

Estimasi Kehilangan Kinerja yang Berkaitan dengan Soiling pada PLTS Atap: Perbandingan PR Aktual, PVsyst, dan Respons Pembersihan di Gedung Cooling Water Pump PLTU Suralaya

Setya Cahya Utama^{1*}, Dharni Johar Damiri²

Program Studi S2 Teknik Elektro, Sekolah Pascasarjana, Institut Teknologi PLN^{1,2}

Corresponding email*: setya@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History

Submission : 01-08-2026

Received : 14-08-2026

Revised : 27-08-2026

Accepted : 28-08-2026

Keywords

PLTS Atap;

Soiling;

Performance Ratio;

Pvsyst

DOI:

10.59066/ijoms.v5i2.2841

ABSTRACT

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap Gedung *Cooling Water Pump* (CWP) PLTU Suralaya beroperasi pada lingkungan industri yang berpotensi meningkatkan deposisi pengotor (*soiling*) akibat kedekatannya dengan area penimbunan batubara, aktivitas penanganan abu pembakaran, dan lingkungan pesisir. Penelitian ini bertujuan mengestimasi kehilangan kinerja yang berkaitan dengan kondisi *soiling* melalui perbandingan *Performance Ratio* (PR) aktual dengan hasil simulasi PVsyst serta mengevaluasi respons kinerja setelah kejadian pembersihan modul. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif dengan desain studi kasus *ex post facto* berdasarkan data operasi selama 22 bulan valid pada Januari 2024–Desember 2025 dan empat kejadian pembersihan yang diperlakukan sebagai *natural experiments*. Analisis dilakukan melalui perbandingan PR aktual dan simulasi, perubahan kinerja sebelum dan sesudah pembersihan, serta pemeriksaan pola kurva daya inverter terhadap iradiasi dan *heatmap specific power*. Hasil menunjukkan bahwa PR aktual rata-rata mencapai 70,88% pada 2024 dan 72,61% pada 2025, lebih rendah daripada PR desain sebesar 74,23%. Perubahan PR antarperiode sebelum dan sesudah pembersihan menghasilkan estimasi kehilangan kinerja terkait *soiling* sebesar 12,8%–36,7%; nilai tersebut diperlakukan sebagai *upper-bound estimate* yang masih terkonfounded oleh temperatur modul, *mismatch*, *availability*, *clipping*, *curtailment*, bias sensor iradiasi, degradasi, dan ketidakpastian model PVsyst. Pembersihan basah menunjukkan pemulihan PR yang lebih besar dibandingkan pembersihan kering, sedangkan analisis *paired t-test* terhadap empat kejadian pembersihan menunjukkan indikasi perbedaan kinerja yang bersifat eksploratori (p satu arah = 0,032; Cohen's d = 1,43), sehingga hasil inferensial perlu ditafsirkan secara hati-hati. Estimasi deviasi produksi energi yang berkaitan dengan kondisi *soiling* mencapai 214,2 MWh atau sekitar Rp314,2 juta selama periode observasi, tetapi nilai tersebut tidak dapat sepenuhnya diatribusikan kepada *soiling*. Temuan menunjukkan adanya indikasi *residual/cemented soiling* yang lebih sulit dihilangkan melalui pembersihan kering. Penelitian ini memberikan kontribusi melalui integrasi data PR aktual, simulasi PVsyst, dan respons pembersihan untuk mengidentifikasi indikasi kehilangan kinerja yang berkaitan dengan *soiling* pada PLTS di lingkungan industri pembangkit listrik. Hasil penelitian dapat menjadi dasar awal untuk perencanaan strategi pemeliharaan dan interval pembersihan, dengan mempertimbangkan bahwa diperlukan pengukuran *soiling ratio* secara langsung serta data lingkungan yang lebih lengkap untuk memperoleh estimasi kausal yang lebih kuat.



Pendahuluan

Agenda transisi energi nasional menempatkan peningkatan pemanfaatan energi baru dan terbarukan (EBT) serta pengurangan emisi sektor ketenagalistrikan sebagai bagian penting dari strategi menuju Net Zero Emission (NZE). Dalam konteks tersebut, energi surya memiliki posisi strategis karena dapat diterapkan secara terdesentralisasi melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), termasuk PLTS atap pada fasilitas industri dan pembangkit listrik. Penerapan PLTS atap pada kawasan pembangkit termal dapat memberikan manfaat ganda, yaitu menyediakan sebagian kebutuhan listrik untuk pemakaian sendiri (*auxiliary power*) dan mendukung diversifikasi sumber energi serta pengurangan intensitas emisi. Namun demikian, manfaat tersebut tidak hanya ditentukan oleh kapasitas terpasang, tetapi juga oleh kemampuan sistem mempertahankan kinerja energi sepanjang umur operasinya. Faktor lingkungan, karakteristik peralatan, kualitas pemeliharaan, dan ketepatan asumsi desain dapat menyebabkan perbedaan antara kinerja yang diproyeksikan dan kinerja aktual. PLTU Suralaya yang dikelola PT PLN Indonesia Power Suralaya PGU merupakan salah satu fasilitas pembangkit termal berbahan bakar batubara dengan kapasitas sekitar 3.400 MW dan memiliki peran penting dalam sistem ketenagalistrikan Jawa–Madura–Bali (JAMALI). Di kawasan tersebut telah dikembangkan PLTS atap *grid-connected* dengan total kapasitas 3.056,94 kWp. Salah satu instalasinya berada pada atap Gedung *Cooling Water Pump* (CWP) dengan kapasitas 478,44 kWp, terdiri atas 886 modul monokristalin JA Solar JAM72S30-540/MR berkapasitas 540 Wp dan empat unit inverter Solis dengan kapasitas total 350 kWac. Sistem tersebut dioperasikan oleh PT Indo Tenaga Hijau. Berdasarkan dokumen desain PVsyst V7.2.13, sistem diproyeksikan menghasilkan energi tahunan sebesar 621,6 MWh dengan *Performance Ratio* (PR) sebesar 74,23%. Simulasi tersebut menggunakan asumsi *soiling loss* sebesar 7% per tahun sebagai salah satu komponen kehilangan energi utama setelah kehilangan akibat temperatur (Fourth Partner Energy Pvt Ltd., 2022). Akan tetapi, nilai 7% tersebut merupakan parameter asumsi desain dan bukan hasil pengukuran *soiling* aktual di lapangan. Oleh karena itu, perbandingan antara kinerja aktual dan hasil simulasi perlu dipahami sebagai evaluasi terhadap kesesuaian kinerja sistem dengan kondisi yang diproyeksikan, bukan sebagai pengukuran langsung kehilangan akibat *soiling*.

