

Systematic Literature Review : Efektivitas Teknologi Pembersihan Panel Surya Otomatis dalam Meningkatkan Efisiensi Energi di Area Berdebu

Rakha Hafizh Pramana¹, Wanda Kayza Najila¹, Amelia Nurina Fauziati¹, Syarif Hidayat¹, Dzikrulloh Widamara Kahar¹

¹Departemen Teknik Elektro, Universitas Negeri Semarang, Indonesia;

Email : rakhahp1@students.unnes.ac.id (R.H.P), wandakayza@students.unnes.ac.id (W.K.N), amelianurina57@students.unnes.ac.id (A.M.F), syarif_hidayat@students.unnes.ac.id (S.H), dzikrullohwidamara69@students.unnes.ac.id (D.W.K);

Abstrak : Studi ini mencoba mengevaluasi efektivitas sistem pembersihan otomatis untuk panel fotovoltaik dalam kaitannya dengan efisiensi operasional di wilayah kering dan berdebu. Studi ini mengkaji tiga metode pembersihan utama melalui pendekatan Tinjauan Literatur Sistematis (SLR): pembersihan manual, pelapisan hidrofobik, dan teknologi berbasis sensor. Pembersihan manual, meskipun murah, memiliki kekurangan serius dalam hal intensitas tenaga kerja yang tinggi dan perawatan berulang, sehingga tidak cocok untuk lokasi dengan polusi debu yang tinggi. Sebagai perbandingan, sistem pembersihan otomatis bekerja jauh lebih baik dalam menjaga efisiensi panel surya, terutama di iklim kering dan berdebu. Penerapan pelapisan hidrofobik anti air menawarkan alternatif pembersihan sendiri yang meminimalkan daya rekat debu, sehingga mengurangi jumlah pembersihan manual yang rutin. Teknologi berbasis sensor memungkinkan untuk menentukan tingkat debu yang menumpuk, sehingga memungkinkan operasi pembersihan hanya dilakukan saat diperlukan untuk efisiensi yang lebih baik. Hasilnya telah membuktikan bahwa pendekatan pembersihan terpadu, yang menggabungkan teknik manual dan otomatis, sangat penting untuk mencapai efisiensi panel surya maksimum dalam kondisi lingkungan yang berbeda. Pendekatan hibrida ini tidak hanya meningkatkan efisiensi biaya tetapi juga memiliki peran penting dalam keberlanjutan dan kinerja panel surya dalam jangka panjang. Dengan demikian, jadwal pembersihan yang dioptimalkan berdasarkan kondisi lingkungan tertentu dapat dengan mudah meningkatkan keandalan dan keberlanjutan sistem energi surya secara dramatis.

Kata Kunci : Efisiensi Panel Surya, Pembersihan Manual, Pembersihan Otomatis, SLR, Teknologi Berbasis Sensor

Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2025, Vol. 6, No. 1, pp 14 – 42

Received : 19 November 2024

Accepted : 12 Desember 2024

Published : 31 Maret 2025



Copyright: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

Abstract : The present study tries to evaluate the effectiveness of automatic cleaning systems for photovoltaic panels in relation to operational efficiency in dry and dusty regions. This study examines three principal cleaning methods through the Systematic Literature Review (SLR) approach: manual cleaning, hydrophobic coating, and sensor-based technology. Manual cleaning, although inexpensive, suffers from serious drawbacks in terms of high labor intensity and repeated maintenance, rendering it unsuitable for sites with high dust pollution. In comparison, automatic cleaning systems do a much better job of safeguarding the efficiency of solar panels, especially in arid and dusty climates. The application of hydrophobic, water-repellent coatings offers a self-cleaning alternative that minimizes dust adhesion, cutting down on the number of regular manual cleanings. Sensor-based technology makes it possible to determine the level of dust built-up, hence enabling cleaning operations to occur only when necessary for better efficiency. The result has proven that an integrated cleaning approach, combining manual and automated techniques, is essential to achieve maximum solar panel efficiency in divergent environmental conditions. This hybrid approach not only enhances cost-efficiency but also has a prominent role in the long-term sustainability and performance of solar panels. Thus, an optimized cleaning schedule based on the particular environmental conditions can easily raise the reliability and sustainability of solar energy systems dramatically.

Keywords : Hydrophobic Coating, Manual Cleaning, Sensor Based Technology, SLR, Solar Panel Efficiency

1. Pendahuluan

Panel surya, atau *photovoltaic* (PV), merupakan teknologi yang digunakan untuk mengonversi sinar matahari menjadi energi listrik. Menurut penelitian Shahsavari, penggunaan panel surya telah berkembang pesat sebagai salah satu solusi energi terbarukan yang berpotensi besar dalam mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil(Shahsavari & Akbari, 2018). Dengan kemajuan teknologi fotovoltaik, upaya konservasi energi semakin menjadi prioritas untuk menekan biaya listrik, karena teknologi ini hanya memerlukan sinar matahari sebagai sumber energinya(Olorunfemi et al., 2023a). Peningkatan pemasangan PV di berbagai lokasi geografis, optimalisasi kinerjanya menjadi fokus utama dalam penelitian dan pengembangan. Permukaan aktif sistem energi surya mencakup lebih dari 3000 km² di seluruh dunia(Al-Sharafi et al., 2024).

Kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal. Seperti yang dinyatakan Hachicha di mana karakteristik partikel debu yang dapat mempengaruhi efisiensi energi sistem PV di iklim gurun di Sharjah, Uni Emirat Arab (UAE) menunjukkan bahwa selama beberapa bulan, dari Januari hingga Juli, kepadatan badai pasir sebesar 5,44 g/m² yang tersebar di permukaan modul PV menyebabkan penurunan daya maksimum sebesar 12,7% pada sistem PV(Said et al., 2024a). Kondisi lingkungan terbukti mempengaruhi seberapa efektif panel PV menerima sinar matahari yang nantinya akan diubah menjadi listrik. Permasalahan-permasalahan ini memerlukan perhatian dalam sistem pemeliharaan panel agar efisiensi tetap terjaga.

Penumpukan debu adalah salah satu tantangan terbesar dalam menjaga efisiensi panel surya(Said et al., 2024a). Menurut Mazumder, kehilangan daya tahunan yang disebabkan oleh penumpukan debu berkisar antara 5% hingga 30%. Pada lokasi instalasi panel surya, penumpukan kotoran terjadi berulang kali dan tidak dapat diprediksi, sehingga sulit untuk mengendalikan laju penumpukan

kotoran(Olorunfemi et al., 2023a). Penumpukan debu menghalangi sinar matahari untuk menembus melalui penutup kaca modul PV dan menghalangi cahaya mencapai sel surya. Foton dari radiasi sinar matahari tidak dapat mengexcite elektron bebas untuk berpindah ke pita konduksi, dan pasangan *hole*-elektron tidak terpisah. Akibatnya, tidak ada arus listrik yang dihasilkan dari sel PV(Syafiq et al., 2018). Di daerah yang memiliki tingkat polusi atau debu yang tinggi, permasalahan ini bahkan lebih parah. Penumpukan debu yang signifikan memerlukan pembersihan yang lebih sering untuk menjaga performa panel tetap optimal.

Untuk mengatasi masalah penumpukan debu, berbagai teknologi pembersihan otomatis telah diusulkan. Salah satunya adalah penggunaan sensor debu yang mampu mendeteksi akumulasi debu dan mengaktifkan sistem pembersihan secara otomatis(Al-Sharafi et al., 2024). Metode deteksi kotoran pada panel surya secara manual melalui observasi fisik oleh profesional memakan waktu dan mahal, terutama untuk ladang besar. Sebaliknya, sistem otomatis dengan robotik terbukti lebih efektif dan efisien dalam mendeteksi dan membersihkan kotoran, khususnya di lokasi terpencil atau atap, tanpa memerlukan biaya berlebihan dari pembersihan terus-menerus(Syafiq et al., 2018). Selain itu, sistem *wiper* otomatis yang serupa dengan pembersih kaca mobil dapat digunakan untuk membersihkan permukaan panel secara berkala. Metode lain yang menjanjikan adalah *coating* hidrofobik, yang mencegah partikel debu menempel pada permukaan panel, sehingga memperpanjang waktu antara pembersihan(Al-Sharafi et al., 2024). Film air ini secara efektif menghilangkan debu dan minyak dari permukaan pelapis super hidrofilik, sehingga mencapai efek pembersihan diri. Berbagai studi telah menunjukkan bahwa panel surya yang dilapisi dengan pelapis pembersihan diri super hidrofilik umumnya memiliki kinerja yang optimal meskipun setelah hujan(Deng et al., 2024).

Optimalisasi kinerja dapat ditingkatkan dengan adanya integrasi teknologi sensor dalam pembersihan panel surya agar dapat memungkinkan prediksi yang lebih akurat mengenai waktu pembersihan. Sensor akan mendeteksi akumulasi debu, Sensor tersebut terhubung dengan pengontrol secara langsung untuk memantau keluaran daya panel surya dalam waktu nyata dan menghitung pengaruh akumulasi debu terhadap panel. Dengan adanya pemantauan akumulasi debu, panel PV akan dibersihkan sesuai kebutuhan, sehingga dapat meningkatkan efisiensi(Jaiganesh et al., 2021).

Metode pembersihan dengan sensor salah satunya yaitu *wiper* otomatis. Menurut penelitian oleh Jaiganesh, kinerja yang dihasilkan meningkat 15-20%, karena adanya interval pemeriksaan otomatis oleh sensor dengan frekuensi berkala(Jaiganesh et al., 2021). Sedangkan untuk metode lain seperti *cleaner* manual yang dilakukan oleh Farrokhi menunjukkan bahwa kinerja panel memiliki efisiensi yang tinggi mencapai 98%, sedangkan analisis terhadap *self cleaner*, seperti *coating* hidrofobik (Farrokhi Derakhshandeh et al., 2021), kinerja panel PV dapat bekerja dengan efisiensi 93.6%, lebih menurun dari manual *cleaning*, namun waktu *cleaning* lebih singkat(Syafiq et al., 2018). Dari 3 metode yang dipakai dalam penelitian tersebut, dapat dilakukan analisis sistematis literatur lebih lanjut mengenai kemampuan metode *cleaner* PV yang paling optimal.

