

BAB II

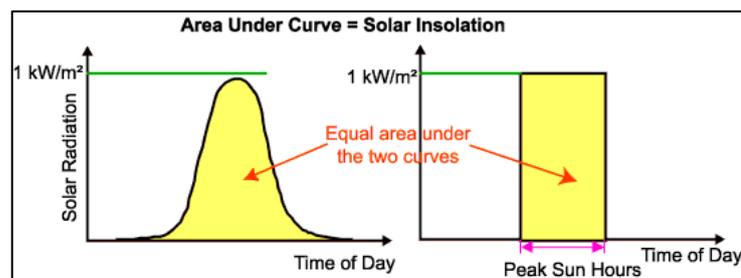
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kinerja PLTS

2.1.1. Energi matahari

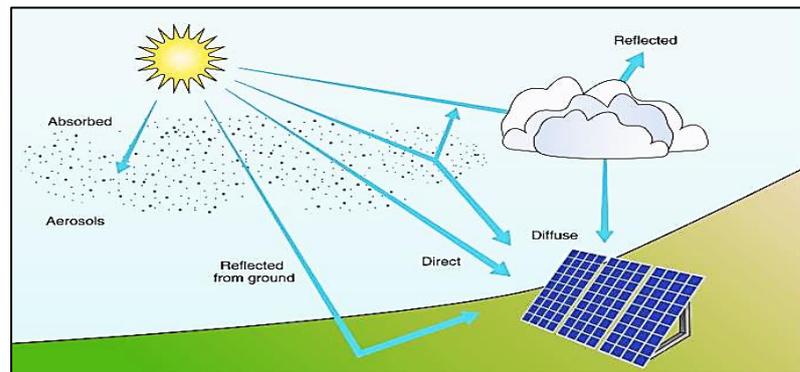
Eksplorasi Energi matahari dinyatakan dalam bentuk *Solar Irradiance* (Honsberg & Bowden, 2019), yaitu sebagai berikut:

- Daya sesaat sinar matahari pada permukaan didefinisikan : W/m^2
- Energi matahari yang diterima selama periode waktu tertentu pada permukaan didefinisikan:
 - kWh / (m^2 hari) atau kWh / (m^2 tahun)
 - bisa juga dinyatakan sebagai hari jam matahari puncak (contoh: 4 kWh / m^2 hari)
- *Peak Sun Hours* (PSH) mengacu pada insolation matahari pada lokasi tertentu akan diterima jika matahari bersinar pada nilai maksimum dari $1 kW/m^2$ untuk sejumlah jam seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.1 (Honsberg & Bowden, 2019).



Gambar 2.1. Peak sun hours (Honsberg & Bowden, 2019)

Total radiasi energi matahari (*Global Horizontal Irradiance*) diperoleh dari penjumlahan *Direct Radiation* dan *Difusse Radiation*. *Direct Radiation* adalah radiasi energi matahari yang diterima langsung oleh suatu benda, sedangkan *Difusse Radiation* adalah radiasi energi matahari yang diterima setelah melalui beberapa pembiasan dari atmosfer di lingkungan sekitar (Ouiqary, et al., 2021). Secara gambaran umum proses radiasi energi matahari dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Radiasi energi matahari sampai ke bumi (Ouiqary, et al., 2021)

Data atau informasi mengenai potensi energi matahari di suatu daerah akan menentukan perencanaan sistem PLTS PV (*Photovoltaic*). Daerah dengan potensi energi matahari yang besar akan memberikan peluang pengembangan sistem dengan output yang lebih besar dibanding daerah dengan potensinya kecil.

2.1.2. Sistem PLTS

PLTS PV (*Photovoltaic*) adalah pembangkit listrik yang menggunakan radiasi sinar matahari sebagai sumber energi dengan menggunakan sel atau modul *Photovoltaic* (Lin, et al., 2015). Pemanfaatan energi matahari memberikan peluang pengembangan sistem kelistrikan untuk daerah-daerah isolated di mana sumber energi lain sulit tersedia.