Soiling pada sistem fotovoltaik merujuk pada akumulasi material pengotor seperti debu, aerosol, partikel tanah, abu pembakaran, dan garam pada permukaan modul yang dapat mengurangi transmisi radiasi matahari menuju sel fotovoltaik. Faktor ini telah diidentifikasi sebagai salah satu sumber kehilangan energi yang penting dalam sistem PV, meskipun besarnya sangat bergantung pada karakteristik lokasi, meteorologi, material pengotor, kemiringan modul, dan karakteristik permukaan modul (Ilse et al., 2019; IEA-PVPS, 2022). Studi sebelumnya menunjukkan bahwa tingkat kehilangan akibat *soiling* sangat heterogen antarlokasi. Lingkungan arid dan semi-arid sering menjadi objek penelitian karena tingkat deposisi debu yang tinggi, tetapi mekanisme deposisi di lingkungan tropis lembap tidak selalu dapat disamakan dengan lingkungan kering. Kelembapan, embun, hujan, ukuran

partikel, komposisi kimia pengotor, dan siklus basah-kering dapat memengaruhi adhesi partikel serta kemungkinan terbentuknya lapisan pengotor yang lebih sulit dihilangkan. Karakteristik material pengotor juga penting dalam menentukan besarnya dampak terhadap kinerja modul. Partikel yang berasal dari aktivitas industri dan pembakaran dapat mempunyai karakteristik optik dan fisik berbeda dibandingkan debu tanah biasa. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa partikel debu batubara dapat menyebabkan penurunan transmisi cahaya yang relatif besar karena ukuran dan karakteristik optiknya (Kazem & Chaichan, 2016; Javed et al., 2017; Riaz & Mahmood, 2022). Selain itu, interaksi antara partikel, kelembapan, dan permukaan modul dapat menyebabkan terbentuknya deposisi yang lebih persisten. Fenomena *cemented soiling* atau *residual soiling* telah dilaporkan pada sejumlah lingkungan dengan tingkat deposisi tinggi, tetapi bukti mengenai karakteristik dan mekanismenya pada instalasi PV di kawasan industri batubara tropis masih terbatas (Fernández-Solas et al., 2022; Zhao et al., 2021). Dengan demikian, indikasi adanya pengotor yang lebih sulit dihilangkan perlu dibedakan dari pembuktian langsung mengenai komposisi dan mekanisme sementasi.

Pengukuran *soiling loss* secara metodologis juga tidak dapat hanya didasarkan pada selisih antara PR aktual dan PR hasil simulasi. Dalam praktik pengujian kinerja sistem PV, pendekatan pengukuran *soiling ratio* dapat menggunakan perangkat referensi bersih dan kotor (*clean/soiled reference devices*), sehingga perubahan irradiance akibat deposisi dapat dipisahkan secara lebih langsung dari variasi radiasi matahari. IEC 61724-1 memberikan kerangka pengukuran dan pemantauan kinerja sistem PV, termasuk parameter radiasi, energi, temperatur, dan indikator kinerja yang diperlukan untuk evaluasi sistem. Pendekatan berbasis referensi bersih-kotor memiliki keunggulan karena memungkinkan perubahan kondisi permukaan modul diamati secara lebih spesifik. Sebaliknya, apabila perangkat referensi tersebut tidak tersedia, estimasi berbasis perubahan PR atau perbedaan aktual terhadap simulasi harus diperlakukan sebagai pendekatan tidak langsung yang memiliki sumber ketidakpastian lebih besar. Perbedaan antara PR aktual dan PVsyst dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor selain *soiling*. Temperatur modul dapat menurunkan efisiensi konversi, sedangkan *mismatch*, *availability*, kehilangan kabel, inverter, *clipping*, *curtailment*, degradasi modul, kesalahan atau bias sensor *plane-of-array* (POA), serta perbedaan parameter model PVsyst dapat menghasilkan deviasi terhadap kondisi aktual. Oleh karena itu, perbedaan PR aktual dan simulasi sebaiknya dipahami sebagai *performance deviation* yang dapat berkaitan dengan beberapa mekanisme kehilangan. Dalam kondisi ketika pengukuran *soiling ratio* secara langsung tidak tersedia, atribusi khusus terhadap *soiling* perlu dilakukan secara hati-hati melalui kombinasi bukti operasional, perubahan sebelum dan sesudah pembersihan, kondisi meteorologis, dan pemeriksaan visual. Pendekatan tersebut memberikan indikasi yang berguna, tetapi belum dapat menggantikan pengukuran *soiling* secara langsung.

Persoalan metodologis tersebut menjadi semakin penting pada studi PLTS di Indonesia dan Asia Tenggara. Wilayah tropis memiliki karakteristik radiasi, curah hujan,

kelembapan, temperatur, dan siklus pembasahan yang berbeda dari wilayah gurun atau semi-gurun yang selama ini mendominasi literatur *soiling*. Hujan juga tidak secara otomatis dapat diasumsikan sebagai mekanisme pembersihan yang efektif. Efektivitas hujan dalam mengurangi pengotor bergantung pada intensitas dan durasi hujan, distribusi air pada permukaan modul, karakteristik partikel, serta proses pengeringan setelah hujan. Karena itu, hubungan antara curah hujan dan PR harus dianalisis menggunakan data temporal yang memadai, bukan hanya berdasarkan klasifikasi musim atau *seasonal outlook*. Dalam penelitian dengan data bulanan terbatas, pola musim lebih tepat digunakan sebagai informasi deskriptif daripada sebagai bukti korelasi kausal. Literatur mengenai kinerja PLTS di Indonesia mulai berkembang, tetapi penelitian yang secara khusus mengevaluasi hubungan antara kondisi lingkungan industri, perubahan PR, hasil simulasi PVsyst, dan kejadian pembersihan masih relatif terbatas. Studi perbandingan kinerja aktual dan simulasi pada PLTS berkapasitas kecil menunjukkan adanya kesenjangan antara PR aktual dan hasil simulasi, sementara studi komparatif perangkat simulasi pada PLTS skala lebih besar menunjukkan pentingnya kalibrasi model berdasarkan kondisi lokasi (Raji et al., 2025; Santoso et al., 2026). Namun, hasil tersebut belum secara langsung menjelaskan bagaimana perbedaan kinerja berkembang pada PLTS yang berada di lingkungan industri pembangkit batubara dengan potensi paparan debu dan abu yang tinggi. Keterbatasan tersebut menunjukkan perlunya studi kasus yang mengintegrasikan data operasional, simulasi, log pembersihan, dan informasi lingkungan untuk menghasilkan gambaran yang lebih kontekstual.

