EVALUASI PENINGKATAN KINERJA PLTS DENGAN PENERAPAN SISTEM PEMBERSIHAN OTOMATIS DI AREA TERDAMPAK *SOILING*

Emerya Putri Annisa Zahra (13321054) | Pembimbing: Dr.Ing. Justin Pradipta, S.T., M.T. dan Dr. Ir. Eko Mursito Budi, M.T.

TEKNIK FISIKA
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

LATAR BELAKANG

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi solusi penting untuk transisi energi terbarukan, namun efisiensinya menurun akibat ***soiling*** (akumulasi debu/kotoran) yang dapat mengurangi output daya hingga **9%–40%**, memicu ***hot spot***, dan mempercepat **degradasi modul**. Pembersihan manual sering tidak efektif, berbiaya tinggi, serta berisiko merusak panel, terutama jika tidak rutin dilakukan. Sistem pembersihan otomatis berbasis IoT muncul sebagai solusi modern untuk menjaga performa PLTS, memungkinkan pemantauan jarak jauh, pengendalian berbasis kondisi, serta menurunkan biaya operasional.

Studi terdahulu menunjukkan sistem ini mampu mengoptimalkan efisiensi panel secara signifikan. Penelitian ini bertujuan **mengevaluasi penerapan sistem pembersih otomatis IoT pada PLTS 10 kWp di Gedung CAS ITB**, dengan mengukur dampaknya terhadap pengurangan soiling, peningkatan output daya, serta efisiensi operasional, sehingga diharapkan dapat menjadi dasar strategi pemeliharaan PLTS yang lebih efektif dan berkelanjutan.

PARAMETER PENGUKURAN

Pengukuran Tingkat *Soiling*

Soiling Ratio

$$SR^{Pmax} = \frac{C_2^{Pmax}(1-\gamma(T_2-T_{ref}))Pmax_2}{C_1^{Pmax}(1-\gamma(T_1-T_{ref}))Pmax_1}$$

Daily Soiling Loss dan Pnom Loss

$$DSL = (1 - DSR^{Pmax})x\ 100\%$$

$$Pnom\ Loss(\%) = \left(1 - \frac{P_{actual}}{P_{normal}}\right) \times 100\%$$

Parameter Kelayakan Finansial

Payback Period

$$PP = \frac{Investasi\ Awal}{Arus\ Kas\ Bersih\ tahunan}$$

Semakin rendah nilai PP maka semakin baik

Return of Investment

$$ROI = \frac{Keuntung\ Bersih}{Total\ Investasi}\ x\ 100\%$$

Indikator Proyek Layak: ROI tahunan > *Discount Rate*

Net Present Value

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - I_0$$

Indikator Proyek Layak: $NPV > 0$

Internal Rate of Return

$$0 = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - I_0$$

Indikator Proyek Layak: IRR > biaya modal atau *Minimum Attractive Rate of Return* (MARR)

METODOLOGI

Identifikasi Variabel

Variabel Independen

- Sistem pembersihan berbasis IoT (PV Cleaning System).
- Pembersihan manual menggunakan sapu dan kain pel basah
- Panel dibiarkan tanpa intervensi pembersihan apa pun.

Variabel Dependen

- Daya keluaran sesaat (*Pmax*) dan produksi energi harian kumulatif dalam kWh.
- Tingkat kebersihan permukaan panel yang dinilai melalui analisis visual perbandingan tingkat soiling.
- Penurunan Daya Nominal (Pnom Loss), Soiling Ratio (SR), dan Daily Soiling Loss (DSL).

Variabel Kontrol

- Ketiga string uji menggunakan modul multicrystalline 210 W identik.
- Soiling buatan 1 kg debu bata merah diaplikasikan tiap 08.00 WIB pada string 1 & 2.
- Data performa terekam kontinu, dokumentasi visual konsisten pukul 12.00 WIB.

