BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Kajian mengenai *soiling* pada sistem fotovoltaik telah berkembang menjadi salah satu topik utama dalam riset kinerja PLTS selama satu dekade terakhir. Untuk memposisikan penelitian ini di dalam peta keilmuan tersebut, tinjauan penelitian relevan berikut dikelompokkan ke dalam lima arus utama: (1) dampak global dan tekno-ekonomi *soiling*; (2) pengaruh karakteristik pengotor, khususnya debu batubara dan *fly ash*; (3) fenomena sementasi pengotor dan rugi residual; (4) peran hujan sebagai mekanisme pembersihan alami pada iklim tropis; serta (5) metode kuantifikasi *soiling loss* dan studi perbandingan kinerja aktual terhadap simulasi PVsyst di Indonesia.

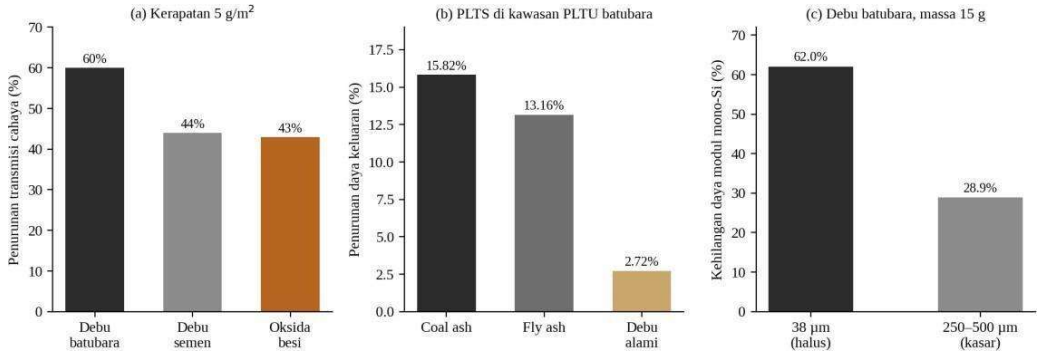
2.1.1 Dampak Global dan Tekno-Ekonomi Soiling

Ilse dkk. melakukan penilaian tekno-ekonomi menyeluruh terhadap kerugian akibat *soiling* pada pembangkitan listrik tenaga surya global dan menyimpulkan bahwa akumulasi pengotor mereduksi produksi energi surya dunia sekurang-kurangnya 3–4%, yang setara dengan potensi kehilangan pendapatan miliaran Euro per tahun, dengan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya kapasitas terpasang di kawasan berdebu (Ilse et al., 2019). Studi tersebut juga menggaris bawahi bahwa biaya mitigasi pada instalasi atap jauh lebih mahal dibandingkan instalasi di atas tanah karena keterbatasan akses, kondisi yang sangat relevan dengan objek penelitian ini yang tidak dilengkapi fasilitas pembersihan permanen. Temuan senada dilaporkan dalam laporan IEA-PVPS Task 13 yang menempatkan *soiling* sebagai persoalan kinerja yang persisten pada pembangkit fotovoltaik di seluruh dunia; laporan tersebut juga mencatat bahwa pada wilayah beriklim sedang dan tropis pengotor dapat terakumulasi dalam hitungan bulan, sementara pada wilayah arid pembersihan alami praktis tidak terjadi karena hujan yang langka (IEA-PVPS Task 13, 2022).

2.1.2 Pengaruh Karakteristik Pengotor: Debu Batubara dan Fly Ash

Riaz dan Mahmood menguji secara eksperimental dampak tiga jenis debu industri terhadap transmisi cahaya modul fotovoltaik di lingkungan pabrik semen dan menemukan bahwa debu batubara merupakan pengotor paling merusak: pada kerapatan 5 g/m², debu batubara menurunkan transmisi cahaya hingga sekitar 60%, jauh melampaui debu semen dan oksida besi pada kerapatan yang sama, karena albedonya paling rendah dan ukuran partikelnya paling halus (Riaz & Mahmood, 2022). Studi eksperimental pada PLTS di kawasan PLTU batubara di Malaysia memperkuat temuan tersebut: deposisi abu batubara (*coal ash*) dan *fly ash* pada permukaan modul menyebabkan penurunan daya keluaran rata-rata masing-masing sebesar 15,82% dan 13,16%, jauh lebih besar dibandingkan debu alami yang hanya sekitar 2,72% (Elias et al., 2019). Sementara itu, eksperimen laboratorium terhadap debu batubara dengan variasi ukuran partikel menunjukkan bahwa partikel yang lebih halus (38 µm) menimbulkan kehilangan daya hingga lebih dari 60% pada modul monokristalin, sedangkan partikel kasar (250–500 µm) dengan massa yang sama hanya menimbulkan kehilangan sekitar 29% — menegaskan bahwa kehalusan partikel merupakan variabel kritis dalam atenuasi cahaya (Adigüzel et al., 2019). Perbandingan kuantitatif dampak berbagai jenis dan ukuran pengotor tersebut dirangkum pada Gambar 2.1.

Gambar 2.1 Perbandingan dampak jenis dan ukuran pengotor terhadap kinerja modul fotovoltaik: (a) penurunan transmisi cahaya tiga jenis debu industri pada kerapatan 5 g/m²; (b) penurunan daya akibat deposisi coal ash, fly ash, dan debu alami; (c) pengaruh ukuran partikel debu batubara



Sumber: diolah dari data eksperimen (Riaz & Mahmood, 2022; Elias et al., 2019; Adigüzel et al., 2019)

Dari sisi karakterisasi debu, Kazem dan Chaichan membuktikan melalui eksperimen di Oman Utara bahwa sifat fisik debu, bukan semata kuantitas deposisinya menjadi penentu utama degradasi kinerja modul fotovoltaik (Kazem & Chaichan, 2016). Javed dkk. yang melakukan karakterisasi debu terakumulasi pada panel fotovoltaik di Doha, Qatar, sampai pada kesimpulan serupa: komposisi mineral, distribusi ukuran partikel, dan sifat optik pengotor menentukan seberapa besar radiasi yang dipantulkan, diserap, dan dihamburkan sebelum mencapai sel surya (Javed et al., 2017). Kedua studi ini menjadi dasar teoretis mengapa lingkungan dengan pengotor spesifik seperti debu batubara memerlukan evaluasi kinerja tersendiri dan tidak dapat digeneralisasi dari studi debu gurun.

2.1.3 Sementasi Pengotor dan Rugi Residual

Zhao dkk. dalam tinjauan komprehensif mengenai deposisi debu dan metode pembersihan modul fotovoltaik menjelaskan bahwa pengotor yang dibiarkan terakumulasi dapat mengalami transformasi fisiko-kimiawi, dipicu oleh kelembapan, embun, dan siklus pemanasan harian, menjadi lapisan kerak yang melekat kuat pada kaca modul dan tidak dapat dihilangkan dengan pembersihan standar (Zhao et al., 2021). Studi terbaru mengenai dinamika *soiling* dan efisiensi pembersihan pada berbagai lingkungan debu menegaskan bahwa efektivitas pembersihan sangat bergantung pada jenis dan tingkat adhesi pengotor, serta bahwa pengotor tersementasi memerlukan metode pembersihan khusus dengan intensitas mekanis yang lebih tinggi (Tsanakas et al., 2026). Penelitian pada modul fotovoltaik yang beroperasi di dalam kawasan PLTU batubara di Gurun Atacama mendokumentasikan bahwa aktivitas pembangkit menghasilkan material, termasuk partikel hasil pembakaran yang bersifat higroskopis, yang memfasilitasi proses sementasi pada permukaan modul, dengan dampak terdeteksi hingga radius sekitar 9 km dari pembangkit dan semakin parah pada kondisi kelembapan tinggi (Fernández-Solas et al., 2022). Temuan ini sangat relevan bagi penelitian ini karena PLTS Gedung CWP berada tepat di dalam kompleks PLTU batubara pada iklim tropis pesisir yang lembap, sehingga risiko sementasi secara teoretis justru lebih tinggi.