Studi pada Gedung CWP PLTU Suralaya memberikan konteks empiris yang relevan untuk tujuan tersebut. Instalasi berada pada lingkungan pembangkit yang berdekatan dengan aktivitas penanganan dan penyimpanan batubara serta fasilitas terkait pembakaran. Sistem dirancang dengan pendekatan *free maintenance*, sehingga tidak tersedia fasilitas pembersihan permanen. Dalam praktik operasional, pembersihan modul tetap dilakukan secara manual menggunakan bantuan scaffolding. Berdasarkan catatan operasi, terdapat empat kejadian pembersihan, yaitu Februari dan Juli 2024 serta Maret dan September 2025. Keterbatasan fasilitas, akses, waktu, dan biaya menyebabkan interval pembersihan tidak sepenuhnya terjadwal secara seragam. Kondisi ini memberikan kesempatan untuk mengamati perubahan PR pada beberapa periode sebelum dan sesudah pembersihan. Data operasional menunjukkan bahwa PR rata-rata aktual berada pada sekitar 70,88% pada 2024 dan 72,61% pada 2025, dibandingkan dengan PR desain sebesar 74,23%. Fluktuasi PR bulanan juga relatif besar, dengan nilai terendah sekitar 51,73% pada Desember 2024 dan nilai tinggi sekitar 94,18% pada September 2025. Perbedaan tersebut menarik untuk dianalisis, tetapi tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai *soiling loss*. Nilai PR yang lebih tinggi setelah pembersihan menunjukkan adanya perubahan kinerja yang konsisten dengan kemungkinan berkurangnya pengotor, tetapi faktor lain yang berubah pada periode yang sama tetap perlu dipertimbangkan. Bahkan, PR pascapembersihan yang mencapai sekitar 94% tidak tepat dibandingkan dengan angka 100% sebagai standar implisit, karena PR aktual

dipengaruhi oleh kondisi operasi dan desain sistem. Demikian pula, PR desain 74,23% tidak dapat diperlakukan sebagai batas maksimum absolut yang harus dicapai setelah pembersihan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini memosisikan *soiling* sebagai salah satu penjelasan yang mungkin berkontribusi terhadap deviasi kinerja, bukan sebagai satu-satunya penyebab. Fokus penelitian diarahkan pada tiga pertanyaan yang dibedakan secara eksplisit. Pertama, secara deskriptif, bagaimana perbedaan antara PR aktual dan PR hasil simulasi PVsyst selama periode pengamatan? Kedua, secara eksploratori, apakah terdapat perubahan kinerja yang konsisten setelah kejadian pembersihan dan sejauh mana perubahan tersebut dapat dikaitkan dengan kondisi *soiling* berdasarkan bukti tidak langsung? Ketiga, secara ekonomi, bagaimana implikasi estimasi deviasi produksi energi terhadap potensi kehilangan nilai ekonomi apabila deviasi tersebut digunakan sebagai dasar evaluasi awal? Pemisahan ketiga pertanyaan tersebut diperlukan agar hasil teknis tidak secara otomatis berubah menjadi klaim kausal maupun klaim kerugian ekonomi yang terlalu kuat. Dengan kerangka tersebut, kontribusi penelitian ini tidak ditempatkan sebagai validasi definitif bahwa *cemented soiling* merupakan penyebab utama penurunan kinerja PLTS. Penelitian ini lebih tepat diposisikan sebagai studi kasus eksploratori yang memberikan bukti lapangan mengenai pola deviasi PR, perubahan kinerja setelah pembersihan, dan kemungkinan adanya *residual soiling* pada PLTS yang beroperasi di lingkungan industri pembangkit batubara. Kontribusi pertama adalah membandingkan PR aktual dengan hasil simulasi PVsyst untuk mengevaluasi kesesuaian kinerja operasional terhadap asumsi desain, termasuk asumsi *soiling loss* sebesar 7%. Kontribusi kedua adalah mengintegrasikan data operasional, empat kejadian pembersihan, informasi meteorologis yang tersedia, dan bukti visual untuk memperkuat interpretasi terhadap pola perubahan kinerja. Kontribusi ketiga adalah mengidentifikasi indikasi *residual soiling* yang dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan dengan perangkat pengukuran *soiling ratio* secara langsung.

Penelitian ini menggunakan data operasi selama 22 bulan valid dalam periode Januari 2024–Desember 2025, bukan dua tahun penuh, karena tidak seluruh periode memiliki kelengkapan data yang memenuhi kriteria analisis. Periode tersebut mencakup empat kejadian pembersihan modul. Analisis perbedaan kinerja sebelum dan sesudah pembersihan digunakan sebagai pendekatan eksploratori. Karena jumlah kejadian pembersihan hanya empat, hasil uji statistik tidak diposisikan sebagai bukti inferensial yang kuat, melainkan sebagai indikasi awal yang perlu dikonfirmasi dengan jumlah observasi yang lebih besar. Interpretasi hasil juga mempertimbangkan interval kepercayaan dan keterbatasan ukuran sampel. Dengan demikian, penelitian ini diarahkan untuk menghasilkan estimasi awal mengenai kehilangan kinerja yang berkaitan dengan kondisi *soiling* pada PLTS atap Gedung CWP PLTU Suralaya. Istilah *soiling loss* dalam penelitian ini tidak digunakan untuk menyatakan pengukuran langsung kehilangan akibat deposisi, melainkan sebagai estimasi tidak langsung yang masih dapat terkonfounded oleh temperatur modul, *mismatch*, *availability*, *clipping*, *curtailment*, degradasi, bias sensor, dan ketidakpastian model.

