

## Analisis Pengaruh *Soiling Loss* Terhadap *Performance Ratio* (PR) Setiap String Pada Array Box 114 Di PLTS 7 MWp

Amirul Mu'minin<sup>1</sup>, Sultan<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram Jl. Majapahit 62 Mataram, INDONESIA 83125

### ARTICLE INFO

#### Article history :

Received September 20, 2025

Revised November 25, 2025

Accepted November 28, 2025

#### Keywords :

Energy Efficiency;

Solar Power Plant;

Performance Ratio;

Soiling Loss;

### ABSTRACT

The demand for electricity in Indonesia is rising, but dependence on fossil fuels creates significant environmental impacts. Solar energy is a strategic solution due to high solar irradiation, but its performance is affected by soiling loss—dust accumulation on photovoltaic (PV) modules. This study provides a quantitative analysis of the influence of soiling loss on the performance ratio (PR) at a 7 MWp PLTS. Using a descriptive quantitative method, field data from April 2025 was used to mathematically calculate PR and soiling loss (SL) for individual strings. The results showed soiling loss ranged from 2.37% to 28.68%, with corresponding PR values varying between 87.20% and 61.97%. Graphical analysis confirmed a strong negative correlation: higher soiling loss directly corresponds to lower PR values. For example, the highest soiling (28.68%) yielded the lowest PR (61.97%), while the lowest soiling (2.37%) achieved the highest PR (87.20%). This finding confirms soiling is a critical factor in PLTS efficiency. Therefore, routine, data-driven module cleaning and anti-soiling technologies are essential strategies to maintain optimal performance.

### Corresponding Author:

Amirul Mu'minin, Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jln. Majapahit No.62, Mataram 83115.

Email: [amirulmuminin200803@gmail.com](mailto:amirulmuminin200803@gmail.com)

## 1. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi dan pertumbuhan penduduk Indonesia yang terus meningkat mendorong kenaikan kebutuhan energi nasional. Berbagai sektor seperti industri, rumah tangga, transportasi, dan aktivitas ekonomi lainnya sangat bergantung pada pasokan energi dalam jumlah besar untuk menjaga kelancaran aktivitas. Hingga kini, sebagian besar kebutuhan energi tersebut masih dipenuhi oleh sumber energi fosil, seperti minyak bumi, gas alam, dan batu bara. Ketergantungan pada energi fosil menimbulkan permasalahan serius karena ketersediaannya terbatas, sementara pemanfaatannya berdampak negatif terhadap lingkungan. Aktivitas pertambangan serta pembakaran energi fosil meningkatkan emisi karbon dioksida, mempercepat penipisan lapisan ozon, serta memperburuk efek rumah kaca yang memicu pemanasan global [1].

Dalam konteks ini, energi terbarukan menjadi salah satu solusi strategis untuk mendukung kebutuhan energi sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil. Data menunjukkan konsumsi listrik nasional mencapai sekitar 1.173 kWh per kapita pada tahun 2022 dan diproyeksikan terus meningkat seiring pertumbuhan ekonomi sebesar 5,3% per tahun hingga mencapai 1.408 kWh per kapita pada 2024 [2]. Kondisi ini menegaskan bahwa kebutuhan energi listrik akan semakin sulit dipenuhi jika hanya mengandalkan sumber energi fosil. Oleh karena itu, pengembangan Energi Baru dan Terbarukan (EBT), khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), memiliki peran penting dalam menjamin keberlanjutan pasokan energi [3].

Indonesia memiliki potensi besar dalam pemanfaatan energi surya karena letaknya di wilayah tropis dengan rata-rata radiasi matahari harian sekitar 4,8 kWh/m<sup>2</sup> [6]. Potensi ini mendukung pengembangan PLTS yang ramah lingkungan dan berkelanjutan [9]. Namun, operasional PLTS tidak lepas dari tantangan teknis yang dapat memengaruhi kinerja sistem. Salah satunya adalah soiling loss, yaitu kehilangan energi akibat akumulasi debu, tanah, atau partikel lain di permukaan modul fotovoltaik [4]. Fenomena ini mengurangi intensitas cahaya yang diterima panel dan menurunkan efisiensi konversi energi. Dampaknya dapat dilihat pada penurunan *performance ratio* (PR), yakni indikator yang membandingkan energi listrik yang dihasilkan sistem nyata dengan energi teoritis yang seharusnya diperoleh [5] [7].