2.1.4 Hujan sebagai Mekanisme Pembersihan Alami di Iklim Tropis

Asumsi bahwa curah hujan tinggi di iklim tropis mampu membersihkan modul secara alami, yang menjadi dasar konsep bebas pemeliharaan pada perancangan PLTS Gedung CWP — telah diuji oleh sejumlah penelitian dengan hasil yang tidak sepenuhnya mendukung. Norde Santos dkk. menganalisis data *soiling* dan meteorologi dari 33 stasiun pengukuran di Afrika Barat dan menemukan bahwa pembersihan oleh hujan sering kali tidak tuntas (*incomplete cleaning*); tidak terdapat ambang curah hujan tunggal yang menjamin pembersihan sempurna pada semua kondisi, dan literatur melaporkan ambang yang bervariasi lebar antara 0,3 hingga 20 mm per hari (Norde Santos et al., 2024). Lebih jauh, hujan ringan justru dilaporkan dapat memperparah *soiling* karena tetesan air mengikat partikel debu dan meninggalkan residu setelah menguap (Borah et al., 2023). Studi eksperimental pada lingkungan urban subtropis dengan curah hujan melimpah menemukan bahwa meskipun hujan efektif menghilangkan sebagian besar deposit kering, residu air hujan pasca-penguapan tetap menjadi salah satu mode pengotoran dominan (Li et al., 2024). Rangkaian temuan ini memberikan landasan empiris untuk menguji hipotesis penelitian ini bahwa pembersihan alami oleh hujan tidak memadai bagi lingkungan dengan beban pengotor industri batubara.

2.1.5 Metode Kuantifikasi Soiling Loss dan Studi Aktual–Simulasi di Indonesia

Micheli meninjau berbagai strategi pemantauan *soiling* dan mengelompokkan pendekatan berbasis data kinerja ke dalam dua model ekstraksi utama: model *Fixed Rate Precipitation* (FRP) yang memanfaatkan metrik kinerja dan pola curah hujan untuk membangkitkan profil rugi berbentuk gigi gergaji, serta model *Stochastic Rate and Recovery* (SRR) yang menurunkan rasio *soiling* rata-rata semata dari metrik kinerja pembangkit (Micheli, 2021). Metode SRR sendiri dikembangkan oleh Deceglie dkk., yang menunjukkan bahwa *soiling loss* dapat diestimasi langsung dari data produksi (*yield*) PLTS dengan mendeteksi lonjakan positif metrik kinerja sebagai penanda peristiwa pembersihan dan mengekstraksi laju penurunan pada setiap interval pengotoran (Deceglie et al., 2018). Pendekatan berbasis data operasional semacam ini, yang tidak memerlukan stasiun *soiling* khusus — menjadi acuan metodologis bagi penelitian ini

yang mengandalkan data sistem monitoring pembangkit, data curah hujan, dan log pembersihan.

Di Indonesia, studi yang membandingkan kinerja aktual PLTS terhadap hasil simulasi masih terbatas pada sistem berskala kecil atau durasi pengamatan pendek. Studi pada PLTS atap 1,82 kWp di iklim tropis Indonesia melaporkan PR aktual hanya berkisar 55–59%, jauh di bawah PR simulasi 81–82%, dan mengidentifikasi *soiling* serta temperatur sebagai kontributor utama deviasi (Santoso et al., 2026). Studi komparatif perangkat simulasi pada PLTS atap skala megawatt di iklim tropis menyimpulkan bahwa PVsyst merupakan model dengan keandalan prediksi terbaik di antara perangkat yang diuji, namun tetap memerlukan kalibrasi parameter rugi — termasuk *soiling loss* — dengan data spesifik lokasi agar estimasi produksinya realistis (Raji et al., 2025). Belum ada di antara studi tersebut yang mengkaji lingkungan industri pembangkit batubara dengan data operasional multi-tahun, sehingga celah penelitian yang diidentifikasi pada Bab I tetap terbuka. Ringkasan penelitian relevan beserta posisinya terhadap penelitian ini disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Ringkasan penelitian relevan dan posisinya terhadap penelitian ini

Peneliti (Tahun)	Fokus dan Metode	Temuan Utama	Relevansi dengan Penelitian Ini
Ilse dkk. (2019)	Penilaian tekno-ekonomi soiling global dan strategi mitigasinya	Soiling memangkas produksi PV global ≥3–4%; biaya pembersihan instalasi atap 3–8 kali instalasi tanah	Justifikasi urgensi kuantifikasi soiling dan analisis strategi pembersihan pada PLTS atap
Riaz dan Mahmood (2022)	Eksperimen soiling tiga jenis debu industri di lingkungan pabrik semen	Debu batubara paling merusak: transmisi cahaya turun 60% pada 5 g/m²	Dasar empiris keparahan pengotor debu batubara di lokasi penelitian
Studi PLTU Malaysia (2019)	Eksperimen deposisi coal ash dan fly ash pada panel PV di kawasan PLTU batubara Malaysia	Penurunan daya: coal ash 15,82%, fly ash 13,16%, debu alami 2,72%	Pembanding langsung untuk konteks PLTS dalam kompleks

Peneliti (Tahun)	Fokus dan Metode	Temuan Utama	Relevansi dengan Penelitian Ini
			PLTU batubara di iklim tropis
Kazem dan Chaichan (2016); Javed dkk. (2017)	Karakterisasi sifat fisik, kimia, dan optik debu pada modul PV (Oman; Qatar)	Karakteristik partikel, bukan semata kuantitas, menentukan degradasi kinerja	Landasan teori mengapa pengotor industri batubara perlu dievaluasi tersendiri
Studi Gurun Atacama (2022)	Estimasi soiling loss modul PV berbagai teknologi di kawasan PLTU batubara	Aktivitas PLTU memicu sementasi pengotor hingga radius ±9 km, diperparah kelembapan tinggi	Basis hipotesis residual/cemented soiling pada PLTS Gedung CWP
Norde Santos dkk. (2024)	Pemodelan statistik efek pembersihan hujan pada 33 stasiun di Afrika Barat	Pembersihan oleh hujan sering tidak tuntas; tidak ada ambang hujan tunggal yang menjamin bersih sempurna	Menguji validitas asumsi pembersihan alami pada desain bebas pemeliharaan
Deceglie dkk. (2018); Micheli (2021)	Metode ekstraksi soiling loss dari data yield (SRR) dan tinjauan strategi pemantauan soiling	Soiling loss dapat dikuantifikasi langsung dari data kinerja tanpa stasiun soiling khusus	Acuan metodologis kuantifikasi soiling berbasis data operasional
Studi PLTS atap Indonesia (Santoso et al., 2026; Raji et al., 2025)	Perbandingan kinerja aktual terhadap simulasi (PVsyst) pada PLTS atap skala kecil dan megawatt	PR aktual jauh di bawah simulasi; PVsyst paling andal namun perlu kalibrasi data spesifik lokasi	Menunjukkan celah: belum ada studi multi-tahun pada lingkungan industri PLTU batubara

Sumber: diolah dari literatur

Berdasarkan pemetaan di atas, penelitian ini mengambil posisi sebagai studi kasus kuantitatif yang menjembatani tiga arus literatur sekaligus: eksperimen karakteristik debu

batubara, fenomena sementasi di lingkungan pembangkit termal, dan metode kuantifikasi *soiling* berbasis data operasional, dengan konteks iklim tropis lembap Indonesia yang belum terdokumentasi dalam literatur internasional.

2.1.6 Tinjauan Regional Tambahan mengenai Karakteristik dan Mitigasi Debu

Selain studi-studi di atas, sejumlah tinjauan regional turut memperkaya pemahaman tentang variasi dampak debu pada berbagai kondisi geografis. Chanchangi dkk. meninjau secara komprehensif dampak debu terhadap kinerja PV di Nigeria dan menyimpulkan bahwa variasi debu antar-wilayah geopolitik menuntut evaluasi kinerja yang spesifik lokasi, bukan generalisasi lintas kawasan (Chanchangi et al., 2020). Studi lapangan lanjutan di Nigeria Utara menemukan bahwa parameter cuaca seperti kelembapan dan kecepatan angin turut memoderasi besaran *soiling loss* musiman (Chanchangi et al., 2021). Eksperimen deposisi debu gurun di Yordania oleh Saidan dkk. dan Hammad dkk. masing-masing menunjukkan penurunan daya keluaran signifikan akibat debu gurun dan merumuskan interval pembersihan optimal berbasis pemodelan matematis kombinasi debu-temperatur (Saidan et al., 2016; Hammad et al., 2018). Tinjauan sistematis Zaihidee dkk. menegaskan debu sebagai faktor deteriorasi yang tidak dapat dihindari pada seluruh kawasan pemasangan PV, terlepas dari iklim setempat (Zaihidee et al., 2016). Studi eksperimental Enaganti dkk. terhadap penumpukan debu pada kaca rendah-besi (*low-iron glass*) — material yang serupa dengan kaca depan modul PV — menunjukkan penurunan transmisi cahaya hingga 17,48% setelah 120 hari akumulasi alami tanpa pembersihan (Enaganti et al., 2022). Menoufi memperkenalkan indeks *soiling* fotovoltaik (*Photovoltaic Soiling Index*, PVSI) sebagai metrik standar untuk membandingkan tingkat keparahan *soiling* antar-lokasi (Menoufi, 2017), sementara Al-Housani dkk. mengevaluasi efektivitas berbagai teknik pembersihan kering pada modul CdTe di lingkungan berdebu dan menemukan bahwa frekuensi pembersihan optimal sangat bergantung pada intensitas deposisi lokal (Al-Housani et al., 2019). Jamil dkk. dalam tinjauannya mengenai degradasi kinerja PV mencatat bahwa *soiling* merupakan salah satu dari sedikit faktor rugi yang dapat dimitigasi melalui intervensi operasional, berbeda dengan degradasi material yang bersifat permanen (Jamil et al., 2017). Tinjauan pustaka oleh Abuzaid, Awad, dan Shamayleh mengenai dampak

akumulasi debu turut mengidentifikasi durasi pajanan dan komposisi debu sebagai penentu utama tingkat rugi (Abuzaid et al., 2022), sejalan dengan tinjauan strategi mitigasi debu oleh Vedulla, Geetha, dan Senthil yang mengklasifikasikan metode pembersihan berdasarkan tingkat otomatisasi dan kebutuhan sumber daya air (Vedulla et al., 2022).