2. Metodologi

Metode yang digunakan dalam penulisan artikel ini berupa *systematic literature review*. Menurut Pati, sebuah *Systematic Literature Review* (SLR) adalah metodologi penelitian yang digunakan untuk mengumpulkan, mengidentifikasi, dan menganalisis secara kritis studi penelitian yang tersedia (misalnya, artikel, *proceeding* konferensi, buku, disertasi) melalui prosedur yang sistematis(Carrera-Rivera et al., 2022).

2.1. Pertanyaan Penelitian

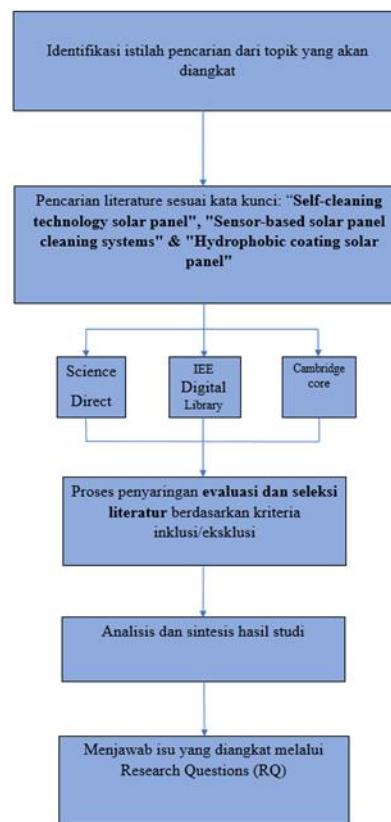
Pada tahap awal, penelitian ini dimulai dengan menyusun pertanyaan penelitian yang bertujuan untuk mengeksplorasi teknologi pembersihan panel surya, perbandingan antar metode, serta pengaruh faktor lingkungan terhadap efisiensi sistem tenaga surya. Berdasarkan kerangka *Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context (PCIOC)*, pertanyaan penelitian yang akan dijawab melalui tinjauan literatur adalah :

Tabel 1.

Pertanyaan Penelitian

RQ#	Pertanyaan Penelitian	Motivasi
RQ1	Bagaimana penerapan teknologi pembersihan otomatis pada panel surya, seperti lapisan hidrofobik, dibandingkan dengan metode pembersihan manual dalam meningkatkan efisiensi energi di lingkungan berdebu tinggi?	Peningkatan efisiensi panel surya di daerah berdebu sangat penting karena akumulasi debu dapat mengurangi <i>output</i> energi secara signifikan. Teknologi pembersihan otomatis berpotensi mengurangi biaya dan waktu yang dibutuhkan untuk pembersihan manual, terutama di wilayah yang sering terkena debu.
RQ2	Bagaimana faktor lingkungan, seperti debu tinggi dan kondisi tertentu, mempengaruhi efektivitas lapisan hidrofobik dalam meningkatkan efisiensi panel surya dibandingkan metode pembersihan manual?	Wilayah dengan debu tinggi dan kelembapan, seperti daerah pantai, memberikan tantangan tambahan untuk efisiensi panel surya. Lapisan hidrofobik dapat menjadi solusi potensial untuk menjaga kebersihan panel tanpa intervensi manusia yang terus-menerus.
RQ3	Sejauh mana penggunaan sensor dalam pembersihan panel surya dapat meningkatkan prediksi dan deteksi kotoran pada panel surya untuk memaksimalkan efisiensi energi di wilayah dengan curah hujan rendah?	Penggunaan sensor untuk memantau kebersihan panel surya memungkinkan penjadwalan pembersihan yang lebih efisien dan tepat waktu, sehingga meminimalkan pemborosan energi akibat penumpukan kotoran, terutama di daerah dengan curah hujan rendah yang kurang dapat diandalkan sebagai pembersih alami.

Kami mengajukan pertanyaan pertama untuk mengevaluasi keefektifan setiap metode pembersihan dalam mempertahankan kinerja panel surya dalam kondisi lingkungan yang buruk. Selain itu, informasi juga akan dikumpulkan tentang teknologi yang digunakan dalam kedua metode dan bagaimana penerapan teknologi ini mempengaruhi masa pakai dan biaya operasi panel surya. Kemudian kami mengajukan pertanyaan kedua untuk mengetahui sejauh mana kondisi lingkungan mempengaruhi kinerja pelapis hidrofobik dan apakah faktor-faktor ini secara signifikan mengurangi efisiensi energi yang dihasilkan. Terakhir, Kami mengajukan pertanyaan ketiga untuk melihat bagaimana sensor dapat membantu mengotomatiskan proses pengambilan keputusan mengenai waktu dan frekuensi pembersihan panel surya, dan apakah ada teknologi sensor yang digunakan secara khusus untuk memantau tingkat kotoran dan kelembapan pada permukaan panel surya. Jawaban dari pertanyaan-pertanyaan ini akan bermanfaat bagi pengembang dan operator sistem panel surya dalam mengoptimalkan jadwal pemeliharaan dengan memanfaatkan data *real-time* dari sensor, terutama di daerah dengan curah hujan rendah.



Gambar 1. Diagram SLR

Proses metodologi yang digunakan dalam penelitian ini mengikuti pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) dengan langkah-langkah berikut: Langkah pertama adalah mengidentifikasi istilah pencarian yang relevan dengan topik yang akan diangkat. Dalam penelitian ini, istilah-istilah kunci yang digunakan. Langkah kedua Pencarian literatur dilakukan di beberapa basis data akademis utama, yaitu Science Direct, IEEE Digital Library, dan Cambridge Core. Ketiga basis data ini dipilih karena menyediakan akses ke jurnal-jurnal dan *proceeding* konferensi yang mencakup penelitian

empiris dan tinjauan literatur yang relevan dengan bidang rekayasa perangkat lunak serta teknologi pembersihan panel surya. Langkah ketiga penyaringan dan evaluasi literatur berdasarkan kriteria inklusi/eksklusi. Kriteria ini diterapkan untuk menyeleksi studi-studi yang paling relevan dengan topik penelitian. Studi yang tidak sesuai dengan kriteria atau tidak relevan dikecualikan dari analisis lebih lanjut. Pengkaji perlu mengolah data yang telah diekstrak dari studi-studi yang terpilih. Pada tahap ini, pengkaji menganalisis hasil-hasil yang ditemukan dalam literatur untuk mencari pola, tren, kesenjangan, atau hubungan di antara temuan-temuan tersebut. Analisis ini bertujuan untuk menjawab pertanyaan penelitian (RQ) yang telah ditetapkan. Kemudian pengkaji dapat menarik kesimpulan, memberikan rekomendasi, serta menjawab RQ dengan cara yang terstruktur dan berbasis bukti.

2.2. Proses Pencarian dan Seleksi Literatur

Proses pencarian literatur dibagi dalam dua tahap, yaitu tahap pencarian awal dan tahap pencarian lanjutan. Tahap pencarian awal meliputi pencarian menyeluruh di basis data yang ditentukan, dengan hasil dikumpulkan sebagai literatur potensial. Tahap pencarian lanjutan meliputi pemeriksaan daftar referensi dari literatur yang dikumpulkan untuk menemukan studi tambahan, perangkat lunak seperti Mendeley digunakan untuk mengelola dan menyimpan hasil pencarian.

Untuk memastikan kelengkapan dan relevansi literatur yang digunakan, proses pencarian dilakukan di beberapa basis data ilmiah terkemuka :

- IEEE Xplore Digital Library (<http://ieeexplore.ieee.org>)
- Cambridge Core (<https://www.cambridge.org/core>)
- ScienceDirect (<http://www.sciencedirect.com>)

Pencarian dilakukan dengan istilah-istilah kunci yang dikembangkan dari pertanyaan penelitian, seperti: "*Self-cleaning technology solar panel*", "*Sensor-based solar panel cleaning systems*" & "*Hydrophobic coating solar panel*". Pencarian difokuskan pada judul, abstrak, dan kata kunci artikel untuk memastikan relevansi.

2.3. Kriteria Seleksi Literatur

Kriteria inklusi dan eksklusi digunakan untuk memastikan bahwa hanya studi yang relevan yang dipertimbangkan :

2.3.1. Kriteria Inkslusi

- Studi yang akan disertakan dalam tinjauan ini harus diterbitkan dalam periode waktu antara 2019 hingga 2024. Hal ini memastikan bahwa penelitian yang ditinjau adalah studi terbaru dan relevan dalam konteks perkembangan teknologi dan pemahaman terbaru tentang pembersihan panel surya.
- Studi yang diikutsertakan harus membahas metode atau teknologi untuk pembersihan panel surya. Ini mencakup pembersihan otomatis (misalnya menggunakan robot atau teknologi lainnya) serta pembersihan manual, yang mungkin mempengaruhi efisiensi sistem.
- Studi yang fokus pada pengaruh faktor lingkungan seperti debu, hujan, suhu, dan kondisi atmosfer lainnya terhadap efisiensi panel surya juga akan dipertimbangkan. Pemahaman tentang bagaimana lingkungan mempengaruhi kinerja panel surya sangat penting untuk topik ini.

- Untuk memastikan kualitas penelitian, studi yang dipublikasikan dalam jurnal atau konferensi akademik yang terindeks pada Scopus dengan nilai Q1 atau Q2 yang akan disertakan. Hal ini memastikan bahwa studi tersebut telah melewati proses *peer review* yang ketat dan memiliki reputasi ilmiah yang baik.

2.3.2. Kriteria Ekslusif

- Studi yang tidak ditulis dalam bahasa Inggris akan dikecualikan untuk menjaga keseragaman dan kemudahan dalam proses analisis dan penilaian literatur.
- Literatur abu-abu, termasuk laporan tidak resmi, pidato, atau disertasi, akan dikecualikan karena tidak melalui proses *peer review* formal, sehingga kualitas dan kredibilitasnya mungkin tidak terjamin.
- Studi yang tidak tersedia atau tidak dapat diakses melalui basis data akademik yang tersedia (misalnya karena kendala akses atau berbayar) tidak akan disertakan, untuk menjaga agar hanya literatur yang dapat dievaluasi secara langsung yang dimasukkan dalam tinjauan.

2.4. Analisis dan Sintesis Data

Data diekstraksi menggunakan formulir khusus untuk mencatat detail utama dari setiap studi, termasuk :

- Metode pembersihan yang digunakan (otomatis vs manual).
- Hasil yang dilaporkan terkait efektivitas lapisan hidrofobik dalam meningkatkan efisiensi panel surya
- Pengaruh lingkungan terhadap efektivitas pembersihan.