Sejumlah studi menunjukkan bahwa *soiling* dapat menyebabkan penurunan output energi PLTS sebesar 5–17%, tergantung kondisi lingkungan, cuaca, dan frekuensi pemeliharaan [8]. Di Indonesia, studi kasus

pada area penambangan di Sumatera Selatan menemukan bahwa akumulasi debu dan kotoran panel dapat menurunkan daya keluaran hingga lebih dari 8% dan efisiensi sekitar 11,8% apabila tidak dilakukan pembersihan rutin[10]. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis pengaruh *soiling loss* terhadap *performance ratio* pada PLTS Selong 7 MWp. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar strategi perawatan dan optimalisasi efisiensi PLTS, sehingga mendukung pemanfaatan energi surya sebagai solusi ketahanan energi nasional di masa depan.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Metode Pendekatan

Penelitian ini menggunakan metode pendekatan deskriptif kuantitatif dengan tujuan menganalisis pengaruh *soiling loss* terhadap nilai *performance ratio* (PR) pada sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan Gambaran numerik mengenai besaran kerugian energi yang di timbulkan akibat kotoran pada modul fotovoltaik, sekaligus menjelaskan hubungan matematis antara nilai *Soiling loss* (SL%) dan *performance ratio* (PR%).

### 2.2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada salah satu pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) skala menengah di Lombok yang beroperasi secara on-grid dengan kapasitas 7MWp. Dimana observasi dan pengumpulan data hanya dilakukan selama periode satu bulan yaitu dibulan April untuk mendapatkan kondisi actual sistem dalam periode kering yang relatif dan rawan akumulasi debu.

### 2.3. Alur Penelitian

Pada penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang sistematis sebagaimana ditunjukkan pada *flowchart* dibawah ini.



Gambar 1. *Flowchart* penelitian

### 2.4. Metode Perhitungan

Pada Penelitian ini, metode perhitungan yang digunakan merupakan salah satu dari beberapa jenis metode perhitungan *performance ratio* (PR). *Performance Ratio* secara spesifik adalah rasio keluaran energi aktual dan yang mungkin dapat dihitung secara teoritis. Semakin tinggi *performa ratio*, semakin efisien dan produktif sistem PLTS tersebut. Adapun rumus persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai *soiling losses* yaitu:

$$\text{Soiling Losses}(SL\%) = 100\% - (PR\% + \text{Solar Farm System Losses}) \quad (1)$$

Atau

$$SL\% = 100\% - (PR + \text{Temperature correction}\% + \text{PV yearly Degradation} + \text{DC Losses}\%)$$

Selain itu, Adapun rumus turunan untuk mencari setiap variabel performance ratio yang diperlukan dalam perhitungan yaitu:

$$\text{performance Ratio\%} = \frac{P_{DcString}}{(E_{MP}Insolation \times TC \text{ faktor} \times A_{arrayM^2} \times \eta \text{ plants \%})} \quad (2)$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil Pengukuran daya setiap string

Data ini diambil dengan mengukur beberapah parameter seperti  $P_{DcString}$ ,  $E_{MP}Insolation$ ,  $TC \text{ faktor}$ ,  $A_{arrayM^2}$ ,  $\eta \text{ plants \%}$ ,  $T_{mod}(\text{°C})$ ,  $Temp \text{ coeff}(r)$ ,  $STR \text{ Tref } \text{°C}$ , di setiap string pada array box 114, pengambilan sampelnya dilakukan pada bulan April 2025

**Tabel 1.** Hasil pengukuran

Array Box	Strings	Pdc String (kWp)	$E_{MP}Insolation$ , POA (kWh/m <sup>2</sup> )	Temp correct factor TC	$A_{array}$ m <sup>2</sup>	$\eta_{plant}$ %	Tmod (°C)	Temp coeff (r)	STR Tref °C
E01.D01.A04	E01.D01.A04-S01	74,71	7,06	1,00	78,49	0,165	35	0,00	25
	E01.D01.A04-S02	77,60	7,06	1,00	78,49	0,165	35	0,00	25
	E01.D01.A04-S03	56,02	5,16	1,00	78,49	0,165	33	0,00	25
	E01.D01.A04-S04	57,39	5,16	1,00	78,49	0,165	33	0,00	25
	E01.D01.A04-S05	75,88	7,06	1,00	78,49	0,165	35	0,00	25
	E01.D01.A04-S06	77,49	7,06	1,00	78,49	0,165	35	0,00	25
	E01.D01.A04-S07	56,26	5,16	1,00	78,49	0,165	33	0,00	25
	E01.D01.A04-S08	56,84	5,16	1,00	78,49	0,165	33	0,00	25
	E01.D01.A04-S09	58,48	5,16	1,00	78,49	0,165	35	0,00	25
	E01.D01.A04-S10	52,26	5,16	1,00	78,49	0,165	33	0,00	25
	E01.D01.A04-S11	62,52	7,06	1,00	78,49	0,165	35	0,00	25
	E01.D01.A04-S12	56,86	7,06	1,00	78,49	0,165	35	0,00	25
	E01.D01.A04-S13	51,84	5,16	1,00	78,49	0,165	33	0,00	25