Pendekatan ini diharapkan memberikan dasar empiris bagi evaluasi strategi pemeliharaan PLTS di lingkungan industri sekaligus menunjukkan kebutuhan pengembangan sistem monitoring *soiling* yang lebih terukur pada penelitian berikutnya.

Berdasarkan kerangka konseptual tersebut, pertanyaan dan hipotesis penelitian dirumuskan secara lebih spesifik. H1 menguji pertanyaan deskriptif-komparatif, yaitu apakah PR aktual secara statistik berbeda dan cenderung lebih rendah dibandingkan PR referensi dari simulasi PVsyst. Klaim mengenai dominasi *soiling* tidak dimasukkan ke dalam H1 karena tidak dapat diuji hanya dengan perbandingan tersebut. H2 diarahkan pada pertanyaan estimatif, yaitu apakah deviasi kinerja pada periode akumulasi pengotor menunjukkan nilai yang lebih besar daripada asumsi *soiling loss* desain sebesar 7%, dengan interpretasi sebagai *upper-bound estimate* yang masih mengandung faktor perancu. H3 hanya dapat diuji sebagai hubungan antara curah hujan dan PR apabila tersedia data curah hujan temporal yang memadai; apabila data tersebut tidak mencukupi, hubungan hujan-PR diperlakukan sebagai analisis deskriptif dan tidak dirumuskan sebagai hipotesis korelasional. H4 diarahkan pada indikasi *residual soiling*, bukan pembuktian *cemented soiling*, yang ditunjukkan oleh adanya pemulihan kinerja yang tidak sepenuhnya konsisten setelah pembersihan dibandingkan kondisi referensi yang ditetapkan secara metodologis, bukan terhadap standar implisit 100%. Kerangka tersebut menempatkan penelitian pada posisi yang lebih hati-hati secara metodologis. Perbandingan PR aktual dan PVsyst digunakan untuk mengevaluasi deviasi kinerja; kejadian pembersihan digunakan sebagai sumber variasi alami untuk mengevaluasi respons kinerja; sedangkan informasi lingkungan digunakan sebagai konteks interpretasi. Dengan cara tersebut, penelitian dapat memberikan bukti empiris yang relevan mengenai pengelolaan PLTS di lingkungan industri tanpa mengabaikan ketidakpastian yang melekat pada estimasi *soiling* berbasis data operasional.

Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan studi kuantitatif berbasis studi kasus (case study) yang bersifat *ex post facto*, dilakukan pada PLTS atap on-grid 478,44 kWp di Gedung Cooling Water Pump (CWP), PLTU Suralaya, PT PLN Indonesia Power Suralaya PGU, Kota Cilegon, Provinsi Banten (-5,89094 LS; 106,02877 BT), dengan operator PLTS PT Indo Tenaga Hijau, menggunakan data operasional periode Januari 2024–Desember 2025. Hipotesis penelitian menyatakan bahwa PR aktual secara signifikan lebih rendah daripada PR simulasi PVsyst dan deviasinya didominasi oleh kontribusi *soiling effect*. Variabel penelitian terdiri atas PR aktual dan PR simulasi PVsyst sebagai variabel utama, serta faktor non-*soiling* (gangguan/ketidaktersediaan inverter), curah hujan musiman, dan metode pembersihan sebagai variabel kontrol dan penjelas. Lokasi dipilih karena karakteristik lingkungan *soiling* yang agresif: berdekatan dengan coal stockpile, jalur conveyor, silo fly ash, serta pesisir Selat Sunda yang terpapar aerosol garam laut. Tahapan penelitian dilakukan melalui delapan langkah berurutan: (1) pengumpulan data energi produksi, iradiasi POA, PR aktual bulanan, laporan simulasi PVsyst, kurva daya inverter, heatmap specific power,

laporan kegiatan pembersihan, dan data curah hujan BMKG untuk periode 2024–2025; (2) perhitungan PR aktual bulanan mengacu pada standar IEC 61724-1 (International Electrotechnical Commission, 2021); (3) curve-based screening untuk memisahkan faktor non-soiling (gangguan/ketidaktersediaan inverter) dari deviasi PR menggunakan kurva daya inverter terhadap POA dan heatmap specific power; (4) eksklusi dua bulan anomali (Januari 2024 periode commissioning dan Desember 2025 anomali meter energi) sehingga basis analisis menggunakan 22 bulan data valid; (5) perhitungan soiling loss dan soiling rate dari selisih PR bersih terhadap PR kotor pada tiap siklus antar-pembersihan; (6) pengujian statistik berupa uji-t satu sampel dan paired t-test dengan effect size Cohen's d; (7) triangulasi bukti melalui pencocokan pola musiman curah hujan BMKG dan validasi visual-teknis (heatmap dan dokumentasi foto); serta (8) estimasi kerugian energi-finansial dan analisis interval pembersihan optimal.

Perhitungan Performance Ratio (PR) Aktual

PR dihitung mengacu pada standar IEC 61724-1, yaitu perbandingan antara final yield dan reference yield:

$$Y_f = E_{AC} / P_{STC} \quad (1)$$

$$Y_r = H_{POA} / G_{STC} \quad (2)$$

$$PR = Y_f / Y_r = E_{AC} / (P_{STC} \times (H_{POA} / G_{STC})) \quad (3)$$

dengan E_{AC} adalah energi AC yang dihasilkan (kWh), P_{STC} adalah kapasitas terpasang pada standard test condition (478,44 kWp), H_{POA} adalah iradiasi pada bidang panel (kWh/m²), dan G_{STC} adalah irradians referensi (1 kW/m²). Deviasi PR dihitung sebagai $\Delta PR = PR_{PVsyst} - PR_{aktual}$, setelah bulan yang teridentifikasi mengalami gangguan non-soiling (berdasarkan curve-based screening pada kurva daya inverter dan heatmap specific power) dikeluarkan dari basis perhitungan.

