

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **II.1 Overview Sistem PLTS**

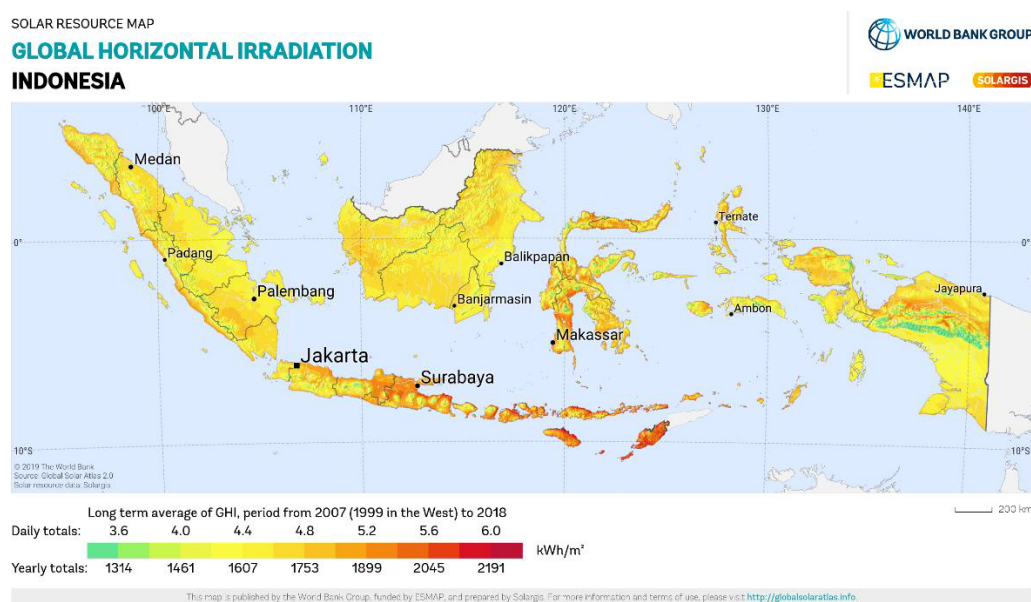
Teknologi fotovoltaik terus mengalami perkembangan yang sangat pesat beberapa tahun terakhir karena ketersediaannya potensi energi matahari dan bersifat ramah lingkungan. Salah satu parameter penting pada teknologi fotovoltaic selain pertimbangan harga yakni efisiensi. Efisiensi modul surya terus mengalami peningkatan yang tentunya seiring dengan perbaikan kinerja modul surya. Kinerja luar modul PLTS dipengaruhi oleh banyak faktor, beberapa masalah kinerja terkait dengan modul itu sendiri dan yang lainnya terkait dengan lokasi dan lingkungan. Beberapa faktor utama ini adalah degradasi material, radiasi matahari, suhu modul, resistensi parasit, faktor pengisian, bayangan, kekotoran, PID, tilt-angle dan lain-lain.

Kinerja dan keandalan modul PLTS memainkan peran penting untuk meningkatkan masa pakai modul PLTS, bersama dengan periode investasi, sebagai indikator yang secara langsung mengurangi biaya listrik atau Levelized Cost of Energy (LCOE) dari setiap instalasi PLTS. Tapi, pemahaman lengkap tentang modul PLTS terhadap dampak degradasi pada kinerja PLTS masih jauh belum lengkap, dan upaya ekstensif harus dilakukan untuk mencapai dan menjamin setidaknya 25 tahun masa operasi modul PLTS dengan keandalan dan kinerja yang tinggi dalam kondisi iklim apapun. Dimana, kondisi iklim memiliki peran penting dalam penentuan tingkat degradasi dan penyebab utama kegagalan modul PLTS. Sebagai akibatnya, umpan balik pemasangan PLTS di bawah iklim dan wilayah yang berbeda diperlukan dalam hal degradasi, kegagalan untuk memperkaya database kinerja dan keandalan system PLTS secara global (Belhaouas *et al.*, 2022), (Atsu *et al.*, 2020).

##### **II.1.1 Prinsip Kerja dan Potensi PLTS**

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan jenis aplikasi energi terbarukan tenaga surya yang menggunakan efek fotovoltaik untuk menghasilkan listrik yang dapat secara langsung mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik, yang dibangun dari semikonduktor untuk menyerap dan mengubah pancaran matahari menjadi energi listrik (Juaidi *et al.*, 2022). Indonesia adalah salah satu negara Asia Tenggara yang terbentang pada daerah garis khatulistiwa. Negara yang terletak di sepanjang garis itu memiliki waktu radiasi matahari rata-rata 12 jam. Potensi besar dari penyinaran matahari dan waktu rata-rata tahunan merupakan keunggulan utama pemasangan pembangkit listrik tenaga surya di Indonesia.

Namun, Kondisi mendung di Indonesia menjadi masalah bagi pembangkit listrik tenaga surya. Awan bisa berubah dengan cepat seiring dengan kondisi geografi Indonesia yang merupakan daerah kepulauan. Berdasarkan peta iradiasi horizontal global dari SolarGIS, Indonesia memiliki penyinaran matahari rata-rata 4.80 kWh/m<sup>2</sup> /hari. Peta iradiasi horizontal global di Indonesia disajikan pada Gambar 5. Seperti yang ditunjukkan pada peta, Indonesia bagian selatan memiliki intensitas penyinaran matahari yang lebih tinggi. Semakin tinggi nilai penyinaran matahari berarti lokasi tersebut memiliki potensial PLTS yang lebih tinggi (Putranto *et al.*, 2022).



Gambar 5. Global Horizontal Irradiation (Globalsolaratlas.info, 2022)

## II.1.2 Jenis dan komponen PLTS

Sistem PLTS diklasifikasikan dalam berbagai kelompok seperti berdasarkan desain, efisiensi dan utilitas pasokan, serta metode di mana sistem terhubung dan berkomunikasi ke beban listrik lainnya. Kita dapat membedakan yang terhubung ke jaringan dan sistem yang berdiri sendiri atau *standalone*. Sistem PLTS yang terhubung ke jaringan mengirimkan daya listrik ke jaringan di waktu yang sama dengan energi standar. Sistem yang terhubung ke jaringan menghasilkan listrik energi yang diatur tanpa menggunakan baterai (Ihaddadene *et al.*, 2022).