#### 3.2 Perhitungan Nilai Soiling Losses (SL%) dan Performance Ratio (PR%)

perhitungan soiling losses dan performance ratio pada string di Array Box 114 seperti dibawah ini:

a. Perhitungan performance ratio :

$$\begin{aligned} \text{performance Ratio E01.D01.A04 - S01} &= \frac{P_{DcString01}}{(E_{MP}Insolation \times TC \text{ faktor} \times A_{arrayM^2} \times \eta \text{ plants \%})} \\ &= \frac{74,71}{(7,06 \times 1 \times 78,49 \times 0,165)} \\ &= 0,8141 \end{aligned}$$

Maka performance Ratio E01.D01.A04 – S01 = 81,41%

b. untuk Perhitungan soiling losses di E01.D01.A04-S01 :

$$SL\% = 100\% - (PR + Temperature \text{ correction}\% + PV \text{ yearly Degradation} + DC \text{ Losses}\%)$$

- Mencari Nilai Temperature correction%

$$Temperature \text{ correction}\% = Performance \text{ Ratio (PR)} - Performance \text{ Ratio with temperature Corrected (PRtc)}$$

Dimana :

$$\text{Performance Ratio with temperature Corrected (PRtc)} = \frac{P_{DCstring}}{((E_{MP} \text{Insolation} \times TC \text{ faktor} \times A_{array} \times \eta_{plants \%}) (1 + T_{coeff}(r)(T_{mod} - T_{ref})))}$$

$$= \frac{74,71}{((7,06 \times 1 \times 78,49 \times 0,1656)(1 + (-0,0041)(35 - 25))}$$

$$= 0,8489 \text{ atau } 84,89\%$$

Maka :

$$\begin{aligned} \text{Temperature correction\%} &= \text{Performance Ratio with temperature Corrected (PRtc)} - \text{Performance Ratio (PR)} \\ &= 84,89\% - 81,41\% \\ &= 3,48\% \end{aligned}$$

- Mencari nilai *PV yearly degradation%*  

$$\begin{aligned} \text{PV yearly degradation\%} &= 2,5\% + (0,5 \times \text{waktu beroperasi (tahun)}) \\ &= 2,5\% + (0,5 \times 6) \\ &= 5,5\% \end{aligned}$$

Maka ;

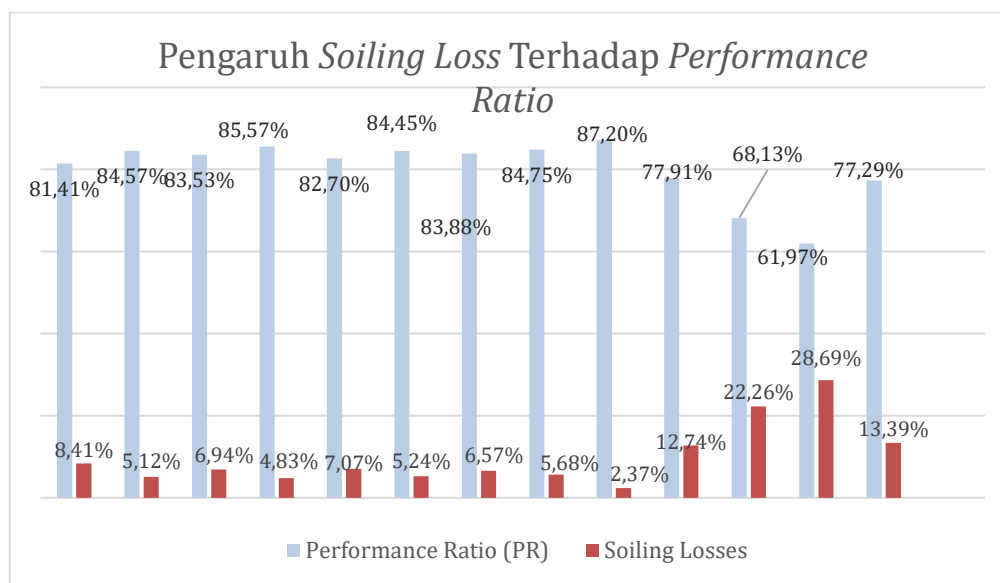
$$\begin{aligned} \text{Soiling loss\%} &= 100\% - (\text{PR \%} + \text{Temperature correction\%} + \text{PV yearly Degradation} + \text{DC Losses\%}) \\ &= 100\% - (81,41\% + 3,48\% + 5,5\% + 1,20\%) \\ &= 8,41\% \end{aligned}$$