Listrik dibangkitkan oleh modul surya dalam bentuk listrik DC. Inverter mengkonversi listrik DC tersebut menjadi listrik AC. Sistem bisa dikonfigurasi melalui beberapa cara, termasuk untuk kebutuhan dan sumber daya yang tersedia, bahkan bisa membangkitkan jaringannya sendiri (Lin, et al., 2015).

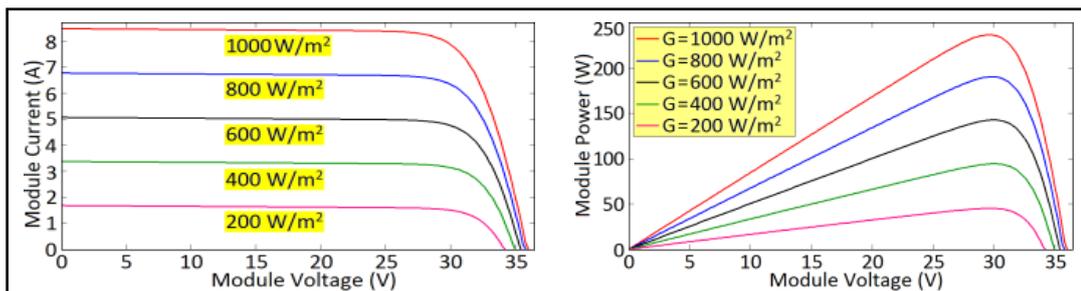
2.1.3. Karakteristik PLTS

Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS PV tergantung dari beberapa faktor sebagai berikut:

a. Tingkat Radiasi Matahari

Lamanya penyinaran sangat tergantung pada orientasi permukaan modul surya terhadap matahari serta penggunaan sistem *tracking* pada penyangga modul surya. Tingkat radiasi matahari juga tergantung dari lokasi PLTS dan besarnya sudut kemiringan modul surya yang dipasang (Vidyanandan, 2017).

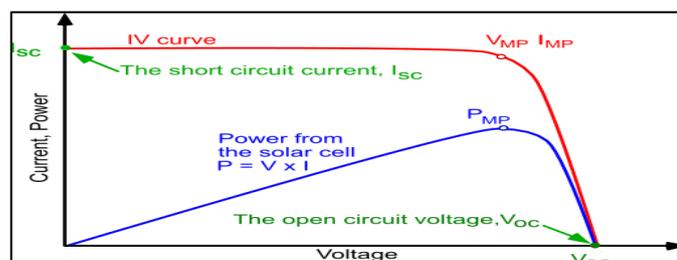
Semakin besar intensitas cahaya matahari secara proposional akan menghasilkan arus yang besar seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.3 (Vidyanandan, 2017). Tingkatan cahaya matahari menurun, bentuk dari kurva I-V menunjukkan hal yang sama, tetapi bergerak ke bawah yang mengindikasikan menurunnya arus dan daya. Tegangan (V) tidak berubah oleh bermacam-macam intensitas cahaya matahari.



Gambar 2.3. Tingkat radiasi matahari (Vidyanandan, 2017)

Perbedaan utama dari modul sel surya adalah bahan produksi dari modul sel surya. Bahan modul sel surya yang paling umum adalah *crystalline silicon*. Bahan *crystalline* dapat terdiri dari *single crystal*, *mono or single-crystalline*, dan *poly* atau *multi-crystalline* (Bansal, et al., 2021). Selain itu, modul sel surya ada yang terbuat dari lapisan tipis *amorphous silicon*. Sel *crystalline silicon* memiliki 2 (dua) tipe yang hampir serupa, meskipun *single crystalline cell* lebih efisien dibandingkan dengan *poly-crystalline* karena *poly-crystalline* merupakan ikatan antara sel-sel. Keunggulan dari *amorphous silicon* adalah harga yang terjangkau tetapi kurang efisien seperti *crystalline silicon solar cell* (Bansal, et al., 2021).