## Panel Surya

Panel surya dibentuk dari serangkaian sel surya yang dihubungkan secara seri yang biasanya terdiri dari 36 atau 72 sel surya untuk mendapatkan spesifikasi modul yang diinginkan dan diuji dengan menggunakan Standart Test Condition (STC). STC memiliki kriteria radiasi matahari 1000 W/m<sup>2</sup>, Air Mass 1.5 dan temperatur modul 25°C (Firman *et al.*, 2022). Sel surya dibentuk dari bahan semikonduktor tipe n (electron) dan tipe P (Proton) yang dihubungkan dan membentuk lapisan junction PN. Sel surya mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik dengan efek photovoltaic. Adapun prinsip kerja sel surya adalah sebagai berikut:

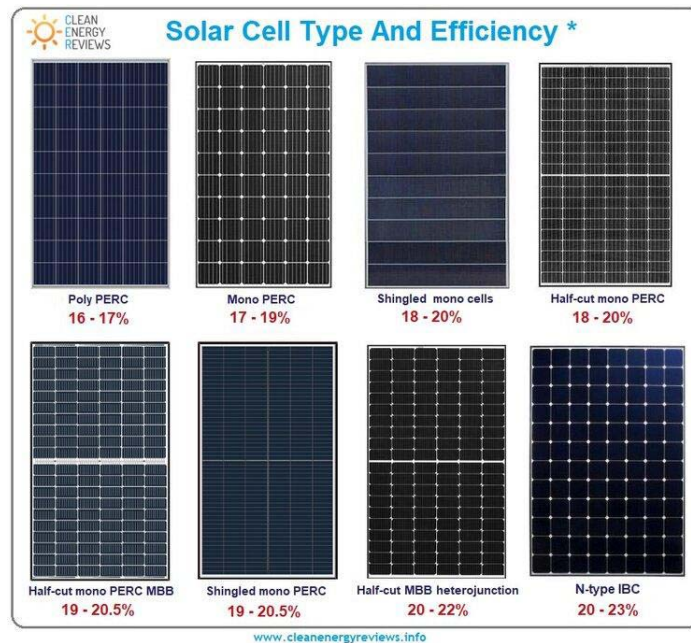
- a. Saat matahari menyinari permukaan sel surya, maka akan membentuk medan listrik.
- b. Cahaya yang sampai ke sambungan antara tipe P dan tipe N menyebabkan elektron bebas.
- c. Elektron akan melewati medan listrik yang terbentuk jika memiliki cukup energi, sehingga elektron bebas bergerak melalui silikon dan masuk ke sirkuit eksternal.

Ada tiga generasi teknologi PV yakni (Mussard and Amara, 2018):

- Generasi pertama: Gallium arsenide (GaAs), dan crystalline silicon (cSi) seperti multicrystalline silicon (multi-Si) dan monocrystalline silicon (mono-Si);
- Generasi kedua (Thin film): amorpheus silicon (a-Si), CdTe, atau copper indium gallium (di) selenide (CIS/CIGS);
- Generasi ketiga: dye-sensitized, organik dan multi-junction.

Metode yang paling sering dipakai dalam pembuatan silikon jenis lapisan tipis ini adalah dengan Plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) dari gas silane dan hidrogen. Lapisan yang dibuat dengan metode ini menghasilkan silikon yang tidak memiliki arah orientasi kristal atau yang dikenal sebagai amorphous silikon (non kristal). Selain menggunakan material dari silikon, sel fotovoltaik lapisan tipis juga dibuat dari bahan semikonduktor lainnya yang memiliki efisiensi solar sel tinggi seperti Cadmium Telluride (Cd Te) dan Copper Indium Gallium Selenide (CIGS).

Panel surya atau yang sering juga disebut modul surya merupakan bagian utama dalam sistem PLTS. Perkembangan panel surya yang pesat menyebabkan peningkatan efisiensi dan harga menjadi lebih kompetitif. Berikut gambaran perbandingan antar teknologi modul surya yang tersedia dipasaran seperti ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan antara Teknologi Modul Surya ([www.cleanenergyreviews.info](http://www.cleanenergyreviews.info), diakses 5 Agustus 2022)

Keunggulan modul fotovoltaik jenis Kristal (PUSDIKLAT, 2021):

- Efisiensi lebih tinggi;
- Densitas daya per area lebih besar;
- Bahan untuk rak dan penopang lebih sedikit;
- Jumlah modul lebih sedikit sehingga biaya angkut lebih rendah;
- Pemilihan jumlah modul lebih banyak;
- Fleksibilitas inverter sangat bagus.

Keunggulan modul fotovoltaik jenis thin film:

- Daya keluaran kurang dipengaruhi oleh suhu;
- Material yang digunakan lebih sedikit;
- Biaya per watt lebih murah;
- Tampilan dapat menyesuaikan kebutuhan estetika;
- Konsumsi kebutuhan energi pada saat pembuatan lebih sedikit;
- Lebih toleran terhadap bayangan yang menutupi sinar matahari.

Pada modul PLTS terdapat beberapa parameter penting yang harus diperhatikan yang telah dicantumkan pada datasheet modul PLTS. Parameter tersebut antara lain:

- a.  $P_{max}$  >> Nominal power modul PLTS

- b.  $V_{mp}$  >> Tegangan maksimum Modul PLTS
- c.  $I_{mp}$  >> Arus maksimum Modul PLTS
- d.  $V_{oc}$  >>Tegangan open circuit Modul PLTS
- e.  $I_{sc}$  >>Arus hubung modul PLTS

| Modul Tipe                         | CS6X-315P          |
|------------------------------------|--------------------|
| Solar Cell Type                    | Poly-crystalline   |
| Maximum Power (Pmax)               | 315 Wp             |
| Maximum Power Voltage (Vmp)        | 36,6 V             |
| Maximum Power Current (Imp)        | 8,61 A             |
| Open-circuit Voltage (Voc)         | 45,1 V             |
| Short-circuit Current (Isc)        | 9,18 A             |
| Module Efficiency (%)              | 16,42 %            |
| Operating Temperature              | -40°C ~ +85°C      |
| Maximum System Voltage             | 1000V (IEC)        |
| Max. Series Fuse Rating            | 15 A               |
| Power Tolerance                    | 0 ~ + 5 W          |
| Temperature coefficients of Pmax   | -0.41%/°C          |
| Temperature coefficients of Voc    | -0.31%/°C          |
| Temperature coefficients of Isc    | 0.053%/°C          |
| Nominal Operating Cell Temperature | 45 ± 2°C           |
| Bypass Diode                       | 3                  |
| Junction Box IP Rating             | IP 67              |
| Dimensi Modul                      | 1954 x 982 x 40 mm |
| Berat Modul                        | 22 kg              |

Gambar 7. Datasheet Panel Surya (Canadian Solar)

Pada konfigurasi modul dikenal beberapa istilah penting sebagai berikut (PUSDIKLAT, 2021):

- a. Sel surya

Sel surya merupakan bagian inti dari modul surya yang telah dibahas sebelumnya.