Data yang diekstraksi kemudian disintesis secara kualitatif dan kuantitatif untuk menjawab pertanyaan penelitian. Proses sintesis melibatkan pengelompokan data berdasarkan variabel yang serupa dan pengolahan data untuk menemukan pola dan kesenjangan dalam literatur yang ada. Dari proses ini, akhirnya terkumpul 46 artikel yang memenuhi kriteria dan dianalisis lebih lanjut untuk mendapatkan wawasan terkait metode pembersihan manual, efektivitas lapisan hidrofobik, serta penggunaan sensor dalam deteksi kotoran pada panel surya. Artikel-artikel ini kemudian disintesis untuk menjawab tujuan utama penelitian dan memberikan panduan yang komprehensif bagi teknologi pembersihan panel surya.

3. Hasil

Kami menyajikan temuan dari tinjauan literatur yang telah dilakukan untuk mengeksplorasi berbagai pendekatan dan teknologi terkait pemeliharaan serta peningkatan efisiensi panel surya. Studi yang terpilih dikategorikan ke dalam tiga kelompok utama yaitu metode pembersihan manual, efektivitas lapisan hidrofobik dalam meningkatkan efisiensi energi, dan penggunaan sensor untuk prediksi serta deteksi kotoran pada panel surya. Hasil disajikan dalam bentuk tabel untuk merangkum berbagai pendekatan yang digunakan, serta diikuti oleh penjelasan singkat mengenai temuan utama yang diangkat dalam literatur. Struktur ini akan membantu mengidentifikasi teknologi atau metode yang paling efektif berdasarkan kondisi lingkungan tertentu dan jenis panel surya yang digunakan.

3.1. Metode Pembersihan Manual

Tabel 2.

Studi Terpilih Mengenai Metode Pembersihan Manual

Peneliti	Mekanisme	Kelebihan	Kekurangan	Efisiensi
(Najmi & Rachid, 2023)	Manual cleaning dengan sikat/kain secara berkala	Biaya awal rendah, mudah diterapkan, tidak memerlukan peralatan khusus.	Membutuhkan tenaga kerja yang intens, perlu pembersihan rutin, memakan waktu untuk instalasi besar	Hingga ±90% (perhitungan score 4/5)
(Said et al., 2024b)	Pembersihan manual dilakukan pada modul PV bersih dan kotor dalam kondisi alami	Bisa digunakan untuk perkiraan energi, dapat mendeteksi pengurangan energi hingga 8,79%.	Tidak membahas model korelasi matematis untuk diposisi debu, hanya dilakukan di wilayah pesisir	Hingga 8,79%
(Fatima et al., 2024)	Dua interval pembersihan pada dua <i>string</i> dalam sistem 5,85 kW	Interval pembersihan teratur mencegah penurunan kinerja, biaya rendah karena pembersihan manual lebih murah dalam pengaturan teknologi rendah	Membutuhkan intervensi manusia dan penjadwalan yang teratur, frekuensi pembersihan tinggi yaitu dibutuhkan setidaknya 8–12 siklus per tahun	28% peningkatan kinerja setelah pembersihan
(Al-Salaymeh et al., 2023)	Pembersihan dilakukan secara fisik dengan intervensi manusia	Tidak memerlukan teknologi	Tidak efisien karena membutuhkan tenaga kerja	Hingga 5,93% setelah 2 minggu
(Elamim et al., 2023)	Modul PV dibersihkan secara manual dengan air biasa	Murah karena tidak memerlukan bahan tambahan seperti pembersih	Efektivitas rendah, modul lebih sulit dibersihkan tanpa pembersih	3% lebih rendah dibandingkan sistem berlapis <i>coating</i>
(Sánchez-Barroso et al., 2021)	Pembersihan manual panel PV setiap bulan untuk	Kenaikan produksi energi tahunan hingga 11.15%	Menggunakan sumber daya manual yang memerlukan	Hingga 35.25% pada bulan-bulan kering

	menghilangkan debu dan kotoran	investasi ekonomis	
(Khadka et al., 2020)	Alat sederhana yang digerakkan secara manual dengan bantuan roda dan sikat otomatis.	Biaya moderat., pengurangan tenaga manual, portabel dan mudah digunakan	Tetap membutuhkan pengawasan manual, keterbatasan pada debu yang sangat menempel.
(Alvarez et al., 2020)	Sistem dengan nosel dan <i>timer</i> , menggunakan air untuk membersihkan debu dari permukaan panel.	Lebih sedikit usaha manual, meningkatkan <i>output</i> daya.	Membutuhkan sumber daya air, memerlukan perawatan, tidak efisien untuk daerah yang kekurangan air.

Pada area yang tidak memiliki akses ke teknologi pembersihan otomatis atau untuk instalasi yang lebih kecil, metode pembersihan secara manual masih banyak digunakan karena relevan dengan situasi dan instalasi area. Metode manual dilakukan dengan menggunakan sikat, kain, atau air untuk membersihkan debu dan kotoran yang memblokir penyerapan sinar matahari oleh panel. Meskipun sederhana, penggunaan banyak tenaga kerja dan seringnya pembersihan diperlukan saat melakukan pembersihan manual, terutama di tempat-tempat dengan akumulasi debu yang besar. Harga murah dan kemudahan penggunaannya membuat metode ini populer di kalangan teknologi yang terbatas.

Beberapa artikel membicarakan pemanfaatan teknologi semi-otomatis untuk membersihkan panel, seperti sistem yang mengurangi keterlibatan intervensi manusia langsung dengan alat fisik atau sistem nozel otomatis yang terprogram dengan timer. Teknologi semi-otomatis ini mengurangi kebutuhan tenaga kerja, tetapi efisiensinya terbatas dan tetap membutuhkan pengawasan manual serta sumber daya tambahan seperti air yang harus dikelola secara efisien. Dari segi efisiensi, metode pembersihan manual dapat meningkatkan efisiensi hingga 90% dalam kondisi khusus, terutama dengan pembersihan yang dilakukan secara teratur. Namun, di sebagian besar artikel, peningkatan efisiensi berkisar antara 3% hingga 35%, tergantung pada alat yang digunakan dan kondisi lingkungan. Beberapa metode semi-otomatis menunjukkan efisiensi yang lebih rendah, terutama di wilayah yang sangat berdebu.

Berbagai penelitian studi yang telah dilakukan dalam table tersebut mengevaluasi efektivitas dan hambatan-hambatan terkait metode pembersihan manual pada panel surya. Beberapa pendekatan yang digunakan, seperti manual cleaning berkala menggunakan sikat atau kain, memiliki kelebihan seperti biaya awal yang rendah dan kemudahan dalam pelaksanaan, seperti yang ditemukan oleh Najmi (Najmi & Rachid, 2023). Meskipun demikian, penelitian lain oleh Sánchez, menemukan bahwa meskipun pembersihan manual dapat meningkatkan produksi energi hingga 35,25% pada bulan-bulan kering (Sánchez-Barroso et al., 2021), metode ini masih memerlukan investasi tenaga kerja dan waktu

yang cukup besar. Selain itu, Khadka mengembangkan alat pembersih yang membantu mengurangi tenaga manual, tetapi tetap memerlukan pengawasan dan kurang efektif untuk debu yang sulit dihilangkan (Khadka et al., 2020).

Dari tabel, dapat dinyatakan bahwa pembersihan manual dapat memberikan peningkatan efisiensi energi secara signifikan dalam berbagai kondisi lingkungan, tetapi efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh frekuensi pembersihan dan kondisi cuaca. Penelitian Fatima menunjukkan bahwa interval pembersihan yang teratur dapat mencegah penurunan kinerja hingga 28%, namun membutuhkan setidaknya 8–12 siklus pembersihan per tahun (Fatima et al., 2024). Studi oleh Said menunjukkan bahwa pembersihan manual dapat mendeteksi pengurangan energi hingga 8,79% akibat akumulasi debu di wilayah pesisir. Namun, belum dijelaskan mengenai korelasi matematis dari deposisi debu tersebut (Said et al., 2024b). Secara keseluruhan, meskipun metode ini memiliki biaya rendah dan mudah diterapkan, kebutuhan akan tenaga kerja intensif dan ketergantungan pada kondisi lingkungan menjadi masalah utama yang harus diperhitungkan.

3.2. Metode Lapisan Hidrofobik

Tabel 3.

Studi Terpilih Mengenai Metode Lapisan Hidrofobik

Peneliti	Mekanisme	Kelebihan	Kekurangan	Efisiensi
(Dogra et al., 2023)	Pelapisan hidrofobik Sol-gel, lapisan zirkonia dimodifikasi dengan HMDS dan diaplikasikan menggunakan spin coating.	Hidrofobik, anti-reflektif, proses biaya rendah.	Stabilitas dan durabilitas jangka panjang belum teruji.	91,2% transmisi
(Ratnaparkhi, Dave, Valerino, et al., 2023)	Menggunakan pelapis hidrofobik yang diaplikasikan pada panel surya dengan dan tanpa penekanan embun selama periode 70 hari uji lapangan	Mengurangi pembentukan embun dan mengurangi deposit debu yang menyatu, sehingga pelapis menjadi lebih efektif dalam mengurangi kotoran.	Penekanan embun memerlukan penutup fisik, yang mungkin sulit diterapkan secara luas, tidak ada peningkatan signifikan dalam Dust Potency (DP) antara panel berlapis dan tidak berlapis.	Soiling: Reduksi hingga 50% (penekanan embun)
(Ratnaparkhi, Dave, Meena, et al., 2023a)	pelapis hidrofobik pada permukaan panel surya untuk	Pelapis ini lebih efektif mengurangi kehilangan	Efektivitas pelapis menurun di lingkungan dengan polusi	Soiling: Reduksi hingga 31-56%