Soiling Loss, Soiling Rate, dan Estimasi Kerugian

Soiling loss (SL) diestimasi dengan membandingkan PR kondisi bersih terhadap PR kondisi kotor pada akhir siklus, sedangkan soiling rate (SR) adalah laju penurunan PR per bulan:

$$SL = ((PR_{bersih} - PR_{kotor}) / PR_{bersih}) \times 100\% \quad (4)$$

$$SR = (PR_{bersih} - PR_{akhir}) / n \quad (5)$$

dengan n adalah jumlah bulan dalam satu siklus antar-pembersihan. Kehilangan energi (E_{loss}) dan kerugian finansial dihitung dengan:

$$E_{loss} = Y_r \times P_{STC} \times \Delta PR \quad (6)$$

$$Kerugian\ finansial = E_{loss} \times \text{tarif listrik} \quad (7)$$

menggunakan tarif Rp1.467,28/kWh. Kerugian energi kumulatif per siklus bersifat kuadratik terhadap panjang interval karena penurunan PR terjadi linear dari kondisi bersih hingga puncak penurunan di akhir siklus:

$$Rugi\ Energi/Siklus \approx 0,5 \times SR \times K \times n^2 \quad (8)$$

dengan K adalah nilai kerugian energi per poin PR per bulan. Persamaan ini digunakan bersama biaya pembersihan aktual (Rp34,5 juta/kegiatan berdasarkan RAB) untuk menentukan interval pembersihan optimal.

Pengujian Hipotesis dan Triangulasi Bukti

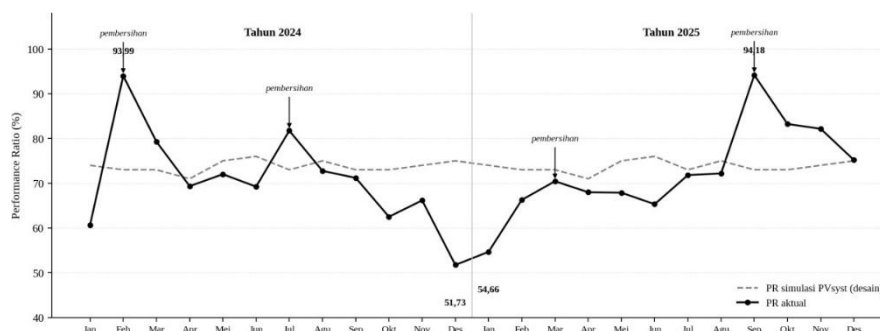
Pengujian statistik menggunakan uji-t satu sampel (PR rata-rata tahunan terhadap PR desain 74,23%) dan paired t-test (PR sebelum vs sesudah pembersihan) dilengkapi effect size Cohen's d. Untuk memperkuat atribusi soiling, dilakukan triangulasi tiga lapis: (1) uji statistik kuantitatif pada data kinerja; (2) pencocokan pola temporal PR terhadap outlook musiman curah hujan BMKG; dan (3) validasi visual-teknis melalui heatmap specific power dan dokumentasi foto kondisi modul sebelum-sesudah pembersihan.

Hasil dan Pembahasan

Selama periode 2024–2025, PR aktual PLTS Gedung CWP secara konsisten berada di bawah PR desain simulasi PVsyst sebesar 74,23%, dengan rata-rata tahunan 70,88% pada 2024 dan 72,61% pada 2025 (Tabel 1). PR bulanan berfluktuasi lebar, dari titik terendah 51,73% (Desember 2024) hingga titik tertinggi 94,18% (September 2025) yang bertepatan dengan bulan pelaksanaan pembersihan modul, membentuk pola gigi-gergaji (sawtooth) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 1. Ringkasan Perbandingan Kinerja Aktual terhadap Desain PVsyst

Parameter Kinerja	Tahun 2024	Tahun 2025
PR desain simulasi PVsyst (baseline)	74,23%	74,23%
PR aktual rata-rata tahunan	±70,9%	±72,6%
PR bulanan tertinggi (bulan pembersihan)	93,99% (Feb)	94,18% (Sep)
PR bulanan terendah	51,73% (Des)	54,66% (Jan)
Rentang fluktuasi PR bulanan	42,26 poin	39,52 poin



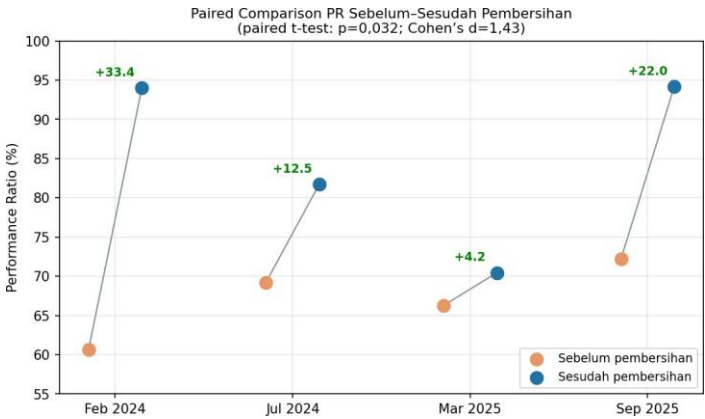
Gambar 1. Profil PR Bulanan Aktual terhadap PR Simulasi PVsyst Periode 2024–2025

Uji-t satu sampel terhadap rata-rata PR bulanan dibandingkan PR desain 74,23% tidak signifikan ($t = -1,179$; $p = 0,25$). Hasil ini bukan menunjukkan ketiadaan pengaruh soiling,

melainkan keterbatasan metrik rata-rata tahunan: pola gigi-gergaji menyebabkan bulan tinggi dan rendah saling menetralkan sehingga simpangan baku besar ($SD = 10,33$) dan efek soiling tersamarkan. Uji yang lebih tepat, yaitu paired t-test PR sebelum vs sesudah pembersihan, menunjukkan kenaikan rata-rata 18,01 poin yang signifikan ($t = 2,867$; $p = 0,032$ satu arah) dengan ukuran efek besar (Cohen's $d = 1,43$), sebagaimana dirangkum pada Tabel 2 dan Gambar 2. Dengan perumusan uji yang tepat, H_1 diterima: kinerja PLTS mengalami penurunan periodik akibat akumulasi soiling yang dipulihkan secara signifikan oleh pembersihan.