- b. Modul surya

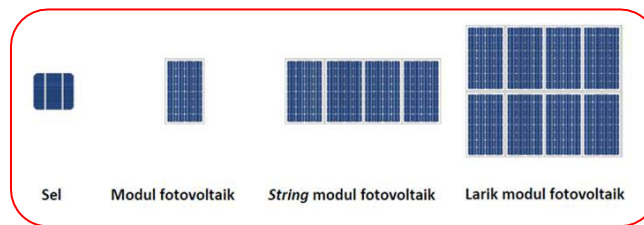
Modul surya merupakan serangkaian sel surya yang dihubungkan secara seri untuk mendapatkan konfigurasi output yang diinginkan seperti kapasitas modul (Wp), arus (A) dan tegangan (V).

- c. String

String merupakan serangkaian modul surya yang dihubungkan secara seri untuk mendapatkan daya output PLTS yang sesuai dengan rating inverter, karena terhubung seri sehingga parameter yang perlu diperhatikan adalah besaran tegangan kerja.

- d. Array/Larik

Array atau larik merupakan serangkaian string panel surya yang dihubungkan secara paralel untuk mendapatkan kombinasi seri paralel yang sesuai dengan rating peralatan dan kapasitas PLTS.



Gambar 8. Konfigurasi Rangkaian Modul Fotovoltaik (Ramadhani, 2018)

## II.2 Kinerja PLTS

### II.2.1 Performance Ratio

Performance Ratio (PR) adalah cara untuk menghitung efisiensi sebenarnya dari PLTS system (Kasim *et al.*, 2021). Ini mewakili kehilangan energi seperti kehilangan karena suhu, inverter, kehilangan kabel, pengotoran, bayangan, mismatch loss dan kehilangan akibat dioda bypass. PR adalah faktor normalisasi sehubungan dengan solar radiasi. Ini menunjukkan pemanfaatan yang tidak lengkap dari solar yang masuk radiasi dan proporsi energi yang tersedia di grid setelah kehilangan di grid sistem PLTS yang terhubung. Ini adalah parameter kinerja yang paling banyak digunakan untuk analisis komparatif dari berbagai teknologi panel PLTS dan juga digunakan untuk membandingkan sistem PLTS yang terhubung ke jaringan terlepas dari lokasi, kapasitas daya, dan struktur pemasangan (Solar and Ag, 2016).

$$PR = \frac{\text{Aktual Output PLTS}}{\text{Ekspektasi Output PLTS}} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana, Ekspektasi output PLTS diperoleh dari persamaan:

$$GHI \times \text{Area PLTS} \times \% \text{ Eff} \dots\dots\dots (2)$$

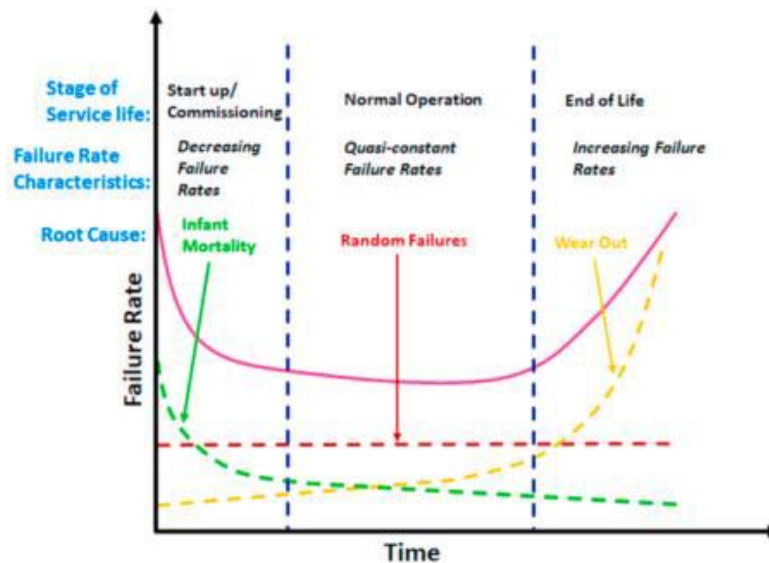
Penurunan kinerja sistem PLTS terutama disebabkan oleh beberapa faktor seperti iklim dan kondisi lingkungan, kesalahan penanganan Modul PLTS yang terjadi dalam pengangkutan dan pemasangan di lokasi dan perawatannya. Meskipun kemajuan yang signifikan telah dibuat dalam sistem PLTS dalam beberapa dekade terakhir, desainer masih menghadapi tantangan terkait dengan pengaruh kondisi iklim terhadap kinerja sistem PLTS. Dalam praktiknya, kinerja modul PLTS jauh lebih rendah saat beroperasi di luar ruangan daripada di bawah kondisi laboratorium yang terkendali. Kondisi iklim utama yang sangat mempengaruhi kinerja modul PLTS meliputi radiasi matahari, suhu, kecepatan dan arah angin, kelembaban relatif, dan debu. Biasanya, penyinaran matahari dan udara suhu memiliki dampak yang lebih signifikan pada daya keluaran PLTS daripada kelembaban dan kecepatan

angin. Debu adalah masalah unik yang secara signifikan mempengaruhi kinerja modul PLTS di Wilayah Teluk. Studi telah dilakukan pada efek iklim yang berbeda kondisi pada kinerja sistem PLTS. Secara umum, faktor lingkungan memiliki dampak yang berbeda pada kinerja sistem PLTS. Sebagai contoh, daya output PLTS berkurang dengan peningkatan kelembaban relatif, suhu udara dan deposisi debu sementara itu meningkat dengan peningkatan kecepatan angin. Variasi kondisi iklim dari satu lokasi ke lokasi lainnya di seluruh dunia memiliki efek yang sesuai pada kinerja modul PLTS di berbagai daerah. Parameter yang dapat memengaruhi modul PLTS kinerja meliputi radiasi matahari, kecepatan angin, curah hujan, suhu, kelembaban dan kemungkinan kehadiran debu (Charfi *et al.*, 2018).

## II.2.2 Kerusakan pada system PLTS

Kegagalan modul PLTS di lapangan dapat berasal dari masalah material, cacat desain produk yang mendasar, atau kegagalan dalam pengendalian kualitas selama proses manufaktur. Tiga mekanisme kunci yang bertanggung jawab atas kegagalan modul PLTS biasanya dipertimbangkan, yaitu, *Infant Mortalities*, *mid-life failure* (atau, kegagalan acak), dan *Wear-out failure*. Gambar 9 menunjukkan grafik *Bathub Curve* yang dihasilkan dengan memetakan tingkat awal Kegagalan modul PLTS " *Infant Mortalities*" ketika pertama kali terjadi, kemudian tingkatan berikutnya "kegagalan acak" selama "periode operasi normal," dan akhirnya, tingkat kegagalan "aus" setelah tanggal akhir masa pakainya.

Risiko kegagalan tinggi selama periode commissioning atau periode awal, umumnya diketahui sebagai *infant mortality*. Risiko ini turun dengan sangat cepat selama periode normal operasi, dimana tingkat kegagalan hampir konstan. Namun, pada akhir masa pakai modul PLTS, kemungkinan kegagalan meningkat karena aus. Deteksi dini cacat menggunakan teknik karakterisasi yang akurat dapat meningkatkan umur panel surya, mengurangi pemborosan modul PLTS (Rahman, Khan and Alameh, 2021).