	<p>mengurangi akumulasi debu (particulate matter/PM) di lingkungan bersih dan tercemar, membandingkan panel dengan pelapis hidrofobik (CS) dan tanpa pelapis (UCS).</p>	<p>efisiensi akibat debu di lingkungan bersih, pelapis mengurangi akumulasi PM terutama partikel kecil (3-10 μm)</p>	<p>tinggi karena akumulasi partikel kecil yang tetap signifikan.</p>	
(H. Lu et al., 2023)	<p>Pengembangan komposit berbasis nanocellulose dengan modifikasi hidrofobik menggunakan amidasi dan biomineralisasi.</p>	<p>Mampu mengurangi deposisi debu secara signifikan, terutama pada sudut kemiringan 75° dan kecepatan angin rendah hingga sedang.</p>	<p>Efisiensi turun pada kecepatan angin tinggi ($>2.1 \text{ m/s}$), Efektivitas berkurang jika angin tidak langsung mengarah ke modul.</p>	<p>hingga 94.43% pada sudut kemiringan 75°.</p>
(Liu et al., 2024)	<p>Pembuatan film komposit T3/ODA/CaCO₃ melalui modifikasi amidasi dan teknologi biomineralisasi</p>	<p>Hidrofobisitas tinggi (sudut kontak air 138.21°), Haze tinggi (84.8%) untuk manajemen cahaya yang lebih baik dalam sel surya.</p>	<p>Proses yang kompleks, melibatkan 2 langkah reaksi, memerlukan kontrol yang tepat untuk menghindari kristalisasi berlebih yang menurunkan performa optik</p>	<p>peningkatan photoelectric conversion efficiency (PCE) sebesar 10.81%</p>
(Nomeir et al., 2023)	<p>Deposisi lapisan super hidrofobik transparan dengan kemampuan self-cleaning pada solar cell.</p>	<p>Menjaga transparansi tinggi hingga 80-93%, sehingga cahaya masih dapat mencapai permukaan panel secara maksimal,</p>	<p>Kurang efektif dalam jangka panjang dan membutuhkan perlindungan ekstra terhadap abrasi mekanik.</p>	<p>(PCE) hingga 10.12%</p>

		tahan terhadap kondisi lingkungan yang keras, seperti panas, UV, dan abrasi.		
(Sun et al., 2020)	Lapisan hidrofobik berbasis sol-gel dengan modifikasi PTFE dan SiO ₂ menggunakan teknik dip-coating.	Transmisi cahaya tinggi (97,86%), Hidrofobik dan tahan abrasi, proses sederhana, cocok untuk produksi besar.	Transmisi menurun pada konsentrasi PTFE tinggi, pengurangan porositas bisa menurunkan kinerja optik.	Transmisi cahaya hingga 99,44% pada kondisi optimal.
(Ko et al., 2022)	lapisan superhidrofobik berbasis silika yang diaplikasikan menggunakan metode brush-painting	Transmisi cahaya tinggi (90,2%), superhidrofobik dengan pembersihan otomatis, tahan cuaca yang kuat.	Lapisan tidak merata dari brush-painting, penurunan performa setelah uji ketahanan.	Transmisi cahaya hingga 90,2%
(L. Lu et al., 2022)	Penggunaan lapisan hidrofobik pada kaca solar PV untuk meningkatkan kemampuan self-cleaning.	Pembersihan cepat (73% lebih cepat), tahan cuaca ekstrim, gaya adhesi rendah untuk debu lebih ringan.	Efektivitas menurun pada debu besar (>2 mm), keterbatasan pada debu hidrofilik.	Waktu pembersihan berkurang hingga 73%.
(Singh et al., 2024)	doping tembaga pada lapisan tipis zinc oxide (ZnO) menggunakan reactive co-sputtering. Lapisan ZnO yang didoping tembaga ini diaplikasikan pada substrat kaca untuk	Sifat anti-air meningkat, sudut kontak air dari 101° menjadi 113° memberikan kemampuan anti-air yang lebih baik, memiliki transmisi optik yang baik (sekitar 80,20%) dan pita	Transmisi Cahaya turun dari 71.59% menjadi 59.50% akibat doping Cu, resistivitas listrik menurun seiring peningkatan suhu dan doping Cu.	No available

	meningkatkan sifat hidrofobik dan optik.	celah optik yang lebar (3,22 ev).		
(Bukhari et al., 2019)	Pelapis hidrofobik transparan yang diterapkan pada kaca penutup modul PV	Mengurangi kehilangan daya akibat kotoran, hidrofobik tinggi, daya tahan yang baik	Memerlukan kontrol ketebalan yang tepat, degradasi dalam kondisi uap panas ekstrem	No available
(Zhang et al., 2020)	Pelapis lapisan ganda dengan silika rantai bulat dan indeks bias ultra-rendah untuk sel surya	Transmisi tinggi (hingga 99,64%), dapat membersihkan diri, ketahanan terhadap lingkungan	Memerlukan modifikasi permukaan yang tepat, proses pembuatan yang berpotensi kompleks	No available
(Sarkin et al., 2020)	Mengaplikasikan larutan sol-gel pada kaca penutup dengan metode dip-coating	Peningkatan transmisi cahaya hingga 5.7%, tahan terhadap lingkungan ekstrem hujan, dan suhu tinggi	Debu tebal atau partikel besar sulit dibersihkan hanya dengan air.	efisiensi panel surya hingga 1.3%
(Ekren et al., 2022)	Pelapis hidrofobik, antireflektif, dan antidust yang mengandung nanopartikel SiO ₂ dan TiO ₂ , diterapkan dengan metode cetak 3D yang dimodifikasi khusus untuk bioprinting.	Efek hidrofobik: mengurangi akumulasi debu dan kotoran, antireflektif: meningkatkan transmisi cahaya hingga 88,2% pada panjang gelombang 550 nm.	Proses yang kompleks: membutuhkan peralatan dan teknik khusus seperti cetak 3d, durabilitas belum diuji jangka panjang di berbagai kondisi cuaca.	efisiensi daya hingga 8,7%.
(Ayad et al., 2024)	Penggunaan pelapis hidrofobik pada panel PV yang dikombinasikan dengan	Meningkatkan pembangkit tenaga dengan mengurangi akumulasi debu;	Memerlukan penelitian lebih lanjut untuk efektivitas jangka panjang	Hingga 11%

(Alam et al., 2019)	pembalikan berkala Pelapis hidrofobik menggunakan nano partikel silika dan HMDS pada substrat kaca dengan metode sol-gel dan pelapisan celup	cocok untuk daerah kering Meningkatkan transmisi optik (95,2%), mengurangi adhesi air dan salju, gesekan rendah, mudah menghilangkan kotoran	Memerlukan 24-26 hari untuk reaksi modifikasi permukaan yang optimal	Hingga 95,2% peningkatan transmisi
(Ratnaparkhi, Dave, Meena, et al., 2023b)	Mengurangi akumulasi PM pada kaca PV dengan menggunakan kaca yang dilapisi hidrofobik	Efektif dalam mengurangi akumulasi partikel di lingkungan yang lebih bersih	Kurang efektif di lingkungan yang tercemar karena akumulasi partikel halus yang lebih tinggi pada permukaan hidrofobik	No available
(Nayshevsky et al., 2020)	Memanfaatkan lapisan hidrofobik dengan saluran hidrofilik untuk meningkatkan mobilitas tetesan air dan pembersihan otomatis.	Tahan lama (diuji selama 2000 jam di bawah uv).	Beberapa jenis debu bereaksi lebih kuat dengan air, sehingga akumulasi lebih banyak pada semua permukaan (misalnya, kalsium karbonat, semen portland).	Pemulihran transmisi hingga 99,2% pada 550 nm.

Panel surya merupakan sumber energi yang andal dalam menghasilkan energi listrik sebagai sumber energi sehari-hari, Namun, untuk memastikan kinerjanya tetap optimal dan memiliki daya tahan yang kuat terutama pada lingkungan yang memiliki kondisi iklim curah hujan yang sedikit sehingga menghasilkan akumulasi debu dan kotoran. Lapisan hidrofobik memiliki peranan penting dalam pada panel surya seperti menghadapi masalah akumulasi debu dan kotoran yang dapat menghambat penyerapan cahaya pada permukaan panel, sehingga efisiensi panel surya mengalami penurunan, sifat lapisan hidrofobik yang memiliki kemampuan dalam mencegah air dan kotoran yang menempel pada permukaan panel. Sifat ini dapat memberikan efisiensi dari panel surya dapat tetap

terjaga tanpa melakukan pembersihan panel secara konvesional atau manual, lapisan ini sangat berguna di daerah yang memiliki curah hujan yang sedikit.

Berdasarkan studi yang sudah di tinjau dalam tabel ditunjukkan mengenai efektivitas lapisan hidrofobik pada panel surya. Terdapat berbagai macam metode dalam pelapisan hidrofobik seperti sol-gel dengan berbagai bahan seperti zirkonia, nanocellulose, dan T3/ODA/CaCO₃. Metode-metode ini memberikan peningkatan dalam penyerapan cahaya dan efisiensi konversi energi setelah panel surya dilakukan pelapisan hidrofobik. Dalam penelitian oleh Dogra terdapat kemajuan penyerapan atau transmisi cahaya mencapai 91.2% (Dogra et al., 2023), pada penelitian lain oleh Liu ditemukan kemajuan mencapai 10.81% dalam parameter (PCE) photoelectric conversion efficiency (Liu et al., 2024). Selain itu dalam penelitian Sun juga ditemukan metode pelapisan sol gel dengan modifikasi PTFE dan SiO₂ menunjukkan bahwa penyerapan cahaya meningkat tinggi, hingga 99,44% pada kondisi optimal (Sun et al., 2020). Meskipun lapisan hidrofobik memiliki keunggulan dalam melakukan pembersihan panel, hidrofobik juga memiliki beberapa keterbatasan dalam temuan Lu seperti ketika kondisi angin yang bertiup kencang atau kerusakan akibat abrasi, efisiensi nya akan mengalami penurunan (H. Lu et al., 2023).

Hasil dari studi yang disajikan dalam tabel menunjukkan bahwa lapisan hidrofobik secara konsisten meningkatkan efisiensi panel surya melalui peningkatan transmisi cahaya dan penurunan akumulasi debu. Beberapa studi, seperti yang dilakukan oleh Nomeir, menunjukkan bahwa lapisan ini juga memiliki kemampuan self-cleaning, menjaga transparansi panel hingga 93% (Nomeir et al., 2023). Namun dalam penelitian lain didapatkan bahwa bahan tertentu seperti PTFE jika diaplikasikan dalam jumlah yang berlebihan akan menurunkan kinerja dari optik lapisan (Sun et al., 2020).