Tabel 2. Hasil Pengujian Statistik Pengaruh Pembersihan terhadap PR

Uji Statistik	Hasil	Kesimpulan
Uji-t satu sampel (PR vs 74,23%)	$t = -1,179$; $p = 0,25$ ($n=24$)	Tidak signifikan
Paired t-test (sesudah vs sebelum)	$t = 2,867$; $p = 0,032$; $d = 1,43$ ($n=4$)	Signifikan, efek besar



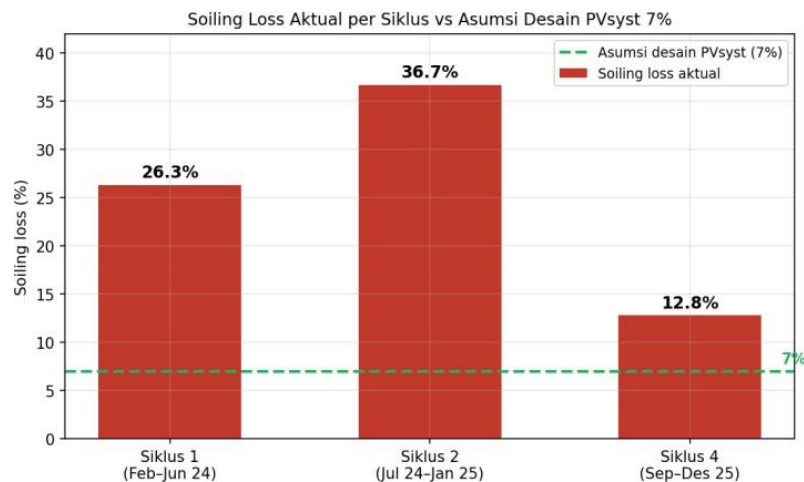
Gambar 2. Perbandingan Berpasangan PR Sebelum–Sesudah Pembersihan

Soiling loss aktual, dihitung dari selisih PR bersih terhadap PR terkotor dalam setiap siklus, berkisar 12,8%–36,7% dengan rata-rata maksimum sekitar 25,3% (Tabel 3) — sekitar 3,6 kali lipat asumsi desain PVsyst sebesar 7% (Gambar 3). Temuan ini konsisten dengan bukti eksperimental bahwa debu batubara merupakan pengotor dengan atenuasi cahaya paling parah (Riaz & Mahmood, 2022) dan bahwa lingkungan pembangkit batubara memfasilitasi kerusakan kinerja optik yang lebih berat (Fernández-Solas et al., 2022). H_2 diterima: soiling loss aktual jauh melampaui asumsi 7%, sehingga nilai tersebut tidak realistis untuk PLTS di kompleks PLTU batubara pesisir.

Tabel 3. Soiling Loss Aktual per Siklus Pembersihan

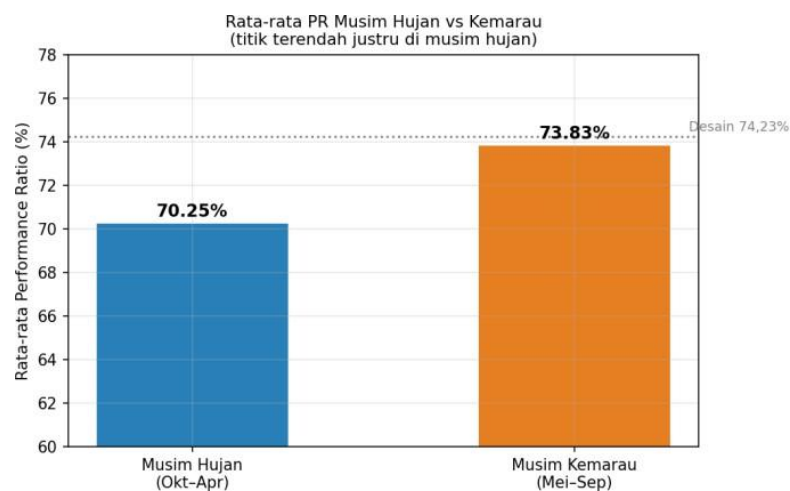
Siklus	PR Bersih (%)	PR Kotor (%)	Soiling Loss (%)
Siklus 1 (Feb–Jun 2024)	93,99	69,23	26,3
Siklus 2 (Jul 2024–Jan 2025)	81,74	51,73	36,7

Siklus	PR Bersih (%)	PR Kotor (%)	Soiling Loss (%)
Siklus 4 (Sep–Des 2025)	94,18	82,16	12,8
Rata-rata / rentang	—	—	25,3 (12,8–36,7)



Gambar 3. Perbandingan Soiling Loss Aktual terhadap Asumsi Desain 7%

PR rata-rata musim kemarau (Mei–September) tercatat 73,83%, lebih tinggi daripada musim hujan Oktober–April (70,25%). Keempat titik PR terendah dalam periode pengamatan seluruhnya jatuh pada musim hujan (Gambar 4). Temuan ini konsisten dengan Zhao et al. (2021) yang menjelaskan bahwa kelembapan dan embun memicu transformasi fisiko-kimiawi pengotor menjadi kerak yang melekat kuat melalui sementasi, serta Fernández-Solas et al. (2022) yang mendokumentasikan bahwa sementasi tersebut memburuk pada kelembapan tinggi. H3 diterima sebagian dengan perumusan yang disesuaikan: pembersihan memulihkan PR secara nyata, namun asumsi hujan membersihkan modul secara alami terbantah.