Karakteristik output dari modul sel surya dapat dilihat dari kurva kinerja, disebut Kurva I-V yang menunjukkan hubungan antara arus dan tegangan seperti pada Gambar 2.4 (Honsberg & Bowden, 2019).



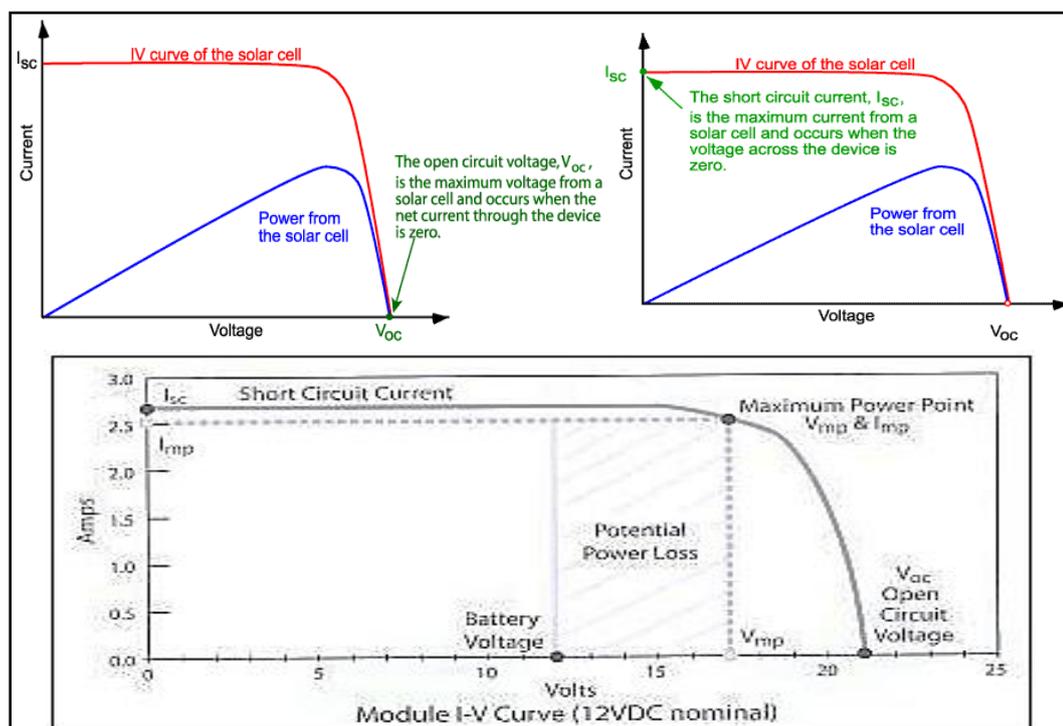
Gambar 2.4. Kurva I-V (Honsberg & Bowden, 2019)

Gambar 2.4 menunjukkan tipikal Kurva I-V. Tegangan (V) adalah sumbu horizontal. Arus (I) adalah sumbu vertikal. Kurva I-V diberikan dalam *Standard Test Conditions* (STC) 1000 watt per meter persegi radiasi (atau disebut satu matahari puncak/*one peak sun hour*) dan 25°C suhu panel *solar cell* (Honsberg & Bowden, 2019). STC mewakili kondisi optimal dalam lingkungan laboratorium. Kurva I-V terdiri dari 3 hal, yaitu:

- Maximum Power Point* (V_{mpp} dan I_{mpp})
- Open Circuit Voltage* (V_{oc})
- Short Circuit Current* (I_{sc})

Maximum Power Point (V_{mpp} & I_{mpp})

Maximum Power Point (V_{mpp} dan I_{mpp}) seperti pada Gambar 2.5 adalah titik operasi yaitu keluaran maksimum yang dihasilkan oleh modul sel surya saat kondisi operasional. V_{mpp} dan I_{mpp} dapat diukur pada saat modul sel surya diberi beban pada 25°C dan radiasi 1000 watt per m². Output berkurang sebagaimana tegangan menurun. Arus dan daya output modul sel surya menurun sebagaimana tegangan meningkat melebihi *Maximum Power Point* (Honsberg & Bowden, 2019).