2.1.7 Strategi dan Ekonomi Pembersihan Modul

Pada aspek strategi dan ekonomi pembersihan, Micheli, Fernández, Aguilera, dan Almonacid menganalisis kerugian musiman pada PLTS 1 MW di Spanyol Selatan dan menemukan bahwa penjadwalan pembersihan tunggal yang tepat waktu pada jendela ±31 hari di musim panas dapat meningkatkan keuntungan hingga 3,6%, meskipun rugi *soiling* tahunan rata-rata tergolong moderat (Micheli et al., 2021). Redondo dkk. mengembangkan model pengotoran untuk PLTS skala besar guna mengoptimalkan keputusan pembersihan berdasarkan data historis kinerja dan cuaca (Redondo et al., 2023), sementara Jo, Ham, dan Kim mengkaji secara spesifik efek pembersihan oleh curah hujan pada PLTS skala besar dan menegaskan bahwa efektivitas pembersihan alami sangat bergantung pada intensitas dan durasi hujan, bukan hanya akumulasi totalnya (Jo et al., 2023). Tinjauan komprehensif Salamah dkk. mengenai metode pembersihan pada berbagai wilayah iklim menyimpulkan bahwa strategi pembersihan yang seragam tidak dapat diterapkan lintas iklim dan harus disesuaikan dengan karakteristik pengotor serta pola curah hujan setempat (Salamah et al., 2022) — kesimpulan yang relevan langsung dengan kegagalan asumsi pembersihan alami pada desain PLTS Gedung CWP.

2.1.8 Evaluasi Kinerja Jangka Panjang dan Studi PLTS Atap Tambahan di Indonesia

Pada dimensi metodologi evaluasi kinerja jangka panjang, Louwen dkk. mengkarakterisasi kinerja modul PV pada kondisi operasi riil selama bertahun-tahun dan menunjukkan bahwa deviasi antara kinerja aktual dan spesifikasi nominal umumnya disebabkan kombinasi temperatur, *soiling*, dan degradasi yang saling tumpang tindih (Louwen et al., 2017). Ma, Yang, dan Lu melakukan analisis kinerja jangka panjang pada sistem PV mandiri (*standalone*) dan menekankan pentingnya periode observasi multi-tahun untuk memisahkan variabilitas musiman dari tren degradasi sesungguhnya (Ma et

al., 2017) — pendekatan yang menjadi dasar pemilihan periode 24 bulan pada penelitian ini. Vasisht, Srinivasan, dan Ramasesha menemukan bahwa variasi musiman iradiasi dan suhu ambien menjelaskan sebagian besar fluktuasi PR bulanan pada instalasi PV di India, namun mengakui bahwa efek *soiling* residual belum terisolasi secara memadai dalam model mereka (Vasisht et al., 2016). Lindig dkk. dalam tinjauan terbaru mengenai indikator kinerja teknis PV menegaskan pentingnya rutinitas kualitas data dan konsistensi metodologi perhitungan PR agar perbandingan antar-studi dan antar-periode tetap valid (Lindig et al., 2024), sementara Liu dkk. meninjau secara luas metode akumulasi dan penghilangan *soiling* pada panel PV dan mengklasifikasikan strategi mitigasi berdasarkan skala investasi dan konteks iklim operasi (Liu et al., 2024). Di tingkat nasional, studi PLTS *off-grid* di Sukabumi, Jawa Barat menggunakan simulasi PVsyst untuk perencanaan sistem *mini-grid* namun tidak menyertakan data validasi operasional aktual (Artiyasa et al., 2023), sedangkan studi potensi PLTS atap di Lombok Timur menggunakan data historis PLN Mobile namun terbatas pada estimasi potensi tanpa analisis deviasi kinerja terhadap simulasi (Juherwin et al., 2024). Kedua studi ini menggarisbawahi bahwa penelitian PVsyst di Indonesia secara umum masih berfokus pada tahap perencanaan dan belum banyak yang melakukan validasi silang jangka panjang terhadap data operasional aktual — celah yang secara langsung diisi oleh penelitian ini.

2.1.9 Riset Pendukung Kinerja dan Mitigasi Rugi PLTS Atap

Beberapa penelitian pendahulu di lingkungan Institut Teknologi PLN turut memberikan konteks empiris yang relevan bagi penelitian ini, khususnya terkait simulasi kinerja PLTS atap dan mitigasi faktor rugi non-*soiling*. Damiri dan Nugraha mensimulasikan PLTS atap *on-grid* berkapasitas 200 kWp pada gedung pabrik di kawasan industri Jawa Barat menggunakan perangkat lunak Helioscope, dan memperoleh PR rata-rata tahunan 78,06% dengan rugi temperatur sebesar 12,4% sebagai kontributor rugi terbesar, jauh melampaui kontribusi *soiling* (1,0%) pada lokasi tersebut (Damiri & Nugraha, 2021). Temuan yang serupa diperoleh pada simulasi PLTS atap 124,64 kWp di gedung kantor PLN UP3 Samarinda menggunakan Helioscope dan HOMER, dengan PR tahunan 77,4% dan rugi temperatur modul sebesar 12,9% sebagai faktor dominan

penurunan PR, sementara integrasi ke jaringan PLN memanfaatkan meter EXIM untuk ekspor-impor energi (Damiri & Lamania, 2023). Kedua studi ini menegaskan bahwa pada PLTS atap di iklim tropis Indonesia secara umum, rugi temperatur modul cenderung menjadi faktor dominan dibandingkan *soiling* pada lokasi non-industri berat, sehingga memperkuat pentingnya isolasi kedua faktor rugi tersebut secara terpisah pada lokasi dengan beban pengotor industri seperti PLTS Gedung CWP.

Pada aspek mitigasi rugi temperatur, Damiri dan Sembiring merancang *Automatic Cooling System Solar Power* (AuCS-SP) berbasis Arduino Uno yang menyemprotkan air secara otomatis berdasarkan pembacaan sensor suhu permukaan modul, dan membuktikan peningkatan daya keluaran sebesar 7,03 Watt serta penurunan suhu modul rata-rata 6,29–12°C dibandingkan modul tanpa pendinginan (Damiri & Sembiring, 2023). Temuan ini menggambarkan bahwa rugi temperatur, sebagaimana rugi *soiling*, bersifat dapat dimitigasi melalui intervensi operasional aktif, sehingga kedua faktor rugi tersebut perlu dipisahkan secara cermat dalam analisis deviasi PR pada penelitian ini agar kontribusi masing-masing tidak saling tertukar. Pada sisi penerapan PLTS *off-grid* skala kecil, kegiatan pengabdian masyarakat oleh Hajar dkk. memasang penerangan jalan umum bertenaga surya mandiri (*stand-alone*) di Kampung Cipalahlar, Bekasi, menggunakan modul *high efficiency monocrystalline* 70 Wp dan baterai LiFePO4 36 Ah dengan masa pakai hingga 25–30 tahun (Hajar et al., 2021), yang menggambarkan salah satu ragam konfigurasi PLTS *off-grid non-domestic* sebagaimana diklasifikasikan pada Subbab 2.2.1.1.

Pada level sistem yang lebih kompleks, Karua dan Damiri mengoptimalkan strategi operasi PLTS hybrid 300 kWp yang dikombinasikan dengan PLTD dan *Battery Energy Storage System* di Pulau Maratua menggunakan pendekatan *simulation-based optimization* dan analisis sensitivitas parametrik, dan menemukan bahwa strategi *dispatch* operasional (seperti *Load Following*) memberikan pengaruh yang lebih dominan terhadap kinerja ekonomi sistem (LCOE dan *net present cost*) dibandingkan sekadar penambahan kapasitas terpasang (Karua & Damiri, 2026). Temuan ini relevan secara konseptual bagi penelitian ini: sebagaimana strategi operasi menentukan kinerja sistem hybrid, strategi dan interval pembersihan modul juga berpotensi menjadi determinan kinerja PLTS atap

yang setidaknya sepadan dengan faktor desain kapasitas maupun asumsi teknis lainnya, memperkuat urgensi evaluasi strategi pembersihan berbasis data operasional pada Bab V penelitian ini.