Sehingga dapat diketahui bahwa pada string E01.D01.A04-S01 di array box 114 memiliki *performance ratio* 81,41% dengan *soiling loss* sebesar 8,41%. Adapun untuk hasil perhitungan *performance ratio* dan *soiling loss* disetiap string pada array box 114 adalah sebagai berikut :

**Tabel 2.** Hasil Perhitungan

Array Box	String	Performance Ratio (PR)	Performance Ratio with temperature Corrected (PR <sub>tc</sub> )	Temperature Loss (%)	DC loss Strings (%)	Degradation (%)	Soiling loss (%)
E01.D01.A04	S01	81,41%	84,89%	3,48%	1,20%	5,50%	8,41%
	S02	84,57%	88,18%	3,61%	1,20%	5,50%	5,12%
	S03	83,53%	86,53%	3,00%	1,20%	5,50%	6,77%
	S04	85,57%	88,47%	2,90%	1,20%	5,50%	4,83%
	S05	82,70%	86,23%	3,53%	1,20%	5,50%	7,07%
	S06	84,45%	88,06%	3,61%	1,20%	5,50%	5,24%
	S07	83,88%	86,73%	2,85%	1,20%	5,50%	6,57%
	S08	84,75%	87,62%	2,87%	1,20%	5,50%	5,68%
	S09	87,20%	90,93%	3,73%	1,20%	5,50%	2,37%
	S10	77,91%	80,56%	2,65%	1,20%	5,50%	12,74%
	S11	68,13%	71,04%	2,91%	1,20%	5,50%	22,26%
	S12	61,97%	64,62%	2,65%	1,20%	5,50%	28,68%
	S13	77,29%	79,91%	2,62%	1,20%	5,50%	13,39%

### 3.3 Analisis Grafik Pengaruh *Soiling Loss* Terhadap *Performance Ratio*



Gambar 2. Grafik Pengaruh *Soiling Loss* Terhadap *Performance Ratio*

Gambar 2. menunjukkan grafik pengaruh *soiling loss* terhadap *performance ratio* (PR). Berdasarkan grafik, dapat dilihat bahwa semakin besar nilai *soiling loss*, maka nilai *performance ratio* cenderung menurun. Hal ini terlihat pada data dengan *soiling loss* tertinggi sebesar 28,69%, di mana nilai PR hanya mencapai 61,97,%. Sebaliknya, ketika *soiling loss* sangat kecil (seperti 2,37%), dimana nilai PR yang didapat mencapai hingga 87,20%.

Meskipun terdapat nilai fluktuasi kecil, tren umum yang terlihat adalah hubungan negatif antara *soiling losses* dan *performance ratio*. Artinya, peningkatan kotoran pada permukaan modul fotovoltaik berdampak langsung terhadap penurunan kinerja sistem PLTS, yang ditunjukkan oleh penurunan nilai PR. Faktor *soiling* menyebabkan pengurangan jumlah cahaya matahari yang diterima oleh modul, sehingga mengurangi daya output aktual dibandingkan daya teoritis. Oleh karena itu, pemantauan rutin terhadap kebersihan modul menjadi aspek penting dalam menjaga performa sistem PLTS agar tetap optimal.

### 3.4 Strategi Mitigasi Dampak *Soiling Loss* Terhadap Kinerja String Pada PLTS

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, diketahui bahwa *soiling loss* merupakan salah satu faktor eksternal yang memiliki pengaruh signifikan terhadap penurunan *performance ratio* (PR) pada sistem pembangkit listrik tenaga surya. Akumulasi debu, tanah, dan partikel lain pada permukaan modul surya menyebabkan penurunan intensitas cahaya yang masuk ke sel surya, sehingga menghambat proses konversi energi dan menurunkan output daya aktual.

Fenomena ini telah diamati secara aktual pada PLTS 7 MWp, di mana nilai PR menunjukkan penurunan seiring meningkatnya nilai *soiling loss* berdasarkan hasil pemetaan spasial dan grafik distribusi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang sistematis dan berbasis teknis untuk meminimalkan dampak tersebut. Berikut ini merupakan strategi mitigasi yang dapat diimplementasikan:

- 1) Penerapan Jadwal Pembersihan PV modul berbasis data

Langkah Mitigasi paling mendasar adalah melakukan pembersihan PV modul secara rutin. Namun, untuk meningkatkan efektivitas, pembersihan sebaiknya tidak hanya dilakukan interval waktu tetap, tetapi juga berdasarkan data actual dari hasil monitoring PR dan *soiling Loss*. String yang menunjukkan nilai SL diatas 13% atau PR dibawah 77% harus menjadi prioritas utama dalam agenda pembersihan.