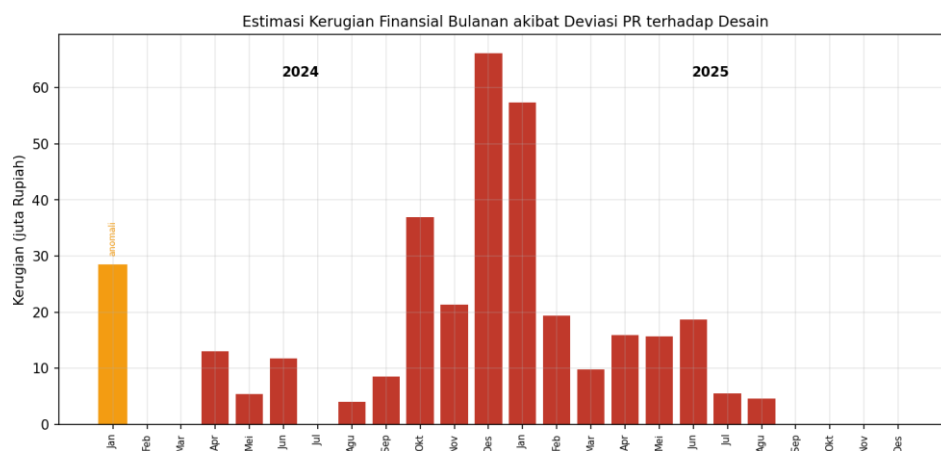


Gambar 4. Rata-rata PR Musim Hujan vs Musim Kemarau

Perbandingan efektivitas metode pembersihan memperkuat indikasi residual soiling: pembersihan basah memulihkan PR ke rata-rata 89,97%, sedangkan pembersihan kering (blower) hanya 70,44% — selisih 19,53 poin yang tidak terangkat oleh metode kering menandakan adanya pengotor tersementasi yang tidak larut tanpa air. PR pasca-pembersihan basah terbaik (94,18%) tetap berada di bawah 100%, mengindikasikan sebagian pengotor menetap secara permanen. H4 diterima: terdapat indikasi residual soiling loss akibat kerak tersementasi, ditunjukkan oleh PR pasca-pembersihan yang tidak kembali penuh serta perbedaan tajam efektivitas antarmetode pembersihan. Kehilangan energi akibat deviasi PR terhadap desain diestimasi dengan menormalisasi energi aktual terhadap PR desain 74,23%, dikonversi ke nilai finansial dengan tarif Rp1.467,28/kWh, menggunakan basis 22 bulan data valid (Tabel 4). Selama periode tersebut, deviasi PR diperkirakan menyebabkan kehilangan energi sekitar 214,2 MWh, setara kerugian finansial Rp314,2 juta dan tambahan emisi 177,8 tCO₂e (faktor emisi JAMALI 0,83 tCO₂e/MWh, Gambar 5). Berdasarkan soiling rate rata-rata siklus normal sebesar 4,17 poin PR per bulan, setiap penurunan 1 poin PR setara kehilangan energi sekitar 1.662 kWh atau Rp2,44 juta per bulan. Dengan biaya pembersihan basah aktual Rp34,5 juta per kegiatan dan mengingat kerugian energi tumbuh kuadratik terhadap panjang interval (Persamaan 8), analisis total beban bulanan menunjukkan bahwa interval pembersihan basah yang lebih pendek optimal sekitar 2–3 bulan menghasilkan beban total lebih rendah dibandingkan praktik interval semesteran yang berlaku saat ini.

Tabel 4. Estimasi Kerugian Energi dan Finansial Akibat Soiling (22 Bulan Valid)

Periode	Energi Hilang (kWh)	Kerugian (Rp)	Setara Emisi (tCO ₂ e)
2024 (tanpa Jan)	74.909	109.874.000	62,2
2025 (tanpa Des)	139.259	204.370.000	115,6
Total 22 bulan valid	214.168	314.244.000	177,8



Gambar 5. Estimasi Kerugian Finansial Bulanan Akibat Deviasi PR

Temuan ini menunjukkan bahwa PLTS atap di kawasan PLTU batubara memerlukan standar operasi dan pemeliharaan (O&M) yang berbeda dari asumsi desain generik free maintenance, mengingat soiling loss aktual yang jauh melampaui asumsi 7% dan efektivitas pembersihan yang sangat bergantung pada metode. Setiap unit energi PLTS yang hilang akibat soiling yang tidak tertangani harus digantikan pembangkitan berbasis fosil dari jaringan, sehingga menggerus kontribusi bersih PLTS terhadap target bauran EBT dan komitmen Net Zero Emission 2060. Rekomendasi operasional mencakup: (1) penerapan pembersihan basah terjadwal dengan interval 2–3 bulan menggantikan interval semesteran saat ini; (2) prioritas metode pembersihan basah dibandingkan metode kering mengingat efektivitasnya yang jauh lebih tinggi terhadap kerak tersementasi; dan (3) penyediaan fasilitas pembersihan permanen (akses tangga, saluran, dan pompa air tetap) untuk menurunkan biaya marginal pembersihan per siklus.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan adanya deviasi antara kinerja aktual PLTS atap Gedung *Cooling Water Pump* (CWP) PLTU Suralaya dan kinerja yang diproyeksikan melalui PVsyst. PR aktual rata-rata sebesar 70,88% pada 2024 dan 72,61% pada 2025, dibandingkan dengan PR desain sebesar 74,23%. Perubahan PR sebelum dan sesudah empat kejadian pembersihan menunjukkan pola pemulihan yang konsisten dengan adanya kehilangan kinerja yang berkaitan dengan kondisi *soiling*. Estimasi kehilangan kinerja sebesar 12,8%–36,7% perlu dipahami sebagai *upper-bound estimate* yang masih dipengaruhi oleh temperatur, *availability*, *mismatch*, degradasi, *clipping*, *curtailment*, bias sensor, dan ketidakpastian model PVsyst, sehingga belum dapat dianggap sebagai pengukuran *soiling loss* secara langsung. Pembersihan basah menunjukkan respons pemulihan PR yang lebih besar dibandingkan pembersihan kering, sehingga memberikan indikasi bahwa sebagian pengotor relatif persisten dan tidak seluruhnya dapat dihilangkan melalui pembersihan sederhana. Namun, temuan tersebut belum cukup untuk menyimpulkan keberadaan *cemented soiling* secara definitif karena penelitian tidak dilengkapi analisis komposisi permukaan/debu maupun *clean-soiled reference device*. Demikian pula, pola PR dan informasi curah hujan belum dapat digunakan untuk menyatakan bahwa hujan tidak mampu membersihkan modul secara kausal karena data hujan yang tersedia belum memiliki resolusi temporal yang memadai. Secara ekonomi, estimasi deviasi produksi yang berkaitan dengan kondisi *soiling* menunjukkan potensi kehilangan energi dan nilai ekonomi yang perlu diperhatikan dalam pengelolaan O&M. Namun, nilai 214,2 MWh dan Rp314,2 juta tidak diperlakukan sebagai kerugian yang seluruhnya disebabkan oleh *soiling*. Skenario pembersihan basah setiap 2–3 bulan dapat digunakan sebagai alternatif awal untuk evaluasi O&M, tetapi belum dapat disebut sebagai interval optimum definitif karena masih bergantung pada *soiling rate*, biaya pembersihan, tarif energi, dan tingkat pemulihan aktual.