Gambar 2.5. *Maximum power point* (Honsberg & Bowden, 2019)

Open Circuit Voltage (V_{oc})

Open Circuit Voltage (V_{oc}) pada Gambar 2.5 adalah kapasitas tegangan maksimum yang dapat dicapai pada saat tidak adanya arus (Honsberg & Bowden, 2019). Kurva I-V pada Gambar 2.5, V_{oc} adalah 21 Volt. Daya pada saat V_{oc} adalah 0 Watt. V_{oc} modul sel surya dapat diukur dalam berbagai macam keadaan. Saat membeli modul, sangat direkomendasikan untuk menguji tegangan untuk mengetahui apakah sesuai dengan spesifikasi pabrik. Saat menguji tegangan dengan multimeter digital dari terminal positif ke terminal negatif, V_{oc} dapat diukur pada pagi hari dan sore hari.

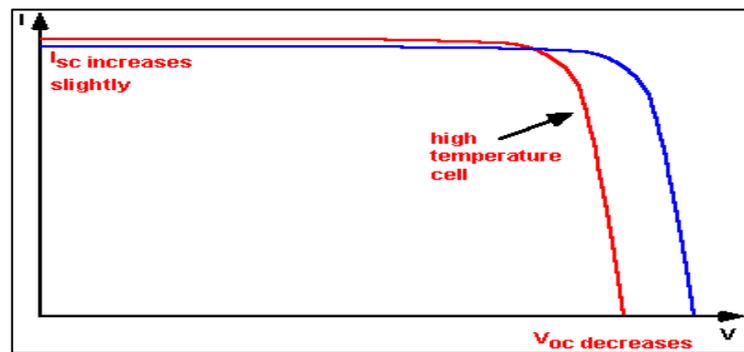
Short Circuit Current (I_{sc})

Short Circuit Current (I_{sc}) pada Gambar 2.5 adalah output maksimum arus dari modul sel surya yang dapat dikeluarkan di bawah kondisi dengan tidak ada resistansi atau *short circuit* (Honsberg & Bowden, 2019). Pada Kurva I-V di atas menunjukkan perkiraan arus 2,65 A. Daya pada I_{sc} adalah 0 Watt. I_{sc} dapat diukur hanya pada saat membuat koneksi langsung terminal positif dan negatif dari modul sel surya.

b. Temperatur Operasi

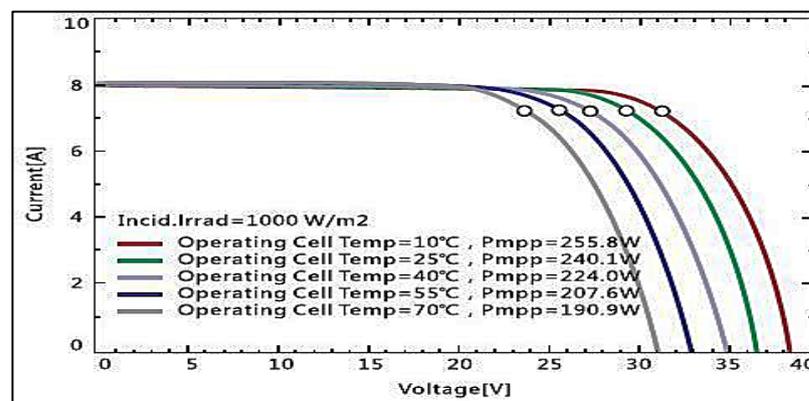
Sebagaimana suhu modul sel surya meningkat di atas standar suhu normal 25°C , efisiensi modul sel surya dan tegangan akan berkurang (Honsberg & Bowden, 2019). Gambar 2.6 menggambarkan bagaimana suhu sel meningkat di atas 25°C (suhu modul sel surya, bukan suhu udara), bentuk Kurva I-V tetap sama, tetapi bergeser ke kiri sesuai dengan kenaikan suhu modul sel surya, menghasilkan tegangan dan daya yang lebih kecil. Panas dalam kasus ini, adalah hambatan listrik untuk aliran elektron.