Dengan demikian lapisan hidrofobik pada panel surya memberikan peranan yang sangat penting dalam melakukan pembersihan dibandingkan dengan pembersihan yang dilakukan secara konvensional atau manual, terutama pada lingkungan dengan daerah yang memiliki iklim yang tidak menentu atau curah hujan yang sedikit, namun lapisan ini juga memiliki keterbatasan seperti penggunaan pada daerah yang memiliki kecepatan angin yang tinggi. Penggunaan lapisan yang berlebihan juga dapat mempengaruhi kinerja seperti mengurangi efisiensi dari panel surya, sehingga diperlukan kombinasi yang sempurna antara lapisan hidrofobik dengan metode lain dalam memaksimalkan efisiensi panel surya.

3.3. Metode Pembersihan Otomatis Menggunakan Sensor

Tabel 4.

Studi Terpilih Mengenai Metode Pembersihan Otomatis Menggunakan Sensor

Peneliti	Mekanisme	Kelebihan	Kekurangan	Efisiensi
(Hassan et al., 2024)	Deteksi debu	Deteksi debu pada permukaan panel menggunakan sensor debu	Deteksi debu secara otomatis, tingkat akurasi deteksi 95%, meningkatkan efisiensi panel	Memerlukan kalibrasi dan pemeliharaan sensor.
(Bose et al., 2024)	Mitigasi debu berbasis sensor Infrared	Lengan robotik yang dilengkapi dengan sensor ir	Meningkatkan efisiensi panel surya, konsumsi	Mungkin perlu kalibrasi sensor secara berkala.

		untuk penghilangan debu dari permukaan panel surya.	air yang rendah, biaya per siklus pembersihan rendah.	
(Ghodki, 2022)	Intelligent cleanig (robots dan UAVs)	Membersihkan panel pv menggunakan robot dan drone yang dikendalikan oleh algoritma kecerdasan buatan (AI) berbasis sensor radiometer untuk mendeteksi debu di panel yang tertanam di UAV	Mengurangi intervensi manual, menghemat sumber daya, meningkatkan efisiensi pembersihan.	Biaya awal tinggi untuk instalasi robotik dan ai, membutuhkan pemeliharaan reguler untuk sensor dan algoritma ai.
(Wan et al., 2024)	Sistem Pembersihan Otomatis Berbasis Air	Menggunakan nozzle kipas datar untuk menyemprotkan air pada modul pv dan menghilangkan debu yang disebabkan oleh embun dengan bantuan sensor debu dan sensor kelembaban	Mengurangi kerugian akibat pengotoran pada berbagai sudut kemiringan, efek pendinginan pada modul pv, mengurangi suhu permukaan	Membutuhkan air untuk pembersihan konsumsi air (7,325 l untuk 1,48 m ²), biaya awal pemasangan yang tinggi
(Umar et al., 2023)	Sistem pembersihan panel surya otomatis	Menggunakan sensor suhu untuk mendeteksi kinerja efisiensi panel surya	Meningkatkan efisiensi panel surya, mengurangi suhu sel surya, memungkinkan pemanenan air hujan dan daur ulang air pembersih.	Mungkin perlu kalibrasi sensor secara berkala, biaya awal tinggi, diperlukan konsumsi daya tambahan
(Nahar Myyas et al., 2022)	Robot Pembersih Otomatis	Menggunakan teknologi robotik dengan sistem	Mengurangi biaya dan waktu	Robot terbatas pada satu baris dalam array pv, biaya

		pembersihan otomatis yang mengandalkan sensor dan kontrol	pembersihan, efisiensi dalam penggunaan air, mengoptimalkan produksi energi surya	awal dan pemeliharaan yang tinggi, keterbatasan dalam navigasi
(Abraim et al., 2023)	PVSMS: Sistem Pemantauan Pengotoran Modul PV	Sistem pvsms memonitor pengotoran pada modul pv dan menyediakan data untuk menjadwalkan pembersihan yang optimal.	Mengurangi kehilangan energi akibat kotoran., membantu optimasi jadwal pembersihan, biaya rendah.	Diperlukan instalasi sistem tambahan, perlu validasi lapangan secara berkala.
(Mousavi & Farahani, 2022)	Pembersihan otomatis dengan robot hisap	Robot mfv01 menggunakan sistem hisap dan dua set sikat untuk membersihkan permukaan panel pv dengan bantuan sensor ultrasonik untuk menentukan posisi.	Kualitas pembersihan lebih tinggi, kecepatan pembersihan lebih cepat, sistem hisap efektif mengumpulkan debu.	Membutuhkan perawatan tambahan untuk sistem hisap dan sensor ultrasonik.
(Hariri, 2022)	Mitigasi Debu menggunakan Shape Memory Alloy (SMA)	Menggunakan kawat sma sebagai aktuator yang memanfaatkan energi panas yang tidak diinginkan dari belakang panel pv untuk menggerakkan sistem pembersihan. Proses pembersihan diaktifkan ketika suhu sma mencapai 60°C	Tidak memerlukan sumber energi eksternal tambahan, efektif di lingkungan berdebu seperti gurun.	Membutuhkan suhu tinggi (60°C) agar sistem sma dapat berfungsi, memerlukan pengaturan untuk lingkungan yang berbeda.
(Olorunfemi et al., 2023b)	Pendeteksi dan	Menggunakan sensor warna	Deteksi kotoran yang cepat dan	Sensitivitas sensor warna perlu

	penghilang kotoran dengan Arduino	tcs3200 dan arduino uno untuk mendeteksi perubahan warna akibat kotoran, serta membersihkannya dengan sikat berputar cepat tanpa menggunakan air.	akurat, ekonomis dibandingkan dengan penggunaan kamera robotik atau metode perhitungan matematis, mengoptimalkan jadwal pembersihan panel.	ditingkatkan, terutama pada jarak yang lebih jauh dari panel, mungkin memerlukan kombinasi beberapa sensor warna untuk meningkatkan akurasi.
(Navle et al., 2024)	Sistem pembersihan otomatis untuk panel surya yang dikendalikan oleh Programmable Logic Controller (PLC)	Integrasi sensor yang memantau kondisi lingkungan dan status mekanisme pembersihan menggunakan mechanical brushes and water agents	Real time monitoring, meningkatkan efisiensi energi, penghematan biaya, mengurangi kebutuhan tenaga kerja manual	Biaya awal tinggi, ketergantungan pada kondisi lingkungan, memerlukan pemeliharaan sistem
(Roy et al., 2021)	PLC-based Robust Automatic Cleaning System	Menggunakan rangkaian kontrol berbasis plc yang dirancang dengan logika tangga di perangkat lunak delta ipssoft dan diverifikasi melalui model simulasi human machine interface (hmi) menggunakan sikat nilon yang kuat dan alat penyapu untuk menyeka air	Pengaturan yang ekonomis, lebih andal, dikendalikan secara otomatis	Sering membutuhkan pasokan air, memerlukan brushes untuk perawatan
(Menon et al., 2023)	Sistem pembersihan otomatis	Penggunaan sensor debu optik untuk mendeteksi debu	Meningkatkan efisiensi panel surya dengan	Hanya dapat bekerja pada satu panel

	untuk panel surya	dan mikrokontroler arduino mengirimkan sinyal untuk mengaktifkan sistem pembersihan	mengurangi efek debu, ramah lingkungan	surya, membutuhkan perawatan rutin
(Habib et al., 2021)	Sistem pembersihan panel surya otomatis berbasis Arduino untuk menghilangkan debu	Penggunaan kipas angin untuk meniup debu dari permukaan lalu menggunakan wiper untuk menyapu sisa debu yang ada di permukaan	Sistem ini tidak memerlukan air, ekonomis karena dibuat dengan komponen yang mudah didapat	Tidak efektif untuk kotoran yang lengket, terbatas untuk debu berpasir
(Al Dahoud et al., 2021)	Penggunaan sensor debu dan perangkat mikrokontroler untuk mendeteksi dan membersihkan debu dari panel surya secara otomatis.	Sensor yang mendeteksi debu dan memicu mesin untuk membersihkan panel surya. Ketika debu terdeteksi, sistem secara otomatis mengaktifkan mesin untuk melakukan prosedur pembersihan	Mengurangi kebutuhan tenaga kerja manusia di daerah terpencil, pemantauan real time dengan gui	Masalah karena keterbatasan sumber daya air pada daerah terpencil Perawatan dan kalibrasi sensor secara berkala
(Fatima Alzarooni et al., n.d.)	Sistem pembersihan panel surya otomatis menggunakan dua sikat mikrofiber yang digerakkan oleh dua motor DC terpisah.	Menggunakan motor dc, roda gigi, dan roda yang berinteraksi untuk menggerakkan mesin sepanjang panel.	Ramah lingkungan, implementasi rendah biaya Sistem tanpa air, ideal untuk daerah kering	Efektivitas terbatas untuk kotoran yang lengket atau berminyak, baterai perlu diisi ulang secara teratur

(Murshiduzzama n et al., 2021)	Metode berbasis IoT untuk memantau kepadatan debu dan efisiensi panel surya.	Menggunakan sensor debu untuk mendekripsi kepadatan debu dan mikrokontroler yang terhubung dengan wi-fi untuk mengumpulkan dan memproses data.	Terjangkau dan dapat diakses, bahan yang mudah didapat dan murah, pemantauan yang efisien dan real-time	Hanya bisa satu panel surya, membutuhkan koneksi internet
(Younes et al., 2023)	Sistem pembersihan otomatis untuk panel surya yang menggunakan Arduino sebagai kontrol utama	Sistem pembersihan yang dikendalikan arduino yang memonitor tegangan, arus, dan suhu.	Efektif tanpa merusak atau menggores permukaan panel, tidak memerlukan air dalam jumlah besar, cocok untuk tempat yang tidak memiliki sumber air	Membutuhkan perawatan rutin, membutuhkan biaya persiapan awal untuk otomatisasi
(Balamurugan et al., 2023)	Sistem IoT Terintegrasi untuk Pembersihan Debu Otomatis Panel Surya	Pembersihan diaktifkan oleh penurunan daya keluaran yang akan mengaktifkan motor penghapus.	IoT memungkinkan akses jarak jauh, hanya memerlukan sedikit perawatan. Menggunakan lebih sedikit air	Membutuhkan biaya pengaturan awal, pemeliharaan diperlukan untuk sistem iot
(Barua et al., 2023)	Desain baru dari robot pembersih panel surya (SPCR)	Terdiri dari tangki air dan kipas saluran (duct fan) yang digunakan untuk memperkuat operasi pembersihan berdasarkan jenis debu.	Biaya keseluruhan dari prototipe ini terjangkau, mengoptimalkan penggunaan sumber daya berharga seperti air	Membutuhkan pemeliharaan komponen robotik, membutuhkan pengembangan penghindaran rintangan dan perencanaan jalur dinamis

Pembersihan otomatis yang menggunakan sensor berperan penting dalam memprediksi dan mendekripsi jumlah debu dan kotoran pada panel surya agar efisiensinya tetap terjaga. Pembersih

otomatis sangat cocok digunakan di daerah yang bercuaca tidak stabil terutama dengan curah hujan rendah sehingga tidak memungkinkan penerapan pembersihan manual terus menerus. Sensor pada sistem pembersihan otomatis akan memantau berkala dan real-time pada panel surya agar dapat memberikan data untuk penjadwalan pembersihan otomatis yang akan meningkatkan efisiensi kinerja panel surya.