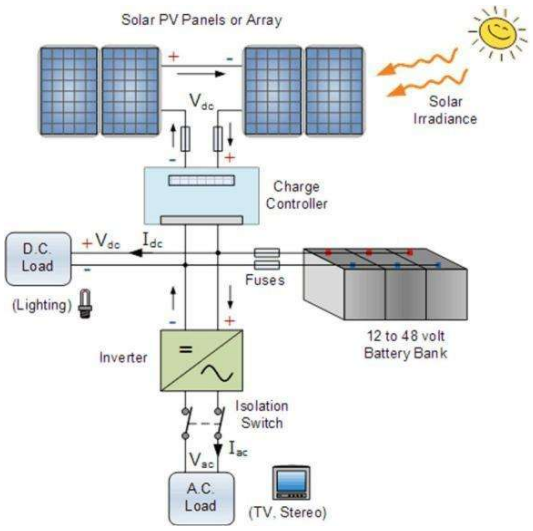
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Dasar Pengetahuan PLTS Atap

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) bekerja berdasarkan efek fotovoltaik, yaitu peristiwa terlepasnya elektron pada material semikonduktor ketika menyerap energi foton dari radiasi matahari sehingga timbul beda potensial dan arus listrik searah (DC). Unit konversi terkecil adalah sel surya; sel-sel dihubungkan seri dan dikemas menjadi modul fotovoltaik; modul-modul dirangkai seri membentuk untai (*string*) untuk mencapai rentang tegangan kerja inverter; dan kumpulan untai membentuk larik (*array*) yang menjadi satuan pembangkitan (Smets et al., 2016). Berdasarkan keterhubungannya dengan jaringan listrik, sistem PLTS diklasifikasikan menjadi tiga: sistem terhubung jaringan (*on-grid*) yang bekerja paralel dengan jaringan dan umumnya tanpa penyimpanan energi, sistem berdiri sendiri (*off-grid*) yang memasok beban terisolasi dengan dukungan baterai, dan sistem hibrida yang menggabungkan keduanya (Smets et al., 2016).

2.2.1.1 PLTS *Off Grid*

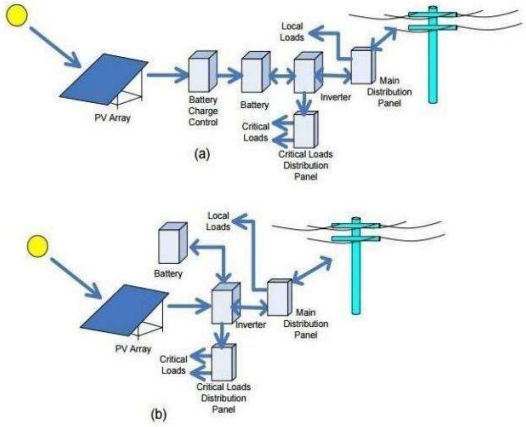
PLTS *Off-Grid* merupakan sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan. Sistem ini berdiri sendiri, sering disebut stand-alone system. Sistem ini biasanya merupakan sistem dengan pola pemasangan tersebar (*distributed*) dan dengan kapasitas pembangkitan skala kecil. Untuk sistem ini biasanya dilengkapi dengan sistem penyimpanan (*storage*) tenaga listrik dengan media penyimpanan baterai. Diharapkan baterai mampu menjamin ketersediaan pasokan listrik untuk beban listrik saat kondisi cuaca mendung dan kondisi malam hari. Berdasarkan aplikasinya sistem ini dibagi menjadi dua yaitu, *PLTS Off-Grid Domestic* dan *PLTS Off-Grid Non-Domestic* (IFC, 2012).



Gambar 2.2 Diagram Prinsip PLTS *Stand Alone*

2.2.1.2 PLTS *ON Grid*

PLTS *On-Grid* atau *Grid*. Merupakan sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan. Berdasarkan pola operasi penyaluran tenaga listrik sistem ini dibagi menjadi dua yaitu, sistem penyimpanan (storage) atau disebut *Grid-connected PV* with a *battery back up*, menggunakan baterai sebagai cadangan dan penyimpanan tenaga listrik dan tanpa baterai atau disebut Gridconnected PV *without a battery back up* (Dadzie, 2008). Baterai pada PLTS *On-grid* berfungsi sebagai suplai tenaga listrik untuk beban listrik apabila jaringan atau grid mengalami kegagalan untuk periode tertentu dan sebagai suplai tenaga listrik ke jaringan listrik negara (PLN) apabila ada kelebihan daya listrik (*excess power*) yang dibangkitkan PLTS. Berdasarkan aplikasinya sistem ini dibagi menjadi dua yaitu, *Grid-connected distributed PV* dan *Grid-connected centralized PV* (IFC, 2012).



Gambar 2.3 Sistem PLTS grid Connected dengan penyimpanan (storage), (a) charge control dan inverter charge control terpisah (b) charge control terintegrasi. (Sumber : Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS, 2017)

PLTS atap (*rooftop solar*) adalah sistem PLTS, umumnya berkonfigurasi *on-grid*, yang modulnya dipasang pada atap bangunan dan energinya digunakan untuk mensubstitusi konsumsi listrik bangunan atau kawasan setempat. Karakteristik utamanya adalah memanfaatkan lahan atap yang menganggur sehingga tidak memerlukan pembebasan lahan, berada dekat titik beban sehingga rugi penyaluran kecil, kapasitasnya dibatasi oleh luas dan kekuatan struktur atap, serta orientasi dan sudut kemiringan modul umumnya mengikuti bidang atap. Karakteristik terakhir ini berkonsekuensi langsung terhadap topik penelitian: kemiringan modul yang rendah memperbesar laju deposisi pengotor dan memperlambat peluruhan alami oleh aliran air hujan, sekaligus menyulitkan akses pembersihan dibandingkan instalasi di atas tanah (Ilse et al., 2019; Zhao et al., 2021).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap *on-grid* adalah sistem pembangkit fotovoltaik yang dipasang pada atap bangunan dan terhubung paralel dengan jaringan listrik, sehingga energi yang dibangkitkan langsung mensubstitusi konsumsi listrik bangunan atau kawasan tempat sistem terpasang. Komponen utama sistem meliputi rangkaian modul fotovoltaik yang mengonversi radiasi matahari menjadi listrik arus searah (DC), inverter yang mengubah listrik DC menjadi arus bolak-balik (AC) sekaligus melakukan penjejakan titik daya maksimum (*Maximum Power Point Tracking*, MPPT),

serta sistem monitoring yang merekam parameter operasi seperti energi, daya, dan iradiasi. Pada objek penelitian ini, sistem tersusun atas 886 modul monokristalin 540 Wp (total 478,44 kWp) dan empat unit inverter dengan kapasitas total 350 kWac, dengan rasio DC/AC sekitar 1,37 (Fourth Partner Energy Pvt Ltd, 2022). Modul monokristalin dipilih karena efisiensi konversinya yang tinggi; namun, sebagaimana teknologi kristalin silikon pada umumnya, keluarannya sensitif terhadap penurunan iradiasi efektif akibat pengotoran permukaan dan terhadap kenaikan temperatur sel (Zhao et al., 2021).

2.2.2 Bagian-Bagian Utama PLTS Atap

Secara umum, PLTS atap *on-grid* tersusun atas lima kelompok komponen utama yang masing-masing berkontribusi terhadap kinerja sistem dan menjadi titik pengamatan dalam evaluasi kinerja pada penelitian ini.

2.2.2.1 Modul fotovoltaik

Modul fotovoltaik sebagai komponen konversi energi. Berdasarkan teknologi selnya, modul komersial terbagi atas monokristalin dengan efisiensi tertinggi, polikristalin, dan lapisan tipis (*thin film*) (Smets et al., 2016). Struktur laminasi modul terdiri atas kaca depan berlapis anti-refleksi, lembar enkapsulan (EVA), sel surya, lembar belakang (*backsheet*), dan bingkai aluminium; kaca depan inilah permukaan tempat seluruh fenomena *soiling* yang dikaji penelitian ini berlangsung (Zhao et al., 2021; Smets et al., 2016)

Terdapat beberapa jenis panel surya yang dapat ditemukan dipasaran, yaitu:

1. Jenis Pertama, yaitu jenis yang terbaik dan yang terbanyak digunakan masyarakat saat ini, adalah jenis monokristalin. Panel ini memiliki tingkat efisiensi antara 18 sampai 22%.