Gambar 9. Typical "Bathtub curve" of PLTS module failure (Rahman, Khan and Alameh, 2021)

## II.3 Parameter Kinerja Modul PLTS

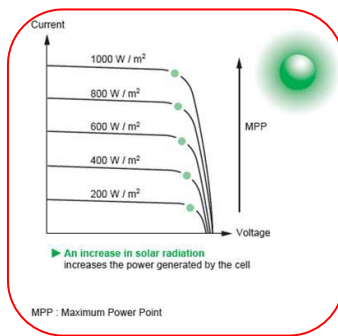
### II.3.1 Radiasi dan temperature modul PLTS

#### A. Radiasi matahari

Modul memanfaatkan cahaya matahari dalam menghasilkan energi, sehingga radiasi matahari dikenal dalam 3 istilah penting yakni: direct, diffuse dan albedo. Direct merupakan pancaran matahari langsung pada hari-hari cerah yang terpapar pada permukaan modul yang intensitasnya bervariasi, sedangkan diffuse merupakan matahari yang tersebar akibat pembelokan dari molekul pada atmosfer seperti uap air dan partikel debu, sedangkan albedo merupakan pantulan cahaya dari permukaan bumi. Jumlah dari ketiga komponen matahari disebut radiasi global (direct + diffuse + albedo).

Daya keluaran panel surya sangat tergantung dari radiasi matahari yang mengenai permukaan panel. Radiasi matahari berpengaruh terhadap nilai arus keluaran panel akibat meningkatnya pergerakan electron sedangkan saat cahaya matahari sampai ke permukaan modul, maka tegangan berada pada rentang nilai Voc, namun berbeda dengan arus yang berubah sesuai kondisi radiasi matahari seperti pada Gambar 10.

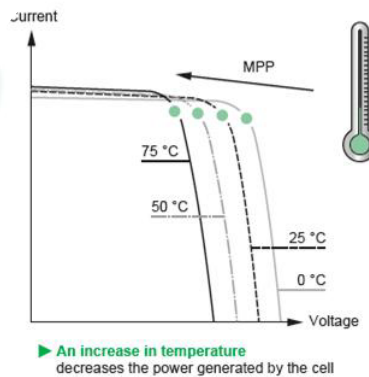




Gambar 10. Pengaruh Perubahan Radiasi Matahari terhadap Arus  
(*Electrical Installation Guide, Schneider, 2018*)

## B. Temperatur

Variasi temperatur suhu sangat berpengaruh terhadap tegangan output dari panel surya (Bonkaney, Madougou and Adamou, 2017). Pada saat permukaan panel surya terpapar matahari, maka seiring waktu menyebabkan peningkatan suhu dan menimbulkan panas pada panel akibat dari tidak semua cahaya matahari dapat dikonversi menjadi listrik. Panas yang ditimbulkan menyebabkan perubahan nilai output tegangan dan arus. Temperatur suhu sangat berpengaruh signifikan terhadap perubahan nilai tegangan output panel PLTS seperti pada Gambar 11.

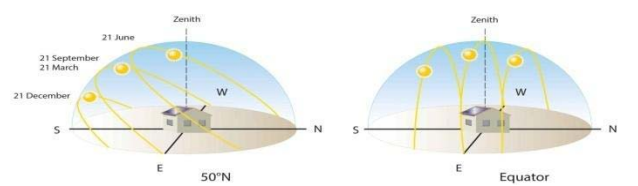


Gambar 11. Pengaruh Perubahan Temperatur terhadap Tegangan  
(*Electrical Installation Guide, Schneider, 2018*)

## C. Orientasi dan kemiringan modul

Sepanjang tahun matahari mengalami perubahan saat terbit hingga terbenam pada lokasi yang berbeda, akibat posisi matahari yang berubah menyebabkan perubahan intensitas radiasi yang terpapar pada panel surya. Oleh sebab itu panel harus diletakkan pada orientasi yang tepat dan kemiringan yang optimal untuk menghasilkan energi yang optimum sepanjang tahun. Orientasi modul sangat tergantung dari garis lintang. Pada belahan utara biasanya

dihadapkan pada sisi selatan dan sebaliknya dengan kemiringan sebesar sudut lintang dikurang  $10^\circ$ . Di belahan bumi utara (kiri) pada garis lintang di atas  $23^\circ$  LU jalur matahari di langit selalu berada di selatan, di musim panas akan tinggi posisinya di langit, dan di musim dingin akan rendah posisinya di langit. Di belahan bumi selatan pada garis lintang di atas  $23^\circ$  LS, posisi matahari selalu berada di utara. Di khatulistiwa dan di antara daerah-daerah tropis, antara  $23^\circ$  LU dan  $23^\circ$  LS, kadang-kadang posisi matahari akan tepat berada di atas pada tengah hari, kadang-kadang di selatan, dan kadang-kadang di utara, tergantung pada waktunya dalam tahun. Indonesia berada disekitar garis khatulistiwa sehingga meskipun posisi modul tegak lurus akan mendapatkan energi yang optimum. Namun dengan pertimbangan kemudahan dalam pemeliharaan, kemiringan modul surya dibuat berkisar  $10^\circ$ - $15^\circ$ . PLTS biasanya dirancang pada bulan dengan tingkat radiasi yang terendah agar produksi dapat tercapai sepanjang tahun.

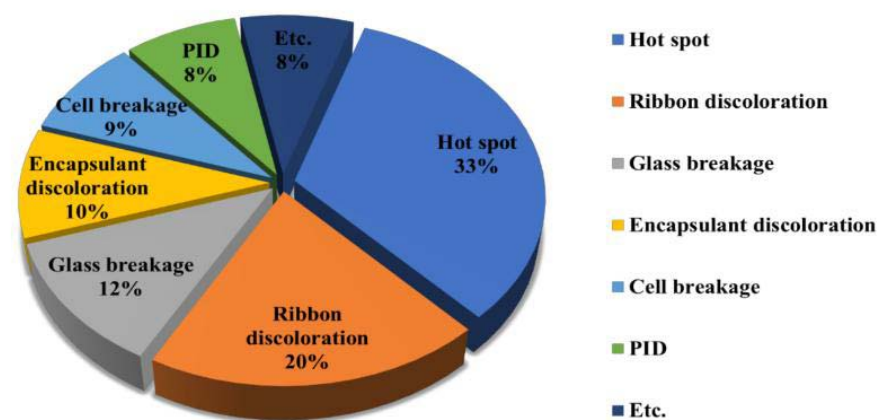


Gambar 12. Posisi Matahari Sepanjang Tahun terhadap Garis Ekuator (GIZ, 2017)