Desain dan Alur Penelitian

Pengaturan Kelompok Eksperimen

Kelompok Eksperimen	Perlakuan	Metode Pembersihan	Frekuensi Pembersihan	Waktu Pembersihan	Waktu simulasi soiling
String 1	Sistem pembersihan otomatis	*PV Cleaning System*	Setiap hari	11.05 WIB	08.00 WIB
String 2	Pembersihan manual	Sapu dan kain pel	Dua hari sekali	11.05 WIB	08.00 WIB
String 3	Tidak dibersihkan	Tidak dibersihkan	Tidak ada	Tidak Ada	Tidak Ada

Prosedur Perlakuan *Soiling*

- Debu batu bata **ditabur manual oleh peneliti** dengan APD standar (sarung tangan & masker) untuk keselamatan kerja.
- Penaburan dilakukan **tiap pukul 08.00 pagi** saat panel kering, sebelum puncak iradiansi.
- **Debu 1 kg** diaplikasikan per *string* per hari secara merata, meski ketebalan tidak diukur harian karena keterbatasan waktu.

Metode Pengumpulan Data

📸 Pengumpulan Data Visual

Foto panel diambil **setiap hari pukul 12.00 WIB** serta sebelum dan sesudah pembersihan untuk analisis kualitatif efektivitas pembersihan dan laju soiling, dengan pencahayaan konsisten.

⚡ Pengumpulan Data Kinerja

Data **V, I, P, iradiasi**, dan **suhu modul** direkam real-time ke *database* Laboratorium Manajemen Energi, menjadi dasar analisis kuantitatif performa dan kerugian daya.

📉 Perhitungan Rugi Daya

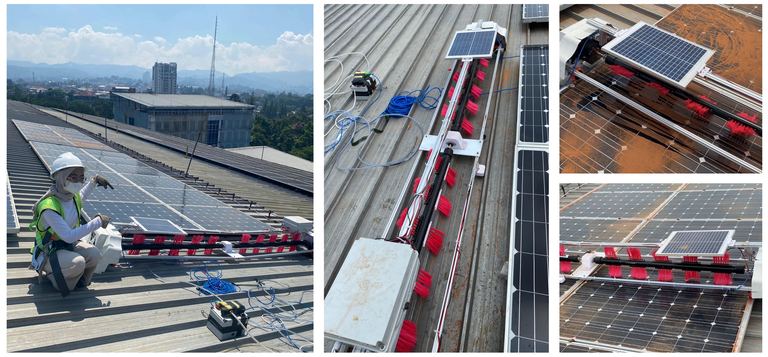
Rugi daya dihitung melalui ***Pnom Loss***, ***Soiling Ratio*** (SR), dan ***Daily Soiling Loss*** (DSL) untuk menilai dampak *soiling* pada output energi tiap skema pembersihan.

📊 Analisis Kelayakan Finansial

Kelayakan dibandingkan melalui perhitungan **CAPEX**, **OPEX**, **NPV**, **IRR**, **ROI**, ***Payback Period*** untuk mengevaluasi efisiensi biaya sistem pembersihan otomatis versus manual dan tanpa pembersihan.

HASIL DAN ANALISIS

Analisis 1 Operasional Sistem Pembersihan Otomatis



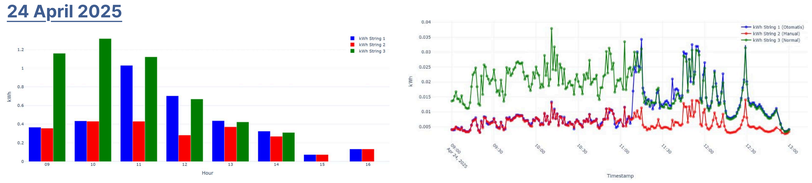
- **Lokasi Uji**: String 1 PLTS Gedung CAS (10 kWp)
- **Tujuan**: Uji kemampuan pembersihan otomatis mengatasi soiling
- **Kecepatan & Efisiensi**: Sistem menyelesaikan siklus pembersihan untuk string 6 meter dalam kurang lebih 20 menit, jauh lebih cepat dibandingkan metode manual yang memerlukan sekitar 60 menit.
- **Keandalan Fitur**:
  - *Double Cleaning System* (sikat & air) efektif mengangkat kotoran.
  - *App Integration* memungkinkan kontrol dan penjadwalan jarak jauh yang konsisten.
  - *Self Charging System* menjaga daya baterai tetap terisi dari panel mini 20 Wp, memastikan operasional berkelanjutan.
- **Keselamatan**: Sensor ultrasonik bekerja efektif mendeteksi tepi panel, mencegah alat terjatuh dan memastikan cakupan pembersihan yang merata.
- **Hasil**: Beroperasi stabil & andal sepanjang pengujian