## 2) Penggunaan Teknologi Anti *Soiling Coating*

Salah satu pendekatan preventif yang dapat dipertimbangkan adalah penerapan lapisan pelindung (*anti-soiling coating*) pada permukaan modul surya. Coating ini berfungsi mengurangi daya lekat debu dan mempercepat proses self-cleaning saat terjadi hujan ringan. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan *anti-soiling coating* dapat mengurangi kebutuhan pembersihan manual hingga 30–50%, terutama di wilayah beriklim kering dan berdebu seperti Lombok Timur.

## 4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat soiling loss pada PLTS Selong 7 MWp bervariasi dari sangat rendah ( $\leq 3\%$ ) hingga cukup tinggi ( $> 13\%$ ), yang terutama dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan aktivitas debu di sekitar lokasi. Analisis grafik juga memperlihatkan adanya hubungan negatif antara soiling loss dan performance ratio (PR), di mana peningkatan soiling loss menyebabkan penurunan nilai PR secara signifikan. Contohnya, pada kondisi soiling 28,69% nilai PR turun hingga 61,97%, sedangkan pada kondisi bersih (2,37%) PR dapat mencapai 87,20%. Temuan ini menegaskan bahwa kebersihan permukaan modul surya merupakan faktor krusial dalam menjaga efisiensi konversi energi. Untuk meminimalkan dampak soiling, strategi teknis yang dapat diterapkan mencakup pembersihan panel secara terjadwal berbasis data

## REFERENSI

- [1] D. Puspita and N. Nugraheni, “ENERGI BERSIH TERJANGKAU DALAM MEWUJUDKAN TUJUAN PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN (SDGs)”, [Online]. Available: <http://sosains.greenvest.co.id>
- [2] A. A. Solikah and B. Bramastia, “Systematic Literature Review : Kajian Potensi dan Pemanfaatan Sumber Daya Energi Baru dan Terbarukan Di Indonesia,” *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 5, no. 1, pp. 27–43, Mar. 2024, doi: 10.14710/jebt.2024.21742.
- [3] U. Mukhtar, “Dielektrika-Jurnal Ilmiah Kajian Teori dan Aplikasi Teknik Elektro Analisis Performa Rasio Daya yang Dihasilkan PV Modul pada Array Box 881 Di PLTS 7 MWp ARTICLE INFO ABSTRACT,” vol. 12, no. 1, p. 41, 2025.
- [4] D. F. Silalahi, A. Blakers, M. Stocks, B. Lu, C. Cheng, and L. Hayes, “Indonesia’s vast solar energy potential,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 17, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14175424.
- [5] E. P. Laksana *et al.*, “Potential Usage of Solar Energy as a Renewable Energy Source in Petukangan Utara, South Jakarta,” *Jurnal Rekayasa ElektriKa*, vol. 17, no. 4, Dec. 2021, doi: 10.17529/jre.v17i4.22538.
- [6] P. Borah, L. Micheli, and N. Sarmah, “Analysis of Soiling Loss in Photovoltaic Modules: A Review of the Impact of Atmospheric Parameters, Soil Properties, and Mitigation Approaches,” Dec. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su152416669.
- [7] T. Manager *et al.*, *IEA PVPS TASK 13-PERFORMANCE, OPERATION AND RELIABILITY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS Soiling Losses-Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants*. 2022. [Online]. Available: [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org).
- [8] C. Montes, R. Dorta-Guerra, B. González-Díaz, S. González-Pérez, L. Ocaña, and E. Llarena, “Study of the Evolution of the Performance Ratio of Photovoltaic Plants Operating in a Utility-Scale Installation Located at a Subtropical Climate Zone Using Mixed-Effects Linear Modeling,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 21, Nov. 2022, doi: 10.3390/app122111306.

- [9] W. J. Jamil, H. A. Rahman, and K. A. Baharin, "Experiment-based study on the impact of soiling on PV system's performance," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 810–818, Apr. 2016, doi: 10.11591/ijece.v6i2.9606.
- [10] S. Nurjanah, T. Dewi, and Rusdianasari, "Dusting and Soiling Effect on PV Panel Performance: Case Study Open-pit Mining in South Sumatra, Indonesia," in *Proceedings - IEIT 2021: 1st International Conference on Electrical and Information Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2021, pp. 251–256. doi: 10.1109/IEIT53149.2021.9587351.