### II.3.2 Degradasi Modul

Secara bertahap kinerja dan keandalan modul surya mengalami degradasi yang disebabkan oleh kondisi lingkungan seperti variasi iklim pada lokasi pemasangan PLTS seperti suhu, durasi sinar matahari, curah hujan, tekanan atmosfer, dan kelembaban relatif (Tripathi, Aruna and Murthy, 2017). Panel PLTS surya biasanya terdegradasi pada tingkat yang lebih cepat dalam beberapa tahun pertama kehidupan mereka. Secara umum, output daya yang dinilai dari panel surya biasanya menurun sekitar  $0.5\%$  / tahun. Modul PLTS film tipis (a-Si, CdTe dan CIGS) terdegradasi lebih cepat daripada modul berbasis kristal Si. Proses degradasi ini mungkin kimia, listrik, termal atau mekanik di alam. Degradasi awal modul PLTS mungkin disebabkan oleh kekurangan desain, bahan berkualitas buruk atau masalah manufaktur. Dalam kebanyakan kasus, kegagalan modul dan kerugian kinerja disebabkan oleh akumulasi kerusakan bertahap yang dihasilkan dari paparan luar ruangan jangka panjang di lingkungan yang keras (Vidyanandan, 2017), (Li *et al.*, 2021), (Hamisu Umar *et al.*, 2021).

Degradasi mengacu pada penurunan kinerja yang stabil. Kinerja modul PLTS akan berkurang sebagai akibat dari berbagai faktor, seperti kelembaban, radiasi, suhu, dan dampak eksternal. Faktor-faktor ini dapat menyebabkan satu atau lebih jenis degradasi, misalnya korosi, perubahan warna, delaminasi, retak, dan kerusakan. Modul fotovoltaik (PLTS) umumnya dianggap sebagai komponen sistem PLTS yang paling andal. Modul PLTS memiliki kemungkinan besar untuk dapat bekerja secara memadai selama 30 tahun dalam kondisi operasi yang khas. Namun, ini membutuhkan waktu 25 tahun sehingga untuk menentukan keandalan modul dilakukan uji tegangan dipercepat yang dilakukan di laboratorium dengan meniru kondisi lapangan yang berbeda untuk memahami kinerja modul PLTS (Aboagye *et al.*, 2021).



Gambar 13. Kerusakan pada modul surya (Kim *et al.*, 2021)

Penelitian degradasi di Ghana menunjukkan bahwa daya keluaran dari berbagai modul teknologi akan menurun dengan tingkat masing-masing setiap tahun. Degradasi yang lebih cepat dari output daya modul adalah disebabkan oleh suhu tinggi yang dialami di Ghana. Suhu tinggi telah mengakibatkan cacat visual tertentu yang diamati pada modul PLTS yang dipelajari khususnya, perubahan warna enkapsulan yang menurunkan transmisi cahaya ke sel PLTS atau meningkatkan resistansi seri yang menurunkan arus hubung singkat dan karenanya menurunkan daya keluaran. Selain itu, akibat peningkatan penyebaran dan permintaan PLTS surya ada kemungkinan beberapa modul PLTS tidak memenuhi standar desain kualifikasi dan sertifikat uji jenis berdasarkan International Electrotechnical Commission (IEC). Degradasi tingkat modul PLTS berbeda dari satu teknologi modul PLTS ke lain karena bahan dan proses pembuatan yang berbeda digunakan untuk modul. Modul PLTS di Ghana telah terdegradasi pada tarif lebih cepat daripada tarif garansi standar yang menandakan bahwa sebagian besar modul PLTS di Ghana tidak mungkin beroperasi untuk 25

tahun garansi. Tingkat degradasi modul yang lebih tinggi menandakan output daya yang lebih sedikit dan masa pakai modul yang lebih pendek (Aboagye *et al.*, 2021).

### II.3.3 Soiling

Pengaruh debu juga berperan penting dalam kinerja modul surya (Rawat and Hod, 2017), Akumulasi debu pada panel PLTS tergantung pada dua parameter yang saling berkaitan seperti lingkungan lokal dan properti debu. Lingkungan setempat mengacu pada kondisi iklim, geografis, lokasi, jenis vegetasi dan aktivitas manusia di lokasi sedangkan sifat debu mewakili ukuran, berat, komponen, dan morfologi partikel debu. Permukaan modul PLTS juga merupakan kontributor utama untuk akumulasi debu di atasnya. Selain itu, kemiringan panel PLTS juga merupakan parameter penting dalam akumulasi debu karena semakin kecil sudut kemiringan, semakin tinggi debu akumulasi. Selain itu, kecepatan angin yang tinggi dapat membersihkan debu meskipun angin lambat dapat memungkinkan akumulasi debu.

Efek akumulasi debu dibahas sebagai berikut:

- Akumulasi debu pada panel PLTS mengurangi arus hubung singkat  $I_{sc}$  dan dapat diabaikan mempengaruhi nilai tegangan rangkaian terbuka  $V_{oc}$
- Peningkatan ketebalan lapisan debu menghasilkan pengurangan PLTS efisiensi panel.
- Akumulasi debu pada permukaan panel PLTS dapat menurunkan modul poli-Si PLTS yang dikemas dengan epoksi pada tingkat yang lebih cepat daripada modul PLTS dengan permukaan kaca.
- Ukuran partikel debu juga memberikan dampak yang signifikan terhadap efisiensi, karena butiran debu ukuran besar menghasilkan kerugian yang cukup besar pada efisiensi.
- Kotoran dapat membuat tambalan tanah yang menghasilkan naungan sebagian dari modul PLTS-nya. Ini memblokir beberapa sel modul PLTS dan mempengaruhi daya keluaran (Kumar and Kumar, 2017).



Gambar 14. Faktor yang mempengaruhi kondisi debu (Jamil *et al.*, 2017)

Soiling dapat menyebabkan lebih dari 1% kehilangan daya per hari dan merupakan fenomena spesifik lokasi, sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim setempat. Jenis kontaminasi yang dominan dapat berubah secara signifikan tergantung pada lokasi, deposit debu mineral, kotoran burung, biofilm bakteri, alga, lumut kerak, lumut, atau jamur, sisa tanaman atau serbuk sari, knalpot mesin atau emisi industri, dan emisi pertanian seperti debu umpan. Untuk modul PLTS, pengotoran pada kaca depan terutama mengakibatkan kerugian optik karena penyerapan cahaya atau hamburan ke belakang, tergantung pada area yang dinaungi oleh partikel pengotor dan juga pada komposisi debu dan distribusi ukuran partikel.