Tabel diatas memuat tentang beberapa studi yang telah ditelaah mengenai pembersihan otomatis menggunakan sensor seperti sensor debu, sensor inframerah (IR) dan sensor suhu yang mendeteksi debu dan kotoran di permukaan panel. Pada penelitian yang dilakukan oleh Hassa, sensor debu dapat mendeteksi dengan tingkat akurasi sampai 95% yang menyebabkan efisiensi kinerja panel surya meningkat hingga 9% (Hassan et al., 2024). Sedangkan penelitian oleh Bose menggunakan sensor IR yang diletakkan di lengan robot untuk mengahpus debu dan kotoran dengan penggunaan air yang sedikit memiliki kemampuan untuk meningkatkan efisiensi energi sampai 13,02% sehingga sistem ini lebih hemat sumber daya jika dibandingkan dengan pembersihan manual (Bose et al., 2024). Sementara penelitian Ghodki dengan robot dan drone berbasis kecerdasan buatan (AI) memiliki efisiensi hingga 49,53% untuk membersihkan panel surya walaupun membutuhkan biaya instalasi dan pemeliharaan yang tinggi (Ghodki, 2022).

Penggunaan pembersih otomatis dengan sensor pada panel surya memiliki sistem penjadwalan yang dipantau secara berkala sehingga pembersihan dapat lebih efisien dan mengurangi kemungkinan pemborosan sumber daya terutama jika di wilayah cuara stabil dengan curah hujan rendah. Abraim pada penelitiannya mengembangkan sistem PVSMS (Photovaltic Soiling Monitoring System) yang memantau jumlah debu dan kotoran di modul panel surya sehingga memudahkan penjadwalan pembersihan otomatis dengan waktu yang lebih optimal (Abraim et al., 2023). Sistem PVSMS bekerja berdasarkan kondisi aktual dari panel surya sehingga tidak memerlukan penjadwalan tetap, meskipun begitu efisiensi energi tetap optimal. Selain itu pada penelitian yang telah dilakukan oleh Umar menyatakan bahwa penerapan sensor suhu pada sistem pembersihan otomatis mendeteksi penurunan efisiensi energi pada panel surya akibat dari menumpuknya jumlah debu dan kotoran yang mengakibatkan penurunan efisiensi hingga 50% dalam waktu hanya sebulan. Hal ini sangat berguna jika diterapkan di wilayah yang memiliki curah hujan rendah (Umar et al., 2023).

Sensor memungkinkan penggunaan teknologi pembersihan otomatis seperti yang dilakukan oleh Bose dengan menggunakan lengan robot berbasis sensor inframerah (IR). Sistem ini akan otomatis menghilangkan debu dan kotoran di permukaan panel dengan hanya memerlukan sedikit air sehingga lebih hemat sumber daya. Penerapan sistem ini sangat cocok di wilayah yang memiliki curah hujan rendah karena sistem ini menghemat penggunaan air dan meningkatkan efisiensi kinerja panel surya. Teknologi sistem robot mampu meningkatkan efisiensi panel hingga 13,02% dan mengurangi konsumsi air dibandingkan pembersihan manual (Bose et al., 2024). Sedangkan penelitian oleh Ghodki menggunakan robot dan drone dengan kecerdasan buatan (AI) yang terintegrasi sensor radiometer untuk memantau panel surya dari debu dan kotoran. Sistem ini memiliki efektifitas kerbersihan panel hingga 49,53% dan dapat mengurangi intervensi manual (Ghodki, 2022).

Meskipun memiliki beberapa keunggulan, metode pembersihan otomatis memiliki biaya awal yang tinggi dan pemeliharaan berkala. Kalibrasi sensor dan biaya awal tinggi diperlukan untuk pengembangan lebih lanjut pada sistem otomatisasi. Secara keseluruhan, pembersihan otomatis dengan sensor menjadi metode pembersihan yang efisien dan modern untuk menghilangkan debu dan kotoran

terutama untuk wilayah bercurah hujan rendah. Penggunaan sensor dalam sistem ini memungkinkan pembersihan menjadi lebih akurat dan efisien dibandingkan dengan pembersihan manual.

4. Diskusi

Pada bagian ini, kami akan membahas dan menjawab petanyaan penelitian yang telah kami susun

4.1. Bagaimana penerapan teknologi pembersihan otomatis pada panel surya, seperti lapisan hidrofobik, dibandingkan dengan metode pembersihan manual dalam meningkatkan efisiensi energi di lingkungan berdebu tinggi?

Efektivitas Pembersihan Manual di Lingkungan Berdebu: Dari informasi yang tercantum dalam tabel dan penjelasan yang diberikan, metode pembersihan manual efektif di daerah berdebu dapat memberikan peningkatan efisiensi energi panel surya, terutama ketika dilakukan secara rutin. Najmi melaporkan efisiensi hingga 90% dengan pembersihan manual berkala menggunakan sikat atau kain (Najmi & Rachid, 2023). Namun, membersihkan secara manual sering kali membutuhkan frekuensi yang tinggi dan tenaga kerja intensif, terutama di wilayah dengan akumulasi debu yang signifikan, seperti yang ditemukan oleh Fatima, di mana pembersihan teratur dapat meningkatkan kinerja hingga 28%, tetapi memerlukan 8–12 siklus per tahun (Fatima et al., 2024). Hal ini mengindikasikan bahwa walaupun metode tersebut efektif dalam jangka pendek, menciptakan masalah di area dengan debu tinggi karena kebutuhan tenaga kerja yang besar dan biaya operasional untuk pembersihan rutin.

Jika diamati lebih lanjut, lapisan hidrofobik, pada lingkungan dengan intensitas debu yang tinggi, menawarkan produksi energi lebih efisien dibandingkan pembersihan permukaan panel surya secara manual. Ini dikarenakan sifat self-cleaning memungkinkan pembersihan otomatis tanpa memerlukan tenaga yang intens. Sánchez mencatat bahwa pembersihan manual dapat meningkatkan produksi energi hingga 35,25% pada bulan-bulan kering, tetapi memerlukan biaya tenaga kerja yang tinggi dan memakan waktu (Sánchez-Barroso et al., 2021). Selain itu, lapisan hidrofobik seperti yang dijelaskan oleh Nomeir memiliki kemampuan untuk menjaga transparansi panel surya hingga 93%, meskipun memerlukan perlindungan terhadap abrasi (Nomeir et al., 2023). Dari pernyataan oleh Najmi sebelumnya, bahwa pembersihan panel surya secara manual dapat meningkatkan efisiensi, lapisan hidrofobik menawarkan keunggulan dan solusi jangka panjang yang lebih efisien di lingkungan berdebu dengan minim intervensi manusia.

Dibandingkan dengan pembersihan manual dan menggunakan coating hidrofobik, pembersihan otomatis dengan sensor memiliki efisiensi yang tinggi. Pembersihan manual lebih cocok digunakan di daerah memiliki sedikit debu atau kotoran karena biayanya penggunaannya yang mudah dan murah. Sedangkan pada daerah dengan jumlah debu yang banyak jika menggunakan pembersihan manual akan kurang cocok karena membutuhkan pemeliharaan panel yang lebih intensif. Dalam konteks review sistematis, pembersihan otomatis dengan sensor mampu meningkatkan efisiensi energi pada panel surya karena pembersihan manual memiliki keterbatasan signifikan jika diterapkan di wilayah debu banyak. Sehingga pembersihan menggunakan coating hidrofobik dan pembersihan otomatis menggunakan sensor dinilai lebih efektif untuk wilayah dengan intensitas debu tinggi karena hemat biaya dan sumber daya serta memberikan hasil yang stabil untuk jangka panjang.

4.2. Bagaimana faktor lingkungan, seperti debu tinggi dan kondisi tertentu, mempengaruhi efektivitas lapisan hidrofobik dalam meningkatkan efisiensi panel surya dibandingkan metode pembersihan manual?

Dari studi-studi yang dikaji, terlihat bahwa faktor lingkungan, seperti kondisi dengan intensitas debu tinggi, dapat mempengaruhi efektivitas lapisan hidrofobik. Ratnaparkhi mengemukakan dalam lingkungan yang tercemar, pelapis hidrofobik tidak hanya mengurangi akumulasi partikel debu kecil berukuran 3-10 μm , tetapi juga diiringi menurunnya keefektifan kemampuan menerima cahaya panel surya karena partikel kecil tetap mempengaruhi secara signifikan (Ratnaparkhi, Dave, Meena, et al., 2023a). Hal tersebut menunjukkan meskipun lapisan hidrofobik efektif dalam kondisi lingkungan yang lebih bersih, performanya bisa menurun di lingkungan dengan intensitas debu atau polusi yang lebih tinggi. Selain faktor debu, kondisi kecepatan angin tinggi juga berperan penting dalam mengurangi efektivitas lapisan hidrofobik. Hal ini dibuktikan oleh penelitian yang dilakukan oleh Lu menemukan bahwa efisiensi panel surya menurun pada kecepatan angin tinggi ($> 2.1 \text{ m/s}$), efektivitas berkurang jika angin tidak langsung mengarah ke modul. Ini menunjukkan bahwa lingkungan dengan angin kencang tidak kondusif bagi efektivitas penuh lapisan hidrofobik.