Analisis 2 Perbandingan Visual Tingkat *Soilling*

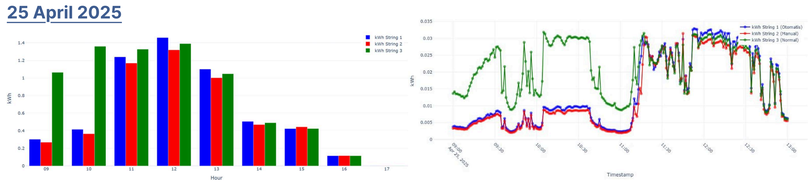
Gambar di samping menunjukkan ***String* 1 lebih bersih berkat pembersihan otomatis**, sedangkan *String* 2 yang manual masih berdebu di tengah, berpotensi menghambat penyerapan cahaya.

Analisis 3 Kinerja Sistem PLTS

24 April 2025

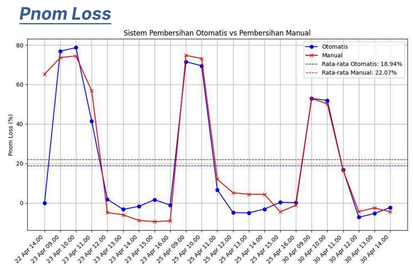


25 April 2025



Analisis 4 Rugi-Rugi Daya

Pnom Loss



Daya Maksimum dan *Soiling Ratio*

Tanggal	$Pmax_1$ (kW)	$Pmax_2$ (kW)	DSR^{Pmax}
22 April 2025	0,887	0,535	0,6
23 April 2025	1,949	1,993	1,0
24 April 2025	2,057	1,083	0,5
25 April 2025	1,976	1,889	1,0
26 April 2025	1,684	0,92	0,5
30 April 2025	2,192	2,166	1,0
1 Mei 2025	1,96	1,455	0,7

Regresi $y = -0{,}0132x + 0{,}2834$ menunjukkan rugi daya turun sekitar **0,0132 kW per hari** dari awal atau turun sekitar **28,34%**, menandakan peningkatan kinerja panel seiring pembersihan atau hujan.

Analisis 5 Kelayakan Ekonomi

Komponen Ekonomi	PV *Cleaning System*	Manual
CAPEX	Rp5.757.346	Rp155.000
OPEX	Rp131.400	Rp43.898.550
Total Investasi (CAPEX + OPEX)	Rp5.888.747	Rp44.053.550
CAPEX	12.552,47 kWh	12.552,47 kWh

NPV	Rp11.551.325
IRR	67%
ROI	262%
Payback Period	16,6 bulan

Berdasarkan analisis, PV Cleaning System terbukti **sangat layak** dengan NPV positif **Rp11,5 juta**, IRR **67%**, ROI **262%**, dan *payback period* hanya **1,38 tahun**, menunjukan proyek ini menguntungkan serta strategis untuk efisiensi dan profitabilitas PLTS.

KESIMPULAN

1. Sistem PV Cleaning beroperasi andal; semua fitur berfungsi optimal dan menyelesaikan pembersihan panel 6×2,6 m hanya dalam 20 menit, lebih cepat dari manual 1 jam.
2. Dokumentasi visual menunjukkan pembersihan otomatis lebih merata, sedangkan manual sering menyisakan kotoran di tengah modul.
3. Panel dengan pembersihan otomatis menghasilkan energi hingga 8% lebih tinggi pada hari yang sama, memulihkan efisiensi lebih cepat dan stabil.
4. Rugi daya rata-rata turun menjadi 18,94% pada sistem otomatis, dibanding manual 22,07%, dengan DSR dan DSL mendekati 0% usai pembersihan.
5. Analisis ekonomi 5 tahun menunjukkan biaya total sistem otomatis hanya Rp5,9 juta, sekitar 6,5 kali lebih murah dibanding manual Rp44 juta.