Konsentrasi debu di udara dianggap sebagai penentu utama pengotoran, bersama dengan frekuensi hujan, karena hujan cukup efektif membersihkan permukaan tanah jika cukup melimpah. Kecepatan angin juga merupakan parameter penting, karena mempengaruhi mekanisme deposisi partikel dan menilai keseimbangan antara deposisi dan resuspensi. Sudut kemiringan modul PLTS harus dipertimbangkan karena tingkat kekotoran lebih besar pada permukaan yang lebih datar. Kelembaban relatif dan embun sangat meningkatkan daya rekat debu ke permukaan melalui gaya kapiler, caking partikel, dan semen aci.

Dalam kasus pembersihan yang tidak dilakukan, lapisan debu yang disemen, lumut, dan jamur praktis tidak dapat dihilangkan, sedangkan pembersihan yang keras dapat menyebabkan goresan atau abrasi pada pelapis anti-reflektif (ARC) atau korosi kaca. Selain itu, beban mekanis selama pembersihan atau kejutan termal ketika elemen panas dibersihkan dengan air dingin dapat menyebabkan kerusakan sel surya dan kaca atau perluasan retakan mikro. Lebih lanjut, potensi degradasi yang diinduksi (PID) di PLTS dapat ditingkatkan dengan pengotoran, dan naungan parsial karena pengotoran yang tidak seragam dapat menyebabkan pembentukan hot spot. Saat ini, pembersihan adalah yang paling canggih untuk mengatasi kekotoran. Keekonomian pembersihan juga menentukan kelayakan ekonomi dari teknologi mitigasi lainnya. Oleh karena itu, kelayakan tekno-ekonomi dari teknologi potensial diselidiki berdasarkan evaluasi efisiensinya dalam pengurangan kehilangan kekotoran dan biaya potensial (Ilse *et al.*, 2019).

Variasi kondisi iklim dari satu lokasi ke lokasi lainnya di seluruh dunia memiliki efek yang sesuai pada kinerja modul PLTS di berbagai daerah (Kim *et al.*, 2021). Parameter yang dapat mempengaruhi kinerja modul PLTS meliputi radiasi matahari, kecepatan angin, curah hujan, suhu, kelembaban dan kemungkinan kehadiran debu. Sub bagian berikut merangkum efek dari masing-masing kondisi ini pada kinerja modul PLTS:

### 2.1. Pengaruh kecepatan angin

Kecepatan angin dapat memiliki efek positif dan negatif pada kinerja modul PLTS. Dampak kecepatan angin pada kinerja modul PLTS terutama merupakan fungsi dari kecepatan dan arah angin, struktur permukaan modul PLTS, dan deposisi debu. Di lingkungan luar, kecepatan angin, suhu lingkungan, struktur permukaan, dan penyinaran matahari mempengaruhi suhu modul.

#### 2.1.1. Dampak deposisi debu

Angin meniup partikel debu dari permukaan modul PLTS, yang dapat mengurangi deposisi debu. Di Mesir, diamati, penurunan tingkat deposisi debu terjadi pada modul pada sudut kemiringan tertentu karena angin bertiup setelah 2 minggu terpapar kondisi cuaca [7]. Kinerja modul PLTS berkurang karena jumlah akumulasi debu pada permukaan yang menutupi panel PLTS sehingga menghalangi radiasi matahari terjadi pada berbagai kondisi geografis dan jenis teknologi modul (Tanesab *et al.*, 2016), (Javed, Guo and Figgis, 2017).

Soiling Loss Index (SLI) didefinisikan sebagai kehilangan yang disebabkan oleh kekotoran di radiasi yang mencapai sel PLTS di dalam modul PLTS. Kehilangan ini merupakan kerugian besar karena hilangnya sifat transmitansi kaca depan modul PLTS

karena kotor, jika semua faktor pengoperasian lainnya tetap sama. SLI menggunakan radiasi yang efektif dari modul PLTS yang bersih, atau referensi, dan modul PLTS yang kotor, atau uji, sebagai ditunjukkan pada Gambar. 1 untuk mengukur persentase SLI. Nilai-nilai tersebut didasarkan pada model matematika ideal untuk hari matahari serta sel surya yang ideal model, yang menangkap pengurangan arus karena kekotoran. Dengan demikian, SLI didefinisikan menggunakan persamaan berikut (Al-Addous *et al.*, 2019):

$$SLI = \frac{G_{eff,Dirty} - G_{eff,Clean}}{G_{eff,Clean}} \cdot 100\% \dots\dots\dots (1)$$

Deposisi debu pada permukaan modul PLTS sangat mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan. Sistem PLTS terutama yang dipasang di daerah gurun sangat terdampak pengaruh debu. Di sisi lain, negara-negara yang memiliki daerah gurun sangat tepat untuk memasang sistem PLTS karena radiasi matahari yang lebih tinggi daripada tempat lain di dunia. Baru-baru ini gagasan untuk memasang pembangkit listrik tenaga surya besar di daerah gurun dan mengeksport energi yang dihasilkan ke negara lain diperdebatkan oleh komunitas ilmiah. Namun seperti diketahui, badai sangat sering terjadi di wilayah tersebut. Hal ini diperlukan untuk membersihkan permukaan modul setelah badai untuk meningkatkan daya keluaran PLTS. Akumulasi debu pada permukaan modul PLTS secara eksponensial mengurangi area efektif untuk transmisi foton insiden dari sinar matahari. Pada penampilan pertama, partikel debu saling berjauhan. Partikel-partikel ini menempel pada kaca modul secara linier. Jika partikel-partikel ini tidak dibersihkan, partikel berikutnya akan terakumulasi di permukaan dan setelah beberapa waktu distribusi partikel di permukaan akan berubah dan distribusi non-linier dari partikel berikutnya akan terjadi karena massa kluster debu dan angin. Beberapa penelitian menyarankan agar meningkatkan sudut kemiringan modul untuk memudahkan pembersihan kaca secara alami dengan bantuan curah hujan dan angin. Namun dengan cara ini, kemiringan optimal akan berubah. Oleh karena itu, penting untuk menemukan sudut kemiringan yang terbaik untuk sistem yang diatur ulang (Ekici, Gurbuz and Bektaş Ekici, 2017).

#### II.3.4 Shading

Kesalahan shading memaksakan tantangan berikut dalam sistem PLTS 1) Kehilangan daya tambahan tetap ada selama arus mengalir melalui dioda bypass, 2) Meskipun dioda bypass, termografi inframerah telah menunjukkan bahwa bintik-bintik lokal masih bisa ada di panel yang diarsir karena efek longsor salju, 3) Menyediakan dioda bypass untuk setiap modul

sangat mahal dan membuat struktur sistem lebih kompleks dan 4) Naungan parsial permanen karena akumulasi debu dan kotoran burung dapat menyebabkan degradasi panel, jika tetap tidak terdeteksi untuk waktu yang lama waktu (Pillai and Rajasekar, 2018)

Efek potensial telah difokuskan pada fundamental tujuan analisis ini, yang meliputi: (i) keamanan kelistrikan pasokan (keluaran energi), (ii) kerusakan teknis dan (iii) manusia keamanan. Angka prioritas risiko menunjukkan tiga kontributor utama Keandalan sistem PLTS: pertama-tama inverter, dan pentanahan/ sistem proteksi petir; di posisi kedua modul, dimaksudkan sebagai komponen aktif, seperti sel dan kontak (Colli, 2015).