Dibandingkan dengan metode pembersihan manual, metode lapisan hidrofobik memiliki keuntungan dalam mengurangi akumulasi debu secara otomatis dan tanpa intervensi manusia. Misalnya, Nomeir menemukan bahwa pelapis superhidrofobik mempertahankan transparansi hingga 93% dalam jangka waktu pendek, meskipun ada penurunan efektivitas dalam jangka waktu panjang akibat abrasi mekanik (Nomeir et al., 2023). Di sisi lain, metode pembersihan manual memerlukan campur tangan tenaga manusia dan tidak efektif tanpa pemeliharaan berkala, terutama di wilayah dengan kondisi berdebu tinggi atau polusi yang sering terjadi.

4.3. Sejauh mana penggunaan sensor dalam pembersihan panel surya dapat meningkatkan prediksi dan deteksi kotoran pada panel surya untuk memaksimalkan efisiensi energi di wilayah dengan curah hujan rendah?

Berdasarkan data yang telah didapatkan, sensor memiliki kemampuan yang tinggi dalam mendekripsi dan memprediksi penumpukan kotoran pada panel surya. Hal ini dibuktikan pada penelitian yang dilakukan oleh Hassan di mana ia menggunakan sensor debu yang secara otomatis mendekripsi kotoran dengan akurasi deteksi hingga 95%, memungkinkan peningkatan produksi energi hingga 9% (Hassan et al., 2024). Akurasi ini penting untuk penjadwalan pembersihan yang lebih tepat di daerah dengan curah hujan rendah, di mana pembersihan alami kurang dapat diandalkan.

Teknologi sensor yang diintegrasikan dalam sistem pembersihan otomatis terbukti mampu meningkatkan efisiensi panel surya secara signifikan. Hal ini dibuktikan pada penelitian yang dilakukan oleh Bose di mana ia menciptakan lengan robotik dengan sensor inframerah (IR) yang membersihkan panel surya dengan konsumsi air yang rendah, meningkatkan efisiensi PV hingga 13,02% (Bose et al., 2024). Penelitian oleh Ghodki yang menggunakan robot dan drone berbasis kecerdasan buatan dengan sensor radiometer, juga menunjukkan bawasannya sensor mampu meningkatkan efisiensi pembersihan hingga 49,53% tanpa perlu intervensi manual (Ghodki, 2022). Hasil ini menunjukkan bahwa sistem sensor otomatis dapat menjaga kebersihan panel surya secara efisien di lingkungan dengan hujan rendah.

Sistem sensor juga membantu mengoptimalkan jadwal pembersihan dengan mengurangi frekuensi pembersihan yang tidak perlu, yang sangat berguna di daerah dengan sumber daya terbatas.

Penelitian yang dilakukan Abraim mengembangkan sistem pemantauan pengotoran modul PV (PVSMS) yang menyediakan data untuk menjadwalkan pembersihan secara optimal, sehingga mengurangi kebutuhan akan pembersihan manual yang tidak efisien (Abraim et al., 2023). Selain itu, Umar melaporkan bahwa pada penelitiannya yang membahas sistem pembersihan panel surya berbasis sensor suhu mampu mengurangi penurunan efisiensi hingga 50% dalam waktu sebulan akibat akumulasi debu, yang tentunya bermanfaat untuk mempertahankan efisiensi energi di wilayah yang jarang mengalami hujan (Umar et al., 2023).

5. Kesimpulan

Ditinjau dari sistematik literatur yang sudah dilakukan dalam menganalisis efektivitas teknologi pembersihan panel surya otomatis di area berdebu. Melalui studi literatur yang sudah dilakukan, teknologi pembersihan panel surya otomatis memberikan dampak yang positif dan signifikan dalam mengurangi akumulasi debu yang menghambat efisiensi kinerja panel surya. Kami melakukan perbandingan antara metode pembersihan manual, pembersihan otomatis dan pembersihan menggunakan *self cleaning coating hidrofobik* dari artikel sekitar tahun 2019 sampai 2024. Berdasarkan hasil dari perbandingan yang dilakukan, pembersihan manual memiliki efektivitas yang rendah meskipun pembersihan dilakukan secara langsung. Sedangkan pembersihan otomatis memiliki efisiensi yang tinggi karena sistem ini bekerja secara berkala sesuai kebutuhan. Pembersihan *self cleaning hidrofobik* memiliki efisiensi tinggi dengan pembersihan yang pasif tetapi tidak efektif untuk daerah berdebu tebal karena akumulasi debu dapat terjadi saat kondisi ekstrem.

Setelah melakukan perbandingan antar pembersihan yang dianalisis, data dari analisis akan di ekstraksi untuk menjawab pertanyaan setiap RQ. Hasil dari tinjauan analisis ditemukan studi-studi terpilih sebagai berikut :

- RQ1 : Pembersihan manual meningkatkan efisiensi panel surya di area berdebu, tetapi memerlukan tenaga intensif dan biaya tinggi, sementara lapisan hidrofobik dan pembersihan otomatis menawarkan solusi lebih efisien dan berkelanjutan untuk jangka panjang.
- RQ2 : Lapisan hidrofobik efektif mengurangi debu di lingkungan bersih, namun performanya menurun di area berpolusi tinggi dan berangin, sementara pembersihan manual lebih bergantung pada intervensi rutin di area berdebu.
- RQ3 : Sensor otomatis meningkatkan efisiensi panel surya dengan mendeteksi kotoran secara akurat, mengoptimalkan jadwal pembersihan, dan mengurangi kebutuhan intervensi manual, terutama di lingkungan dengan curah hujan rendah.

Berdasarkan tinjauan literatur yang dilakukan pembersihan otomatis memberikan solusi paling efisien untuk lingkungan berdebu dengan frekuensi pembersihan tinggi, sedangkan teknologi *self-cleaning* hidrofobik cocok untuk daerah dengan kondisi cuaca yang mendukung pembersihan alami. Pembersihan manual, meskipun efektif, kurang efisien dalam jangka panjang dan hanya ideal dalam situasi khusus atau lingkungan yang memerlukan pembersihan mendetail. Implementasi gabungan dari teknologi ini dapat menjadi strategi yang optimal untuk menjaga kinerja panel surya di berbagai kondisi lingkungan.

Daftar Pustaka

- Abraim, M., El Ydrissi, M., Ghennoui, H., Ghennoui, A., Hanrieder, N., Wilbert, S., El alani, O., Boujoudar, M., & Azouzoute, A. (2023). PVSMS: A system for quantifying soiling effects and optimizing cleaning schedule in PV solar plants. *Energy Conversion and Management*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116978>
- Al Dahoud, A., Fezari, M., & Al Dahoud, A. (2021). Automatic solar panel cleaning system Design. 2021 29th Telecommunications Forum, TELFOR 2021 - Proceedings. <https://doi.org/10.1109/TELFOR52709.2021.9653215>
- Alam, K., Fareed, S., Khan, U. A., Khan, S., Farooq, M. U., Shakoor, A., & Saher, S. (2019). 2019 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE) : 24th - 25th July 2019, Swat, Pakistan. *International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*.
- Al-Salaymeh, A. S., Al-Mansi, N. N., Muslih, I. M., Altaharwah, Y. A., & Al Smadi, W. Y. (2023). Electrostatic cleaning effect on the performance of PV modules in Jordan. *Cleaner Engineering and Technology*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100606>
- Al-Sharafi, A., Ahmadullah, A. B., Hassan, G., Al-Qahtani, H., Abubakar, A. A., & Yilbas, B. S. (2024). Influence of environmental dust accumulation on the performance and economics of solar energy systems: A comprehensive review. In *Cleaner Energy Systems* (Vol. 8). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100125>
- Alvarez, D. L., Al-Sumaiti, A. S., & Rivera, S. R. (2020). Estimation of an Optimal PV Panel Cleaning Strategy Based on Both Annual Radiation Profile and Module Degradation. *IEEE Access*, 8, 63832–63839. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2983322>
- Ayad, D., Hassan, F., Alkhori, S., Touati, F., & Gonzales, A. S. P. (2024). Reduction of Dust and Temperature Effects on PV Performance in Qatar and the Gulf Region. 4th International Conference on Smart Grid and Renewable Energy, SGRE 2024 - Proceedings. <https://doi.org/10.1109/SGRE59715.2024.10429033>
- Balamurugan, R., Kumar, A. A., Kalaimaran, A., & Sathish, V. (2023). Integrated IoT System for Automatic Dust Cleaning of Solar Panels. *Proceedings of the 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Smart Energy, ICAIS 2023*, 1504–1506. <https://doi.org/10.1109/ICAIS56108.2023.10073675>
- Barua, S., Oishi, A. N., Shadman Shafkat Tanjim, M., Mansur, A. Al, Ahmed, I., & Shihavuddin, A. S. M. (2023). Performance Analysis of a Solar Panel Cleaning Autonomous Robot (SPCR) with comparative study. 2023 26th International Conference on Computer and Information Technology, ICCIT 2023. <https://doi.org/10.1109/ICCIT60459.2023.10440987>
- Bose, I., Sengupta, S., Ghosh, S., Saha, H., & Sengupta, S. (2024). Development of smart dust detector for optimal generation of SPV power plant by cleaning initiation. *Solar Energy*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112643>
- Bukhari, S. F., Lisco, F., Moghim, T. B., Taylor, A., & Walls, J. M. (2019). 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). *IEEE 46th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*.
- Carrera-Rivera, A., Larrinaga, F., & Lasa, G. (2022). Context-awareness for the design of Smart-product service systems: Literature review. In *Computers in Industry* (Vol. 142). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103730>