Gambar 2.4 Panel Surya Jenis Monokristalin
(Sumber : enjiner.com)

2. Jenis Kedua, adalah jenis polikristalin atau multi kristalin, yang terbuat dari kristal silikon dengan tingkat efisiensi antara 15 sampai 18%.



Gambar 2.5 Panel Surya Polikristalin

(Sumber : enjiner.com)

3. Jenis Ketiga, adalah silikon jenis amorphous, yang berbentuk filmtipis. Efisiensinya sekitar 4-6%. Panel surya jenis ini banyak dipakai di mainan anak-anak, jam dan kalkulator.



Gambar 2.6 Panel Surya Jenis Silikon Amorphous

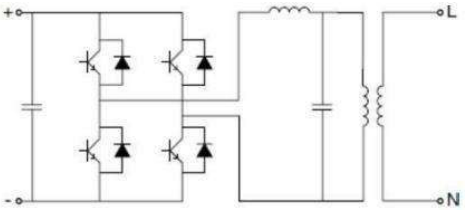
(Sumber : enjiner.com)

2.2.2.2 Inverter

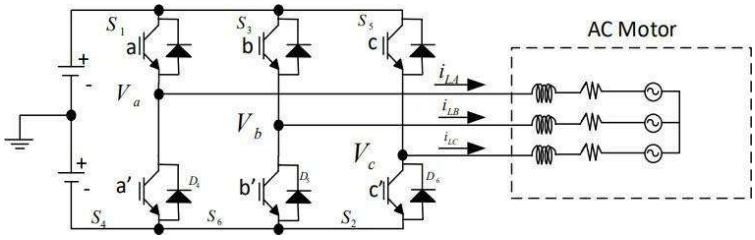
Inverter yang mengubah listrik DC menjadi AC sekaligus menjalankan penjejakan titik daya maksimum (*Maximum Power Point Tracking*, MPPT) agar larik selalu beroperasi pada titik daya optimal. Berdasarkan arsitekturnya dikenal inverter sentral, inverter untai (*string inverter*), dan inverter mikro; PLTS Gedung CWP menggunakan empat inverter untai yang sekaligus menjadi sumber data *heatmap* kinerja pada penelitian ini (Fourth Partner Energy Pvt Ltd, 2022; Smets et al., 2016).

Pengkondisian tenaga listrik (*power condition*) dan sistem control pada sistem PLTS diperankan oleh inverter, yang memiliki fungsi merubah arus listrik searah (*direct current*) yang dihasilkan oleh solar modul menjadi listrik arus bolak balik (*alternating current*) dan dikontrol kualitas dari daya listrik yang dikeluarkan untuk dikirim ke beban atau ke jaringan listrik. Pada PLTS penggunaan inverter satu fasa biasanya untuk sistem

yang bebannya kecil, sedangkan untuk sistem yang besar dan terhubung dengan jaringan utilitas (PLN) biasanya digunakan inverter 3 fasa.



(a)



(b)

Gambar 2.7 Sistem inverter (a) inverter satu fasa (b) inverter tiga fasa.

2.2.2.3 Struktur Penyangga (*mounting*)

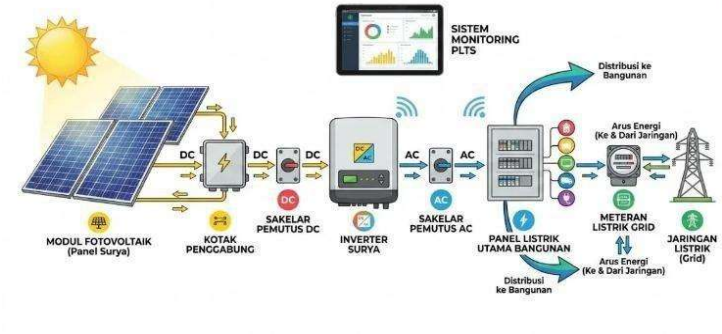
Struktur penyangga (*mounting*) yang mengikat modul ke atap menggunakan sistem klem dan rel aluminium mengikuti kemiringan bidang atap. Keempat, komponen keseimbangan sistem (*balance of system*), yang mencakup kabel DC dan AC, kotak penggabung (*combiner box*), perangkat proteksi berupa sekring untai, pemutus sirkuit, dan pengaman lonjakan tegangan (*surge protection device*), sistem pembumian, serta meter energi ekspor-impor pada titik sambung ke panel distribusi kawasan.



Gambar 2.8 Struktur Penyangga (mounting) Modul Fotovoltaik

2.2.2.4 Sistem Pemantauan

Sistem pemantauan yang terdiri atas pencatat data (*data logger*), meter energi, dan sensor iradiasi berupa piranometer pada bidang modul (POA) dan horizontal global (GHI). Kelompok komponen ini menjadi instrumen utama penelitian karena menyediakan seluruh besaran yang diperlukan bagi perhitungan kinerja berbasis IEC 61724-1, yaitu energi keluaran, iradiasi, dan status operasi setiap inverter (IEC, 2021).



Gambar 2.9 Sistem Pemantauan PLTS *OnGrid*

2.2.3 Parameter Kinerja PLTS Berdasarkan IEC 61724-1

Standar IEC 61724-1 menetapkan terminologi, peralatan, dan metode pemantauan serta analisis kinerja sistem fotovoltaik, dan menjadi basis internasional bagi perhitungan metrik kinerja yang seragam dan dapat dibandingkan antar-pembangkit (IEC, 2021). Standar ini juga menegaskan bahwa faktor yang berdampak paling langsung terhadap kinerja PLTS adalah iradiasi pada bidang modul, temperatur sel, dan rugi pembayangan akibat *soiling* atau salju (IEC, 2021). Tiga besaran dasar dalam kerangka standar tersebut adalah sebagai berikut.

Reference yield (Yr) menyatakan jumlah jam matahari puncak ekuivalen, yaitu perbandingan antara insolasi total pada bidang modul (H, dalam kWh/m²) terhadap iradiansi acuan kondisi uji standar (G_STC = 1 kW/m²), sehingga Yr = H / G_STC (jam). *Final yield* (Yf) menyatakan energi keluaran AC bersih (E_AC, dalam kWh) yang dinormalisasi terhadap kapasitas terpasang DC pada kondisi uji standar (P0, dalam kWp), sehingga Yf = E_AC / P0 (kWh/kWp). *Performance Ratio* (PR) kemudian didefinisikan sebagai perbandingan antara *final yield* dan *reference yield*:

$$PR = Yf / Yr = (E_AC / P0) / (H / G_STC) \quad (2.1)$$

PR bersifat tanpa dimensi (umumnya dinyatakan dalam persen) dan merepresentasikan seluruh rugi sistem, temperatur, *soiling*, *mismatch*, kabel, konversi inverter, ketersediaan, dan pembatasan daya, relatif terhadap kinerja ideal pada kondisi uji standar. Karena ternormalisasi terhadap iradiasi, PR memungkinkan perbandingan kinerja antar-periode dan antara kondisi aktual dengan hasil simulasi tanpa terdistorsi oleh variabilitas cuaca (IEC, 2021; Hukseflux Thermal Sensors, n.d.). Di samping PR, produksi spesifik (kWh/kWp) digunakan sebagai indikator produktivitas energi tahunan; dokumen desain PLTS Gedung CWP menetapkan sasaran produksi spesifik 1.299 kWh/kWp/tahun dan PR 74,23% (Fourth Partner Energy Pvt Ltd, 2022).

2.2.3.1 Ketidakpastian Pengukuran dalam Perhitungan PR

Perbandingan PR aktual terhadap PR simulasi PVsyst tidak lepas dari ketidakpastian pengukuran (*measurement uncertainty*) yang inheren pada setiap instrumen sistem pemantauan. Standar IEC 61724-1 mengklasifikasikan sensor iradiasi (piranometer) ke dalam beberapa kelas akurasi, dengan piranometer kelas standar sekunder memiliki ketidakpastian pengukuran sekitar ±2% dan kelas pertama sekitar ±3–5% terhadap nilai iradiasi sebenarnya (*sensor irradiance uncertainty*) (IEC, 2021). Ketidakpastian ini secara langsung memengaruhi perhitungan *reference yield* (Yr) yang menjadi penyebut pada persamaan PR, sehingga sebagian deviasi PR aktual terhadap simulasi dapat bersumber dari bias sensor, bukan semata soiling.