## **II.4 Pola Pemeliharaan Modul PLTS**

### **II.4.1 Pemeliharaan Preventive**

Pemeliharaan Preventive adalah elemen inti dari layanan pemeliharaan untuk pembangkit listrik PLTS. Ini terdiri dari inspeksi visual dan fisik secara berkala, serta verifikasi bahwa semua komponen utama pembangkit listrik tenaga surya dalam keadaan baik untuk beroperasi. Pemeliharaan ini dilakukan pada interval reguler yang telah ditentukan sesuai dengan OEM & manual O&M dan termasuk dalam “Rencana Pemeliharaan Tahunan”.

### **II.4.2 Pemeliharaan korektif**

Pemeliharaan Korektif sesuai dengan aktivitas apa pun yang dilakukan untuk memulihkan sistem, peralatan, atau komponen pembangkit listrik PLTS ke status berfungsi, dan terjadi setelah deteksi kegagalan dengan pemantauan jarak jauh atau selama on-site inspeksi. Pemeliharaan korektif termasuk diagnosis kesalahan, perbaikan sementara & perbaikan dan dapat dibagi menjadi: 3 tingkat intervensi: Intervensi tanpa kebutuhan penggantian, dengan kebutuhan penggantian dan dengan perlu campur tangan pada perangkat lunak.

### **II.4.3 Pemeliharaan prediktif**

Pemeliharaan Prediktif adalah intervensi berbasis kondisi yang dilakukan mengikuti perkiraan yang berasal dari analisis dan evaluasi parameter signifikan dari degradasi item. PLTS harus memiliki peralatan "cerdas" dan sistem perangkat lunak pemantauan yang sesuai, memungkinkan tim operasi pemantauan untuk bekerja secara teratur, pengawasan, perkiraan, dan analisis data kinerja peralatan utama pembangkit listrik tenaga surya (transformator,

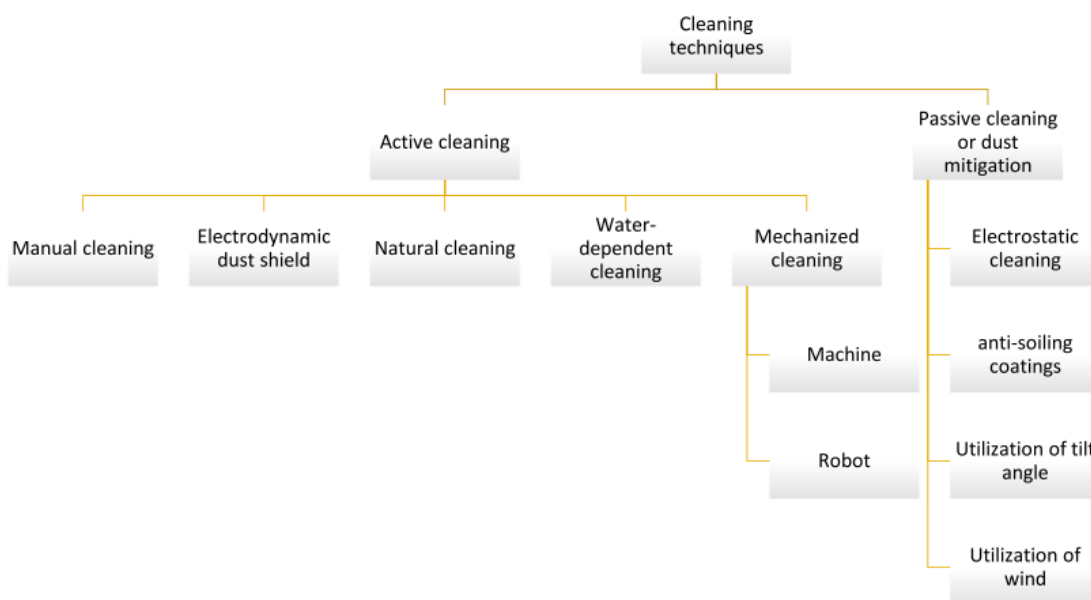


inverter, kotak combiner dan/atau rangkaian DC).

Persyaratan pembersihan (pendekatan dan frekuensi pembersihan) sangat bergantung pada lokasi dan sistem dan memerlukan keputusan individu untuk setiap lokasi sistem PLTS.

Faktor-faktor yang mempengaruhi yang paling penting adalah:

- Iklim: hujan, kelembaban relatif, embun, angin dan suhu
- Soiling: jumlah dan jenis, komposisi dan ukuran partikel pasir, adanya polusi antropogenik atau pertanian
- Sistem PLTS: konfigurasi, tata letak, struktur pemasangan, kondisi dan ukuran tanah



Gambar 15 Teknik Pembersihan Modul PLTS (Younis and Onsa, 2022)

Pembersihan secara eksternal melibatkan pembersihan manual atau penggunaan sumber daya alam di luar modul PLTS untuk menghilangkan debu. Sumber daya ini termasuk curah hujan dan angin. Pembersihan manual bisa kering atau basah. Pembersihan manual kering meliputi penggunaan sikat, pakaian, udara bertekanan, dan penyedot debu. Basah pembersihan manual melibatkan penggunaan air PDAM, pemurni air pribadi, dll. Pembersihan manual kering dan basah dapat dilakukan secara otomatis. Sumber daya alam untuk pembersihan meliputi curah hujan dan angin. Pembersihan tidak dikenai biaya, tetapi tergantung pada kondisi cuaca(Chiteka *et al.*, 2020).

#### Hujan

Hujan diandalkan sebagai metode pembersihan di daerah yang sering dan memiliki curah hujan melimpah. Curah hujan yang sering dan melimpah menyediakan air yang cukup dan memungkinkan pembersihan yang efektif terjadi pada setiap kejadian hujan. Setiap jumlah

curah hujan yang melebihi 4-5 mm telah ditemukan cukup untuk membersihkan panel surya. Namun ini dapat bervariasi dari satu lokasi ke lokasi lainnya dan tergantung pada ukuran partikel debu. Curah hujan menyapu debu dari permukaan panel surya sehingga menghasilkan peningkatan atau pemulihan transmitansi, output daya dan efisiensi.

Pemulihan sebagian dikaitkan dengan ketidakmampuan air hujan untuk menghilangkan partikel debu yang cenderung menempel pada permukaan panel surya. Sebuah studi yang dilakukan di bagian timur Saudi Arabia menunjukkan bahwa meskipun hujan turun pada sampel yang terpapar dan menghilangkan endapan debu, output daya sistem PV tidak sepenuhnya pulih setelah pembersihan tersebut. Pemulihan sebagian disebabkan oleh ketidakmampuan air hujan untuk menghilangkan partikel debu kecil. Debu kecil partikel cenderung menempel pada permukaan panel surya membuat pembersihan menjadi sulit kecuali ada gaya terapan.