- Deng, W., Wang, W., Chen, J., Zhao, S., Gu, W., Nan, J., Ji, Y., Xia, Y., Mao, Z., Zhu, L., Yu, X., & Zhang, Y. (2024). Negative expansion induced anti-abrasive self-cleaning coatings for enhancing output of solar panels. *Chemical Engineering Journal*, 499. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156153>
- Dogra, V., Kishore, C., Mishra, A., Gaur, A., & Verma, A. (2023). Sol-Gel preparation and wetting behaviour analysis of hydrophobic Zirconium based nano-coating: Implications for solar panel coating. *Chemical Engineering Journal Advances*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cejadv.2023.100507>
- Ekren, N., Sarkin, A. S., & Saglam, S. (2022). A Hydrophobic Antireflective and Antidust Coating with SiO₂ and TiO₂ Nanoparticles Using a New 3-D Printing Method for Photovoltaic Panels. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 12(4), 1014–1026. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3177229>
- Elamim, A., Elhamaoui, S., Tijani, K., Benazzouz, A., Martins, C., Queiroz, B., Faria, C., & Ghennioui, A. (2023). Performance analysis of innovative cleaning and soiling mitigation solutions in the semi-arid climate of Benguerir Morocco. *Helijon*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.helijon.2023.e16163>
- Farrokhi Derakhshandeh, J., AlLuqman, R., Mohammad, S., AlHussain, H., AlHendi, G., AlEid, D., & Ahmad, Z. (2021). A comprehensive review of automatic cleaning systems of solar panels. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101518>
- Fatima Alzarooni, st I., Almajali, qab R., Aisha Alkharji, nd K., & Asma Alsuwaidi, rd A. (n.d.). *Design and Implementation of an Automated Dry Solar-Panel Cleaning System*.
- Fatima, K., Faiz Minai, A., Malik, H., & García Márquez, F. P. (2024). Experimental analysis of dust composition impact on Photovoltaic panel Performance: A case study. *Solar Energy*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112206>
- Ghodki, M. K. (2022). An infrared based dust mitigation system operated by the robotic arm for performance improvement of the solar panel. *Solar Energy*, 244, 343–361. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.064>
- Habib, M. R., Tanvir, M. S., Suhan, A. Y., Vadher, A., Alam, S., Shawmee, T. T., Ahmed, K., & Alrashed, A. (2021). Automatic Solar Panel Cleaning System Based on Arduino for Dust Removal. *Proceedings - International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems, ICAIS 2021*, 1555–1558. <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9395937>
- Hariri, N. (2022). A novel dust mitigation technology solution of a self-cleaning method for a PV module capable of harnessing reject heat using shape memory alloy. *Case Studies in Thermal Engineering*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101894>
- Hassan, G., Sami Yilbas, B., Al-Sharafi, A., Al-Sulaiman, F., & Abdulhamid Abubakar, A. (2024). Dust mitigation strategies concerning solar energy applications: A comprehensive review. In *Solar Energy* (Vol. 277). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112728>
- Jaiganesh, K., Bharath Simha Reddy, K., Shobhitha, B. K. D., & Dhanush Goud, B. (2021). Enhancing the efficiency of rooftop solar photovoltaic panel with simple cleaning mechanism. *Materials Today: Proceedings*, 51, 411–415. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.565>
- Khadka, N., Bista, A., Adhikari, B., Shrestha, A., Bista, D., & Adhikary, B. (2020). Current Practices of Solar Photovoltaic Panel Cleaning System and Future Prospects of Machine Learning Implementation. *IEEE Access*, 8, 135948–135962. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3011553>
- Ko, K., Yoon, D., Yang, S. C., & Lee, H. S. (2022). Brush-painted superhydrophobic silica coating layers for self-cleaning solar panels. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 106, 460–468. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.11.023>

- Liu, B., Zeng, J., Li, P., Kui, M., Li, J., & Chen, K. (2024). Development of flexible nanocellulose-based composites with enhanced hydrophobicity and improved haze for efficient light management in solar cells. *Chemical Engineering Journal*, 498. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155273>
- Lu, H., He, B., & Zhao, W. (2023). Experimental study on the super-hydrophobic coating performance for solar photovoltaic modules at different wind directions. *Solar Energy*, 249, 725–733. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.023>
- Lu, L., Zhu, L., Liu, X., & Li, J. (2022). Self-cleaning mechanisms and laws of hydrophilic or hydrophobic surfaces of solar photovoltaic glass. *Chemical Engineering Research and Design*, 188, 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.09.055>
- Menon, G., Sathyam, A. N., Tharayil, J. J., Ramesh, A., & Jayan, A. R. (2023). Automatic Solar Panel Cleaner. *RASSE 2023 - IEEE International Conference on Recent Advances in Systems Science and Engineering, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/RASSE60029.2023.10363542>
- Mousavi, S., & Farahani, G. (2022). Introducing a new method of automatic cleaning of the PV array surface using a suction robot. *Mechatronics*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2022.102845>
- Murshiduzzaman, Kadir, J. A., Ismarrubie, Z. N., Yussof, H., & Hasan, W. Z. W. (2021). Development of IoT Based Dust Density and Solar Panel Efficiency Monitoring System. *International Conference on Electrical, Computer, and Energy Technologies, ICECET 2021*. <https://doi.org/10.1109/ICECET52533.2021.9698605>
- Nahar Myyas, R., Al-Dabbasa, M., Tostado-Véliz, M., & Jurado, F. (2022). A novel solar panel cleaning mechanism to improve performance and harvesting rainwater. *Solar Energy*, 237, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.068>
- Najmi, N., & Rachid, A. (2023). A Review on Solar Panel Cleaning Systems and Techniques. In *Energies* (Vol. 16, Issue 24). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en16247960>
- Navle, I. A., Rokade, M. R., Pardeshi, D. B., & Kadam, B. (2024). Smart Dust Removal System for Solar Panel by using Programmable Logic Controller. *2024 8th International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 642–645. <https://doi.org/10.1109/ICISC62624.2024.00112>
- Nayshevsky, I., Xu, Q., Newkirk, J. M., Furhang, D., Miller, D. C., & Lyons, A. M. (2020). Self-Cleaning Hybrid Hydrophobic-Hydrophilic Surfaces: Durability and Effect of Artificial Soilant Particle Type. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(2), 577–584. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2955559>
- Nomeir, B., Lakhoul, S., Boukheir, S., Ali, M. A., & Naamane, S. (2023). Recent progress on transparent and self-cleaning surfaces by superhydrophobic coatings deposition to optimize the cleaning process of solar panels. In *Solar Energy Materials and Solar Cells* (Vol. 257). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112347>
- Olorunfemi, B. O., Nwulu, N. I., & Ogbolumani, O. A. (2023a). Solar panel surface dirt detection and removal based on arduino color recognition. *MethodsX*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101967>
- Olorunfemi, B. O., Nwulu, N. I., & Ogbolumani, O. A. (2023b). Solar panel surface dirt detection and removal based on arduino color recognition. *MethodsX*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101967>
- Ratnaparkhi, A., Dave, D., Meena, R., Rastogi, N., Bergin, M., & Ghoroi, C. (2023a). Is hydrophobic coating on glass equally efficient in reducing % soiling loss of solar PVs in clean and polluted environments? *Solar Energy*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112120>

- Ratnaparkhi, A., Dave, D., Meena, R., Rastogi, N., Bergin, M., & Ghoroi, C. (2023b). Is hydrophobic coating on glass equally efficient in reducing % soiling loss of solar PVs in clean and polluted environments? *Solar Energy*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112120>
- Ratnaparkhi, A., Dave, D., Valerino, M., Bergin, M., & Ghoroi, C. (2023). Reduction in solar PV soiling loss using hydrophobic coating with and without dew suppression. *Solar Energy*, 253, 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.02.047>
- Roy, S., Mandal, M., Jena, C., Sinha, P., & Jena, T. (2021). Programmable-Logic-Controller Based Robust Automatic Cleaning of Solar Panel for Efficiency Improvement. *2021 International Conference in Advances in Power, Signal, and Information Technology, APSIT 2021*. <https://doi.org/10.1109/APSIT52773.2021.9641148>
- Said, S. Z., Islam, S. Z., Radzi, N. H., Wekesa, C. W., Altimania, M., & Uddin, J. (2024a). Dust impact on solar PV performance: A critical review of optimal cleaning techniques for yield enhancement across varied environmental conditions. In *Energy Reports* (Vol. 12, pp. 1121–1141). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.06.024>
- Said, S. Z., Islam, S. Z., Radzi, N. H., Wekesa, C. W., Altimania, M., & Uddin, J. (2024b). Dust impact on solar PV performance: A critical review of optimal cleaning techniques for yield enhancement across varied environmental conditions. In *Energy Reports* (Vol. 12, pp. 1121–1141). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.06.024>
- Sánchez-Barroso, G., González-Domínguez, J., García-Sanz-Calcedo, J., & Sanz, J. G. (2021). Markov chains estimation of the optimal periodicity for cleaning photovoltaic panels installed in the dehesa. *Renewable Energy*, 179, 537–549. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.075>
- Sarkin, A. S., Eken, N., & Sağılam, S. (2020). A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels. In *Solar Energy* (Vol. 199, pp. 63–73). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.084>
- Shahsavari, A., & Akbari, M. (2018). Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 90, pp. 275–291). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065>
- Singh, M., Ambedkar, A. K., Gautam, D., Kumar, A., Gautam, Y. K., Kumar, Y., Kumar, A., & Singh, B. P. (2024). Tailoring the structural, optical, hydrophobicity and electrical properties of ZnO thin films by copper doping for self-clean optoelectronic application. *Hybrid Advances*, 6, 100260. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100260>
- Sun, X., Li, L., Xu, X., Song, G., Tu, J., Yan, P., Zhang, W., & Hu, K. (2020). Preparation of hydrophobic SiO₂/PTFE sol and antireflective coatings for solar glass cover. *Optik*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164704>
- Syafiq, A., Pandey, A. K., Adzman, N. N., & Rahim, N. A. (2018). Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels. In *Solar Energy* (Vol. 162, pp. 597–619). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.023>
- Umar, S., Waqas, A., Tanveer, W., Shahzad, N., Janjua, A. K., Dehghan, M., Qureshi, M. S., & Shakir, S. (2023). A building integrated solar PV surface-cleaning setup to optimize the electricity output of PV modules in a polluted atmosphere. *Renewable Energy*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119122>
- Wan, L., Zhao, L., Xu, W., Guo, F., & Jiang, X. (2024). Dust deposition on the photovoltaic panel: A comprehensive survey on mechanisms, effects, mathematical modeling, cleaning methods, and

monitoring systems. In *Solar Energy* (Vol. 268). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112300>

Younes, M. B., Shaban, N. A., & Abdelhafez, E. (2023). Efficient Solar Panel Cleaning Automation with Arduino. *CANDO-EPE 2023 - Proceedings: IEEE 6th International Conference and Workshop Obuda on Electrical and Power Engineering*, 37–42. <https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE60507.2023.10418023>

Zhang, S., Xiao, P., Wang, P., Luo, J., & Jiang, B. (2020). Spherical-chain silica with super-hydrophobic surface and ultra-low refractive index for multi-functional broadband antireflective coatings. *Solar Energy*, 207, 1222–1230. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.060>