Secara teoretis, penelitian ini menunjukkan bahwa baseline PVsyst perlu diinterpretasikan secara hati-hati ketika digunakan untuk mengevaluasi PLTS pada

lingkungan industri tropis, karena deviasi aktual tidak hanya merepresentasikan *soiling* tetapi juga berbagai faktor lingkungan, operasional, dan ketidakpastian model. Secara praktis, pengelola PLTS dapat memulai *pilot cleaning schedule*, meningkatkan pencatatan kejadian pembersihan dan curah hujan harian, memasang *soiling monitoring station* atau perangkat referensi bersih–kotor, serta mengevaluasi biaya dan manfaat pembersihan berdasarkan data aktual. Penelitian memiliki keterbatasan berupa jumlah kejadian pembersihan yang sangat kecil ($n = 4$), resolusi data bulanan untuk sebagian analisis, adanya periode data yang dikeluarkan termasuk satu siklus yang tidak lengkap, potensi *confounding* antara *soiling* dan faktor operasional maupun meteorologis, ketidakpastian sensor dan model PVsyst, serta keterbatasan generalisasi karena hanya menggunakan satu sistem PLTS. Penelitian selanjutnya perlu menggunakan data harian atau sub-harian, *clean-soiled reference device*, pengukuran *soiling ratio* secara langsung, data curah hujan aktual, analisis komposisi debu, dan jumlah kejadian pembersihan yang lebih besar agar atribusi *soiling* dan estimasi kehilangan kinerja dapat dilakukan dengan ketidakpastian yang lebih rendah.

Referensi

- Benyadry, S., Halimi, M., & Khouya, A. (2024). Soiling impact and cleaning techniques for optimizing photovoltaic and concentrated solar power production: A state-of-the-art review. *Energy and Environment*, 35(3), 1041–1065. <https://doi.org/10.1177/0958305X241230624>
- Fernández-Solas, Á., Montes-Romero, J., Micheli, L., Almonacid, F., & Fernández, E. F. (2022). Estimation of soiling losses in photovoltaic modules of different technologies through analytical methods. *Energy*, 244, 123173. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123173>
- Fourth Partner Energy Pvt. Ltd. (2022). *PVsyst simulation report: Grid-connected system, Project ITH Suralaya, Variant GEDUNG_CWP_REV03, system power 478 kWp (PVsyst V7.2.13)* [Internal project document].
- IEA-PVPS Task 13. (2022). *Soiling losses: Impact on the performance of photovoltaic power plants* (Report No. T13-21:2022). International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/01/IEA-PVPS-T13-21-2022-REPORT-Soiling-Losses-PV-Plants.pdf>
- Ilse, K., Micheli, L., Figgis, B. W., Lange, K., Daßler, D., Hanifi, H., Wolfertstetter, F., Naumann, V., Hagendorf, C., Gottschalg, R., & Bagdahn, J. (2019). Techno-economic assessment of soiling losses and mitigation strategies for solar power generation. *Joule*, 3(10), 2303–2321. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.019>
- International Electrotechnical Commission. (2021). *Photovoltaic system performance—Part 1: Monitoring (IEC 61724-1:2021)* (2nd ed.). IEC. <https://webstore.iec.ch/publication/65561>
- Javed, W., Wubulikasimu, Y., Figgis, B., & Guo, B. (2017). Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha, Qatar. *Solar Energy*, 142, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.053>
- Kazem, H. A., & Chaichan, M. T. (2016). Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman. *Solar Energy*, 139, 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.019>

- Micheli, L., Fernández, E. F., Müller, M., & Almonacid, F. (2020). Extracting and generating PV soiling profiles for analysis, forecasting, and cleaning optimization. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(1), 197–205. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2943706>
- Mosbah, C. A., Kermadi, M., Gama, A., & Yettou, F. (2025). Smart and cost-effective optimisation of photovoltaic cleaning schedules. *Energy and Buildings*, 346, 116184. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116184>
- Raji, L., Amir, A. R., & Ahmad Fadzil, S. (2025). Comparative assessment of PV simulation tools for a megawatt-scale rooftop solar photovoltaic system in tropical climate. *Next Energy*, 9, 100452. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100452>
- Riaz, M. H., & Mahmood, T. (2022). Experimental analysis of soiling loss on PV module in cement plant environment. *Engineering Proceedings*, 20(1), 13. <https://doi.org/10.3390/engproc2022020013>
- Rosyid, O. A., Sibagariang, Y. P., Sudrajat, A., Hasan, M., Lande, N. M., Priyadi, A., Faradilla, A., Hartadhi, Sunarna, S., & Ambarita, H. (2025). Effects of cleaning interval of PV module and pyranometer on PV system performances in tropical climate of Indonesia. *Results in Engineering*, 25, 103959. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103959>
- Said, S. A. M., Hassan, G., Walwil, H. M., & Al-Aqeeli, N. (2018). The effect of environmental factors on photovoltaic panel performance in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 144–152.
- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., & Kazmerski, L. L. (2013). A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History of mitigation approaches and recent advances. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 698–733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.065>
- Sulaiman, S. A., Singh, A. K., Mokhtar, M. M. M., & Bou-Rabee, M. A. (2014). Influence of dirt accumulation on performance of PV panels. *Energy Procedia*, 50, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.006>
- Toth, S., et al. (2021). Soiling losses and mitigation strategies for photovoltaic power plants. *Solar Energy*, 226, 110–123.
- Zhao, W., Lv, Y., Wei, Z., Yan, W., & Zhou, Q. (2021). Review on dust deposition and cleaning methods for solar PV modules. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13, 032701. <https://doi.org/10.1063/5.0053866>
- Hosseini Dehshiri, S. S., & Firoozabadi, B. (2025). Photovoltaic plant site selection considering dust soiling effects: A novel hybrid framework based on uncertainty and reliability with optimum cleaning schedule. *Applied Energy*, 382, 125252. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125252>
- Soiling estimation methods in solar photovoltaic systems: Review, challenges and future directions.* (2025). *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104810>.