Sementara curah hujan dapat menghilangkan debu dan menyebabkan pemulihan kinerja, itu juga dapat berkontribusi untuk memperburuk kinerja panel surya. Ini lebih terjadi di daerah yang berdebu tapi memiliki curah hujan yang sedikit. Oleh karena itu, jumlah curah hujan dan debu yang diendapkan pada panel surya menentukan seberapa banyak pembersihan yang akan dilakukan atau seberapa efektifnya. Saat panel surya dimiringkan, pembersihan dengan hujan menjadi lebih bermanfaat untuk sudut kemiringan yang lebih tinggi karena memungkinkan air jatuh karena gravitasi, membawa debu bersamanya.

#### Angin

Angin dapat bertindak sebagai agen pembersih alami. Kecepatan angin yang tinggi membantu membawa partikel debu berukuran besar. Angin juga membantu mengeringkan kelembapan yang terbentuk di permukaan PV sehingga membuat debu partikel kurang lengket ke permukaan PV. Selain itu, efek pembersihan angin telah ditemukan agar lebih efektif pada saat ketinggian pemasangan panel surya dari permukaan tanah meningkat.

Namun, pembersihan dengan angin tidak efektif untuk partikel debu yang lebih kecil dari 50 $\mu$ m karena cenderung menempel pada permukaan sehingga menahan pemindahan oleh angin. Angin juga tidak terlalu bisa diandalkan tergantung pada kondisi cuaca

#### Pembersihan manual kering

Pembersihan kering mencakup penggunaan sikat kering, kain, penyedot debu, dan udara bertekanan untuk membersihkan debu dari panel surya. Ini banyak digunakan di daerah di mana air tidak dapat diakses sehingga pembersihan manual kering lebih murah dan ramah lingkungan karena tidak menggunakan air. Menggunakan sikat kering untuk membersihkan

panel surya berdebu memang meningkatkan efisiensi panel surya, hanya saja tidak ke tingkat aslinya. Salah satu tantangan utama yang dihadapi produksi energi surya yang efisien di daerah kering di mana insolasi matahari berada pada tingkat tertinggi, tetapi di mana tantangan signifikan dari debu yang meresap, badai pasir, dan hujan yang tidak mencukupi dapat secara dramatis mengubah kelayakan panen energi matahari. Penelitian menunjukkan bahwa pembersihan kering menggunakan sikat Nylon tidak memiliki efek permanen yang signifikan pada karakteristik optik permukaan kaca, bahkan ketika sikat digunakan untuk membersihkan permukaan yang berdebu (Al Shehri *et al.*, 2016). Wiper kain berbahan dasar mikrofiber juga terbukti sangat efektif dalam membersihkan ruangan dari segi keefektifan, biaya pembersihan dan waktu yang dibutuhkan untuk membersihkan, serta bila dikombinasikan dengan penyedot debu (Al-Housani, Bicer and Koç, 2019).

Udara terkompresi telah digunakan untuk meniup partikel debu dari permukaan PV menggunakan arus udara dari kipas AC untuk meniup panel surya sehingga menghilangkan debu dan panas. Mungkin ada masalah dengan debu tersebar selama proses pembersihan, terutama di daerah yang sangat berdebu. Mungkin penggunaan pengisap debu dapat mengurangi penyebaran debu. Dry cleaning berfungsi untuk panel surya yang berdebu. Namun demikian tidak menghilangkan semua partikel debu; yang kecil cenderung menempel di permukaan saat dibersihkan. Penggunaan air bersama dengan menyikat dianjurkan. Saat udara terkompresi dan mekanisme hembusan lainnya digunakan untuk membersihkan, mereka dapat menghasilkan debu tersuspensi yang signifikan di udara. Oleh karena itu, pembersihan kering adalah tidak cocok untuk pembangkit listrik PV skala besar, dan untuk digunakan di daerah yang sangat berdebu.

#### Penggunaan air

Pembersihan menggunakan air melibatkan penggunaan air dari PDAM, sumur bor dan unit penyimpanan air lainnya, dengan atau tanpa surfaktan. Air dapat digunakan apa adanya atau diolah melalui destilasi, de-ionisasi dan reverse osmosis sebelum digunakan untuk membersihkan. Pengolahan air bertujuan untuk menghilangkan kotoran dari air yang dapat menyebabkan bercak dan goresan pada kaca permukaan. Air yang kaya dengan kandungan mineral yang tinggi juga dapat meninggalkan endapan pada panel surya; oleh karena itu dianjurkan menggunakan air dengan kandungan mineral rendah. Karena panel surya terkena lingkungan eksternal, suhu air yang digunakan dalam pembersihan ikut berperan. Air dingin atau panas dapat menyebabkan perbedaan suhu mendadak yang menyebabkan retakan pada panel surya. Pembersihan di pagi hari dengan air suhu lingkungan telah direkomendasikan.

Pembersihan menggunakan air juga dapat dilakukan dengan air bertekanan atau tidak bertekanan, dengan atau tanpa surfaktan. Penggunaan air bertekanan efektif, tetapi sikat pembersih harus digunakan untuk menghilangkan partikel lengket. Tekanan air harus dijaga di bawah 4MPa (40 bar). Sistem air bertekanan juga akan mengakibatkan peningkatan biaya operasional karena memerlukan pompa bertekanan tinggi dan daya untuk menggerakkan air. Air bertekanan yang jatuh pada panel surya juga memercik dan dapat menyebabkan pemborosan pada jangka panjang (Chanchangi *et al.*, 2020).

Studi telah dilakukan pada penggunaan surfaktan dalam membersihkan panel surya. Surfaktan adalah beberapa senyawa yang membentuk deterjen. Kata ini berasal dari kata *surface active agent*. Surfaktan biasanya digunakan untuk menghilangkan kotoran dari barang-barang rumah tangga. Surfaktan dapat berupa anionik, kationik atau zwitterionik. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa surfaktan memberi lebih baik pembersihan daripada ketika hanya air yang digunakan, dengan demikian melestarikan atau meningkatkan kinerja panel surya (Simiyu, 2020).

Proses pembersihan adalah bagian dari biaya operasi dan pemeliharaan yang dibutuhkan oleh sistem PLTS. Jadi, frekuensi pembersihan harus dipilih dengan hati-hati untuk menghindari kerugian ekonomi dari sistem. Biaya pembersihan mencakup banyak hal, seperti biaya air, biaya tenaga kerja, dan biaya bahan bakar jika menggunakan mesin bergerak dalam proses pembersihan (Azouzoute *et al.*, 2021).