Selain sensor iradiasi, meter energi dan inverter yang mencatat energi keluaran (E_AC) juga memiliki galat pengukuran (*inverter measurement error*) pada kisaran ±1–2% sesuai kelas akurasi perangkat, yang turut menyumbang ketidakpastian pada *final yield* (Yf) (IEC, 2021). Lindig dkk. menegaskan bahwa rutinitas kualitas data dan konsistensi metodologi pengukuran menjadi prasyarat penting agar perbandingan PR antar-periode maupun antara aktual dan simulasi tetap valid, karena akumulasi galat instrumen dapat menyerupai atau menutupi sinyal soiling yang sebenarnya (Lindig et al., 2024). Pada penelitian ini, ketidakpastian pengukuran tidak dieliminasi melalui kalibrasi ulang sensor, melainkan diminimalkan dampaknya melalui pendekatan komparatif: PR aktual dibandingkan secara konsisten menggunakan instrumen dan metodologi

perhitungan yang sama sepanjang 24 bulan periode pengamatan, sehingga bias sistematik sensor — apabila ada — bersifat relatif konstan dan tidak mendistorsi pola dinamika (sawtooth) PR yang menjadi dasar atribusi soiling.

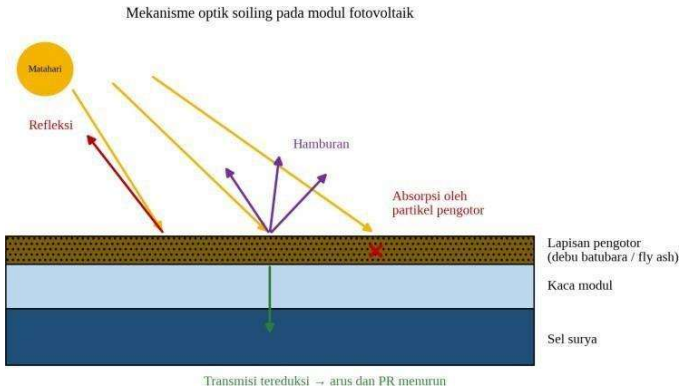
2.2.4 Simulasi PVsyst dan Diagram Rugi-Rugi

PVsyst adalah perangkat lunak simulasi sistem fotovoltaik yang digunakan secara luas untuk studi kelayakan dan perancangan, yang memodelkan produksi energi berdasarkan data meteorologi lokasi, konfigurasi larik modul, karakteristik inverter, dan serangkaian parameter rugi. Keluaran utamanya mencakup estimasi energi tahunan, produksi spesifik, PR, dan diagram rugi-rugi (*loss diagram*) yang menguraikan kontribusi setiap komponen rugi dari energi nominal hingga energi terinjeksi ke jaringan. Studi komparatif pada iklim tropis menempatkan PVsyst sebagai perangkat dengan akurasi prediksi terbaik di kelasnya, namun keandalannya bergantung pada kualitas asumsi parameter rugi yang dimasukkan perancang (Raji et al., 2025). Pada simulasi desain PLTS Gedung CWP, *soiling loss* diasumsikan 7,0% per tahun dan menjadi komponen rugi terbesar kedua setelah rugi temperatur (9,19%) (Fourth Partner Energy Pvt Ltd, 2022). Asumsi *soiling* dalam PVsyst bersifat masukan statis yang ditetapkan perancang, bukan hasil pemodelan proses fisis akumulasi pengotor, sehingga validitasnya untuk lingkungan spesifik seperti kawasan PLTU batubara hanya dapat diuji melalui pembandingan dengan data operasional aktual (Micheli, 2021; Raji et al., 2025).

2.2.5 Soiling pada Modul Fotovoltaik: Definisi dan Mekanisme

Soiling didefinisikan sebagai akumulasi materi partikulat, debu mineral, jelaga, abu, aerosol, garam laut, serbuk sari, kotoran burung, dan pertumbuhan organic, pada permukaan depan modul fotovoltaik (IEA-PVPS Task 13, 2022; Zhao et al., 2021). Mekanisme kerugiannya bersifat optik: lapisan pengotor memantulkan, menyerap, dan menghamburkan sebagian radiasi matahari sebelum mencapai sel surya, sehingga iradiasi efektif menurun, arus hubung singkat berkurang hampir proporsional, dan PR ikut tertekan (Ilse et al., 2019; Kazem & Chaichan, 2016). Tingkat keparahan *soiling* pada

suatu lokasi ditentukan oleh interaksi tiga kelompok faktor: (1) karakteristik sumber pengotor, konsentrasi partikulat udara, jenis, ukuran, dan sifat optik partikel; (2) kondisi meteorologi, curah hujan, kelembapan, embun, kecepatan dan arah angin; serta (3) konfigurasi instalasi, sudut kemiringan modul, ketinggian, dan tekstur permukaan kaca (Javed et al., 2017; Zhao et al., 2021; Borah et al., 2023). Partikel gelap dan halus seperti debu batubara memiliki daya atenuasi tertinggi karena albedonya rendah dan luas kontak per satuan massanya besar (Riaz & Mahmood, 2022; Adigüzel et al., 2019); distribusi deposisinya juga cenderung tidak seragam, menumpuk pada tepi bawah modul dekat rangka sehingga dapat menimbulkan pembayangan parsial dan *mismatch* antar-sel. Skema mekanisme optik tersebut diilustrasikan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Skema mekanisme optik soiling: lapisan pengotor memantulkan, menyerap, dan menghamburkan radiasi matahari sehingga transmisi menuju sel surya tereduksi

Sumber: ilustrasi diolah oleh penulis berdasarkan (Ilse et al., 2019; Kazem & Chaichan, 2016; Zhao et al., 2021)

2.2.6 Soiling Tersementasi dan Rugi Residual

Apabila pengotor dibiarkan pada permukaan modul dalam waktu lama, siklus pembasahan oleh embun atau kelembapan tinggi yang diikuti pengeringan dan pemanasan harian dapat memicu proses sementasi (*cementation*): partikel saling terikat dan melekat kuat pada kaca melalui pembentukan jembatan garam dan mineral, menghasilkan kerak yang tidak dapat dihilangkan dengan pembilasan air biasa (Zhao et al., 2021; Tsanakas et al., 2026). Lingkungan pembangkit batubara terbukti mempercepat proses ini karena emisi partikel hasil pembakaran mengandung senyawa yang

memfasilitasi pengikatan tersebut (Fernández-Solas et al., 2022). Konsekuensi praktisnya adalah munculnya *residual soiling loss*, komponen rugi yang menetap setelah pembersihan standar dilakukan, yang secara empiris teramati sebagai PR pasca-pembersihan yang tidak kembali penuh ke tingkat acuan bersihnya. Konsep inilah yang mendasari Hipotesis 4 penelitian ini, dan observasi lapangan berupa kerak yang tetap melekat pada tepi bawah modul pasca-pembersihan menjadi indikasi awal keberadaannya, sebagaimana didokumentasikan pada Gambar 2.11.



(a) akumulasi debu batubara dan fly ash pada permukaan modul sebelum pembersihan



b) kerak pengotor tersementasi yang tetap melekat pada tepi bawah modul dekat rangka setelah pembersihan manual berbasis air.



(c) situasi lingkungan sekitar — kedekatan atap Gedung CWP dengan area coal stockpile dan silo abu

Gambar 2.11 Dokumentasi lapangan kondisi pengotoran modul PLTS atap Gedung CWP PLTU Suralaya: (a) akumulasi debu batubara dan fly ash pada permukaan modul sebelum pembersihan; (b) kerak pengotor tersementasi yang tetap melekat pada tepi bawah modul dekat rangka setelah pembersihan manual berbasis air; (c) situasi lingkungan sekitar atap Gedung CWP dengan area coal stockpile dan silo abu

Sumber: dokumentasi penulis (data operasional lapangan, 2024–2025)

2.2.6.1 Indikator Kuantitatif Residual Soiling Loss (Cemented Soiling)

Untuk mengoperasionalkan konsep *cemented soiling* agar dapat diuji secara empiris, penelitian ini menggunakan dua indikator kuantitatif yang saling melengkapi. Indikator pertama adalah PR pasca-pembersihan basah yang tidak mencapai 100% terhadap kondisi bersih ideal (acuan simulasi PVsyst); PR puncak pasca-pembersihan basah yang secara konsisten berada di kisaran 93–94% dan tidak meningkat progresif antar-siklus pembersihan mengindikasikan adanya lapisan pengotor residual yang tidak terangkat oleh pembersihan standar.

Indikator kedua, yang lebih diskriminatif, adalah selisih pemulihan PR antara metode pembersihan basah dan metode pembersihan kering (blower) pada lokasi dan periode yang sebanding; selisih yang besar antara kedua metode — bukan sekadar PR pasca-basah yang tidak mencapai 100% — menjadi bukti kuat keberadaan kerak tersementasi, karena metode kering hanya efektif mengangkat partikel lepas dan tidak mampu melepaskan pengotor yang telah terikat kimiawi-fisik melalui mekanisme sementasi (Zhao et al., 2021; Tsanakas et al., 2026).

