dianggap lebih baik daripada membersihkan PV dengan air hujan atau air bertekanan. Namun, ada kemungkinan bahwa kontak langsung dengan permukaan PV dapat menyebabkan kotoran menempel, karena pergerakan sikat dan tekanannya pada permukaan panel tidak dapat dijamin merata di seluruh area PV. Metode ini lebih mahal dibandingkan dengan metode di atas karena membutuhkan tenaga kerja yang terampil.



Gambar 3 Pembersihan Manual (Kazem et al., 2020)



5. Pembersihan mekanis

Dari metode sebelumnya, kadang-kadang diperlukan penggunaan perangkat mekanis seperti mesin atau robot untuk mengoperasikan sikat atau pemindai, selain penggunaan filter air bertekanan tinggi dengan tangki penyimpanan air. pembersihan PV memerlukan pembersihan berkala sekali seminggu selama hari-hari kering, dan pembersihan ini meningkat menjadi satu kali sehari dalam kondisi akumulasi debu yang tinggi. Dalam pembersihan mekanis, otomatisasi digunakan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, sistem dikendalikan dengan menggunakan pengendali presisi dengan bantuan sensor. Metode ini dapat dianggap sangat berguna jika pembersihan dengan air tidak memungkinkan. Meskipun air dapat digunakan, kontak langsung dengan sikat dan berat perangkat mekanis dapat menyebabkan goresan pada permukaan panel yang dibersihkan. Dalam metode ini, konsumsi daya lebih besar dibandingkan dengan metode pembersihan lainnya, dan bagian-bagian mekanis yang digunakan memerlukan perawatan. Hingga saat ini, efektivitas penuh metode ini belum dikonfirmasi untuk akumulasi debu yang parah.



Gambar 4 PV yang dibersihkan secara otomatis (Kazem et al., 2020)

2.4 Monitoring Panel Surya

Teknologi panel surya mengalami kemajuan pesat dalam beberapa tahun terakhir karena keunggulannya, seperti energi terbarukan, ramah lingkungan, dan perawatan, dan keandalan. Namun beberapa kegagalan pada panel dapat terjadi dan menyebabkan degradasi, penurunan keluaran listrik, atau gelombang badai dengan tingkat yang berbeda-beda, bergantung pada terja di luar ruangan atau variabilitasnya. Perubahan iklim yang sering



terjadi dapat mempengaruhi produksi dan distribusi serta menyebabkan kerusakan. Selain itu dibutuhkan adanya pemantauan instalasi tenaga surya untuk memaksimalkan daya keluaran dengan mengatur sudut *real-time* dengan posisi matahari, sehingga kinerja pembangkit listrik dapat diketahui dengan baik. *Internet of things* atau *IoT* digunakan dalam sistem untuk meningkatkan deteksi kesalahan dan analisis prediktif selama pemeliharaan dan pemantauan lingkungan pembangkit listrik tenaga surya (Kumar, et al., 2023; Sarkar, et al., 2019).

Internet of Things juga sering digunakan dalam pengukuran energi matahari untuk efisiensi. Hal tersebut dimanfaatkan untuk menjaga kesehatan pembangkit listrik tenaga surya dan menekan biaya teknologi energi terbarukan di seluruh dunia, sehingga mendorong pembangunan pembangkit listrik tenaga surya skala besar. Otomatisasi observasi pabrik pada penerapan persiapan skala besar memerlukan sistem canggih yang bergantung pada koneksi Internet karena sebagian besar unit lapangan terletak di lokasi yang terisolasi dan terpencil sehingga tidak diawasi dari kantor pusat. Proyek ini didasarkan pada penggunaan metode terkini dan hemat biaya untuk memantau kinerja pembangkit listrik tenaga surya dari jarak jauh dengan menyertakan *IoT*. Sehingga, membantu pemeliharaan pabrik, diagnostik masalah dan pemantauan waktu nyata (Rani, et al., 2023).

2.5 Pengaruh Debu terhadap Efisiensi Panel Surya

Difusi cahaya bergantung pada distribusi debu pada panel PV. Pengaruh partikel debu pada modul PV diteliti dari segi suhu, keluaran daya, dan intensitas radiasi matahari. Terlihat bahwa suhu modul PV menurun seiring dengan meningkatnya partikel debu akibat pemblokiran radiasi panas (Hachicha, et al., 2019). Pengendapan debu di permukaan panel fotovoltaik bergantung pada sifat-sifat debu, yaitu komponen, ukuran, berat, dan bentuknya, serta debu asam dapat menyebabkan erosi pada permukaan panel. Namun, pengendapan juga bergantung pada lingkungan setempat, kondisi cuaca, vegetasi, dan lokasi, serta jika permukaannya horizontal, lebih banyak debu dapat terkumpul di atasnya (Rusănescu et al., 2023).



elitian telah menunjukkan bahwa parameter yang paling mempengaruhi ulan debu pada permukaan PV adalah sudut kemiringan, kondisi iklim, dan i debu. Salah satu masalah utama yang mempengaruhi efisiensi panel

fotovoltaik adalah pengumpulan kotoran pada lapisan atas modul PV, karena hal ini memantulkan dan menyebarkan cahaya, sehingga mengurangi transmisi cahaya dan keluaran daya. Gambar 5 menunjukkan pengumpulan debu pada modul panel PV *on-grid* setelah hari badai pasir. Berbagai sifat elemen debu, seperti ukuran, bentuk, dan kombinasi, adalah karakteristik penting yang mempengaruhi transmisi cahaya ke modul *fotovoltaic*.



Gambar 5 Akumulasi Debu pada Modul PV (Nezamisavojbolaghi *et al.*, 2023)