2.2.7 Pembersihan Alami oleh Hujan

Hujan merupakan mekanisme pembersihan alami utama bagi PLTS di iklim tropis, namun efektivitasnya tidak dapat diasumsikan sempurna. Banyak model *soiling* menyederhanakan efek hujan sebagai pembersihan total apabila curah hujan harian melampaui ambang tertentu, padahal bukti lapangan menunjukkan pembersihan sering kali hanya parsial dan tidak ada ambang tunggal yang berlaku universal (Norde Santos et al., 2024). Hujan ringan bahkan bersifat kontraproduktif: air yang tidak cukup untuk membilas justru mengikat debu, dan residu yang tertinggal setelah penguapan menambah beban pengotor (Borah et al., 2023; Li et al., 2024). Efektivitas pembersihan oleh hujan ditentukan oleh jumlah dan intensitas hujan, jenis serta tingkat adhesi pengotor, dan kemiringan modul (Zhao et al., 2021; Norde Santos et al., 2024). Bagi pengotor yang telah tersementasi, hujan praktis tidak memberikan efek pemulihan (Tsanakas et al., 2026; Fernández-Solas et al., 2022). Rangkuman temuan literatur mengenai ambang dan efektivitas curah hujan sebagai pembersih alami disajikan pada Tabel 2.2. Kerangka teori ini menjadi dasar analisis hubungan antara data curah hujan BMKG dengan dinamika PR bulanan pada penelitian ini.

Tabel 2.2 Rangkuman temuan literatur mengenai efektivitas curah hujan sebagai mekanisme pembersihan alami modul fotovoltaik

Curah Hujan Harian	Efek terhadap Soiling	Sumber
< 0,5 mm (hujan ringan)	Kontraproduktif: air mengikat partikel debu dan meninggalkan residu setelah menguap, memperparah akumulasi pengotor	(Borah et al., 2023)
±1 mm	Pada beberapa lokasi dilaporkan mampu memulihkan kondisi mendekati bersih; sangat bergantung pada jenis pengotor dan kemiringan modul	(Norde Santos et al., 2024)
5,08–10,16 mm	Ambang pembersihan efektif yang dilaporkan untuk PLTS skala besar di California dan Amerika Serikat bagian barat daya	(Norde Santos et al., 2024)

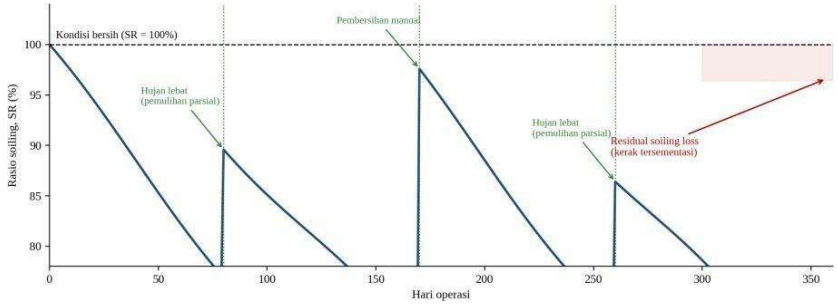
Curah Hujan Harian	Efek terhadap Soiling	Sumber
Rentang ambang literatur: 0,3–20 mm	Tidak ada ambang tunggal yang menjamin pembersihan sempurna; pembersihan oleh hujan umumnya hanya parsial (incomplete cleaning)	(Norde Santos et al., 2024)
Berapa pun (pengotor tersementasi)	Hujan praktis tidak memulihkan pengotor yang telah membentuk kerak melalui mekanisme sementasi	(Tsanakas et al., 2026; Fernández-Solas et al., 2022)

Sumber: diolah dari literatur

2.2.8 Kuantifikasi Soiling Loss dari Data Kinerja

Kuantifikasi *soiling loss* dapat dilakukan melalui pengukuran langsung menggunakan stasiun *soiling* (perbandingan keluaran perangkat bersih dan kotor) atau melalui ekstraksi dari data kinerja pembangkit itu sendiri (Micheli, 2021; Caron et al., 2017). Pada pendekatan kedua, rasio *soiling* (SR) didefinisikan sebagai perbandingan antara keluaran aktual sistem dalam kondisi terkotori terhadap keluaran yang akan dihasilkan apabila modul bersih, sehingga *soiling loss* = 1 − SR (Tzoumanikas et al., 2023). Dua model ekstraksi yang mapan adalah *Fixed Rate Precipitation* (FRP), yang menerapkan laju pengotoran tetap pada setiap periode kering berdasarkan pola hujan, dan *Stochastic Rate and Recovery* (SRR), yang mendeteksi lonjakan positif metrik kinerja sebagai peristiwa pembersihan lalu mengekstraksi laju penurunan tiap interval pengotoran secara statistik (Micheli, 2021; Deceglie et al., 2018). Penelitian ini mengadopsi semangat pendekatan berbasis data tersebut dalam bentuk metode komparatif: deviasi PR aktual terhadap PR simulasi PVsyst dikoreksi terhadap faktor rugi non-*soiling* yang teridentifikasi (temperatur, ketersediaan inverter, variabilitas iradiasi), sehingga komponen deviasi yang tersisa dapat diatribusikan kepada *soiling*; hasilnya kemudian divalidasi silang dengan data curah hujan, log pembersihan, dan bukti visual — analog dengan cara SRR memanfaatkan peristiwa pembersihan sebagai penanda pemulihan kinerja (Deceglie et al., 2018). Dinamika rasio soiling yang membentuk profil gigi gergaji — penurunan bertahap pada periode akumulasi, pemulihan tajam pada peristiwa hujan lebat atau pembersihan, serta komponen rugi residual yang menetap

akibat sementasi — diilustrasikan pada Gambar 2.12. Pola konseptual inilah yang konsisten dengan fluktuasi PR bulanan PLTS Gedung CWP yang telah dipaparkan pada Bab I.



Gambar 2.12 Ilustrasi konseptual profil rasio soiling (SR) berbentuk gigi gergaji: siklus akumulasi pengotor, pemulihan parsial oleh hujan, pemulihan oleh pembersihan manual, dan rugi residual akibat sementasi

Sumber: diolah oleh penulis berdasarkan konsep (Norde Santos et al., 2024; Micheli, 2021; Deceglie et al., 2018)

2.2.9 Faktor Rugi Non-Soiling

Agar atribusi *soiling* valid, faktor rugi lain yang turut menekan PR harus diperhitungkan. Rugi temperatur timbul karena daya keluaran modul kristalin menurun sekitar 0,3–0,4% per °C kenaikan temperatur sel di atas 25 °C; pada iklim tropis, rugi ini lazim menjadi komponen terbesar dan pada simulasi desain objek penelitian mencapai 9,19% (Fourth Partner Energy Pvt Ltd, 2022; IEC, 2021). Rugi ketersediaan (*availability*) muncul ketika sebagian sistem tidak beroperasi, misalnya gangguan inverter, dan teridentifikasi melalui *heatmap* kinerja inverter pada sistem monitoring. Variabilitas iradiasi antar-tahun menyebabkan produksi aktual menyimpang dari simulasi meskipun sistem sehat; penggunaan PR — yang ternormalisasi terhadap iradiasi terukur — serta pembandingan data POA/GHI aktual terhadap basis data meteorologi simulasi menjadi mekanisme koreksinya (IEC, 2021; Hukseflux Thermal Sensors, n.d.). Faktor lain seperti degradasi modul tahunan (menurut spesifikasi pabrikan sekitar 0,45–0,55% per tahun untuk modul monokristalin) diperhitungkan sebagai asumsi tetap sesuai batasan penelitian.

2.2.9.1 Koreksi Temperatur pada PR (Temperature-Corrected PR)

Selain diperhitungkan sebagai komponen rugi, temperatur modul juga dapat dikoreksi secara eksplisit dalam perhitungan PR melalui pendekatan *temperature-corrected PR* (PR_corr) sebagaimana diakomodasi dalam kerangka IEC 61724-1 (IEC, 2021). Pendekatan ini menormalisasi PR aktual terhadap temperatur sel acuan 25°C menggunakan koefisien temperatur daya modul (γ, dalam %/°C), dengan formulasi umum sebagai berikut.

$$PR_corr = PR / [1 + \gamma \times (T_sel - 25°C)] \qquad (2.2)$$

dengan T_sel adalah temperatur sel modul saat pengukuran dan γ bernilai negatif (sekitar -0,3 hingga -0,4%/°C untuk modul kristalin silikon) (IEC, 2021; Fourth Partner Energy Pvt Ltd, 2022). Dengan PR_corr, deviasi kinerja yang tersisa setelah koreksi temperatur secara teoretis lebih murni merepresentasikan kontribusi soiling dan faktor rugi non-termal lainnya. Namun, penerapan formulasi ini mensyaratkan data temperatur sel modul yang terukur langsung dan berkelanjutan sepanjang periode pengamatan (IEC, 2021). Objek penelitian ini tidak dilengkapi sensor temperatur modul pada sistem monitoring eksisting, sehingga koreksi temperatur eksplisit melalui PR_corr tidak dapat diterapkan secara langsung; sebagai gantinya, kontribusi rugi temperatur diperhitungkan secara tidak langsung melalui asumsi rugi temperatur pada simulasi PVsyst (9,19% per tahun).

2.2.10 Strategi dan Interval Pembersihan Modul

Strategi pembersihan modul membentang dari pembersihan manual berbasis air, pembersihan mekanis semi-otomatis, sistem sikat otomatis terpasang, hingga pelapisan anti-pengotor (*anti-soiling coating*) (Ilse et al., 2019; Zhao et al., 2021). Penentuan interval pembersihan yang optimal pada hakikatnya adalah persoalan keseimbangan ekonomi antara nilai energi yang hilang akibat *soiling* dan biaya pelaksanaan pembersihan: interval terlalu panjang membiarkan kerugian energi terakumulasi dan pada lingkungan berat berisiko memicu sementasi yang biaya pemulihannya jauh lebih tinggi, sedangkan interval terlalu pendek memboroskan biaya operasi (Ilse et al., 2019; Micheli, 2021). Estimasi laju pengotoran spesifik lokasi (persen penurunan PR per satuan waktu pada periode kering) merupakan masukan kunci bagi optimasi ini, dan menjadi salah satu

keluaran yang dituju penelitian ini sebagai dasar rekomendasi strategi pemeliharaan bagi PLTS di lingkungan PLTU batubara. Perbandingan karakteristik metode-metode pembersihan tersebut dirangkum pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Perbandingan metode pembersihan modul fotovoltaik dan kesesuaiannya untuk lingkungan pengotor industri berat

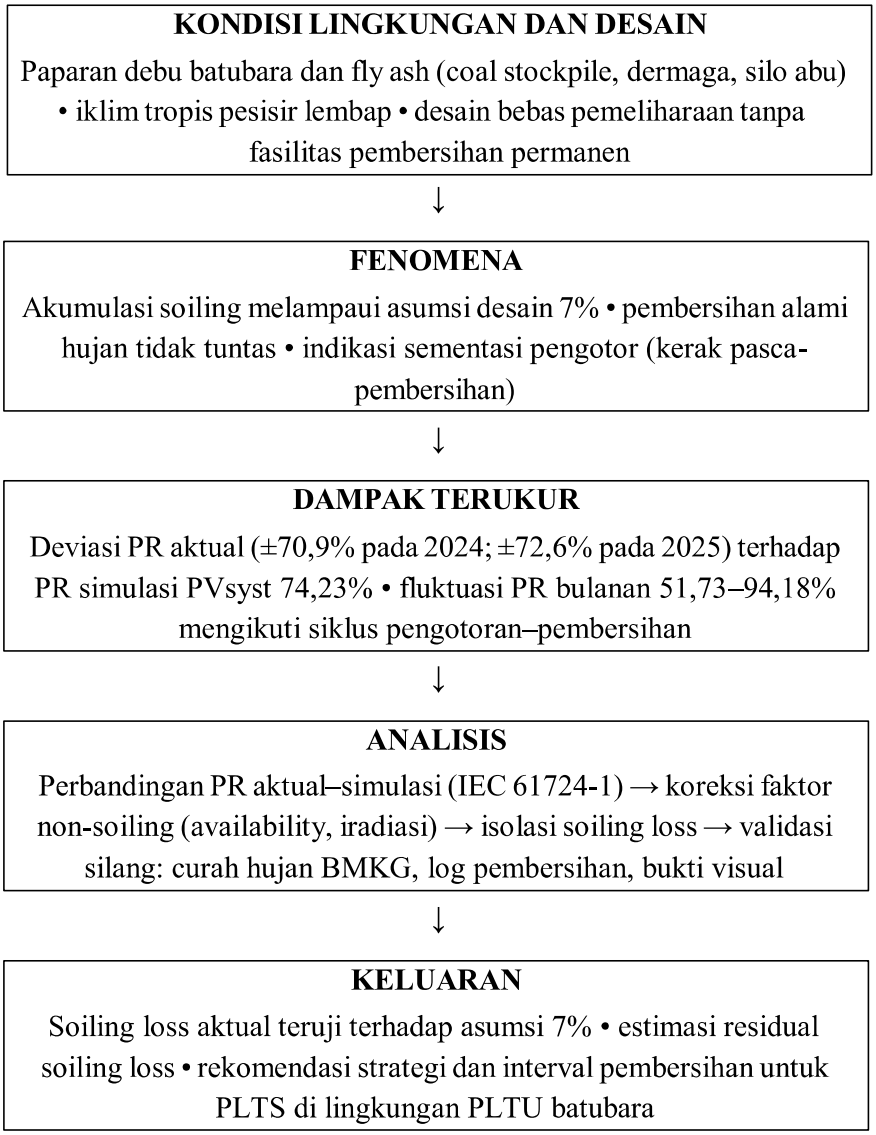
Metode	Kelebihan	Keterbatasan	Kesesuaian untuk PLTS Gedung CWP
Pembersihan alami (hujan dan angin)	Tanpa biaya operasi; tanpa risiko abrasi mekanis	Tidak tuntas; hujan ringan justru memperparah; tidak efektif untuk pengotor tersementasi	Tidak memadai sebagai strategi tunggal (terbukti dari data PR aktual)
Manual berbasis air	Efektif untuk pengotor lepas; fleksibel; investasi awal rendah	Padat tenaga kerja; butuh akses dan pasokan air; frekuensi terbatas bila fasilitas tidak tersedia; kurang efektif untuk kerak tersementasi	Metode eksisting; efektivitas dibatasi akses scaffolding temporer
Semi-otomatis / robotik	Frekuensi tinggi dengan biaya marginal rendah; konsisten; dapat kering (tanpa air)	Investasi awal tinggi; perlu desain struktur pendukung; risiko mikro-abrasi jangka panjang	Layak dikaji bila laju pengotoran aktual terbukti tinggi
Pelapisan anti-soiling (coating)	Menekan laju deposisi dan adhesi; memperpanjang interval pembersihan	Umur lapisan terbatas; efektivitas bervariasi terhadap jenis pengotor; biaya aplikasi ulang	Potensial sebagai pelengkap, khususnya menekan risiko sementasi

Sumber: diolah dari literatur (Ilse et al., 2019; Zhao et al., 2021; Tsanakas et al., 2026; Norde Santos et al., 2024)

2.3 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran penelitian ini dibangun dari logika sebab-akibat berikut. Lingkungan PLTS atap Gedung CWP, yang berdekatan dengan *coal stockpile*, dermaga bongkar muat batubara, dan silo abu, menghasilkan paparan pengotor debu batubara dan *fly ash* yang menurut teori dan bukti eksperimental merupakan jenis pengotor dengan atenuasi optik terparah (Riaz & Mahmood, 2022; Elias et al., 2019; Adigüzel et al., 2019). Paparan tersebut, dikombinasikan dengan kelembapan tinggi iklim tropis pesisir dan absennya program pembersihan terjadwal akibat konsep desain bebas pemeliharaan, diduga menimbulkan *soiling loss* aktual yang melampaui asumsi desain 7% serta memicu sementasi pengotor yang menyisakan rugi residual (Zhao et al., 2021; Tsanakas et al., 2026; Fernández-Solas et al., 2022). Dampaknya termanifestasi sebagai deviasi PR aktual terhadap PR simulasi PVsyst, yang berfluktuasi mengikuti siklus akumulasi pengotor, curah hujan, dan peristiwa pembersihan (Norde Santos et al., 2024; Deceglie et al., 2018).

Untuk menguji dugaan tersebut, penelitian mengalirkan analisis dari masukan berupa data operasional multi-tahun (PR, energi, iradiasi POA/GHI, *heatmap* inverter), data lingkungan (curah hujan BMKG), data pemeliharaan (log pembersihan), dan dokumentasi visual; melalui proses perbandingan PR aktual–simulasi berbasis kerangka IEC 61724-1 yang dikoreksi faktor rugi non-*soiling*; menuju keluaran berupa kuantifikasi *soiling loss* aktual, identifikasi *residual soiling loss*, dan rekomendasi strategi serta interval pembersihan. Alur kerangka pemikiran tersebut divisualisasikan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Kerangka pemikiran penelitian

Sumber: diolah oleh penulis