Aliran udara pada sekitar modul sel surya sangat penting untuk mengurangi panas yang menyebabkan suhu modul sel surya tinggi.



Gambar 2.6. Temperatur operasi (Honsberg & Bowden, 2019)

Temperatur operasi mempengaruhi jumlah produksi energi listrik dari PLTS menjadi turun. Hal ini tergantung dari desain modul surya, kecepatan angin, cara pemasangan dan temperatur udara sekitar. Kinerja sel surya dipengaruhi oleh temperatur sel surya pada saat beroperasi (Zulkifli, et al., 2020). Gambar 2.7 menunjukkan Kurva I-V suatu sel surya yang beroperasi dengan temperatur yang berbeda.



Gambar 2.7. Kurva I-V pada temperatur yang berbeda (Zulkifli, et al., 2020)

Hal-hal yang mempengaruhi temperatur sel surya (Zulkifli, et al., 2020), yaitu:

- Temperatur udara atmosfer sekitar sistem sel surya.
- Tata letak/konfigurasi sistem sel surya.
- Kecepatan dan arah angin di lokasi sistem sel surya.

2.1.4. Analisis kinerja PLTS

Faktor penting yang mempengaruhi keluaran Modul Surya, yaitu:

- a. Perubahan Radiasi Matahari

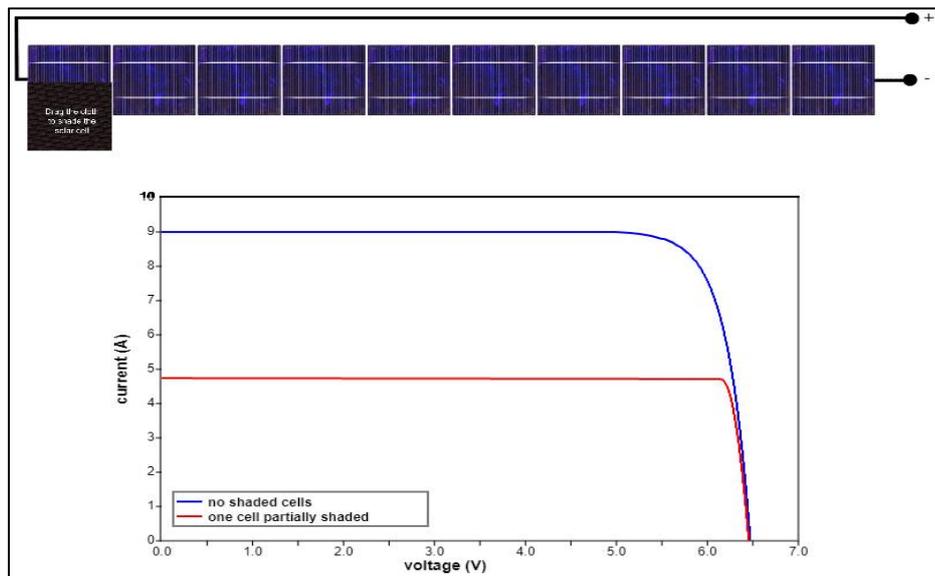
Perubahan tingkat radiasi matahari pada permukaan Modul Surya dapat mempengaruhi keluaran daya PV (Vidyanandan, 2017) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.

b. Perubahan Suhu Modul Surya

Perubahan suhu Modul Surya dapat mempengaruhi keluaran daya Modul Surya (Zulkifli, et al., 2020) seperti yang disajikan pada Gambar 2.7.

c. Faktor *Shading* pada Modul Surya

Shading atau bayangan pada Modul Surya sangat mempengaruhi keluaran daya dari PLTS PV seperti pada Gambar 2.8. *Shading* berpengaruh pada penurunan tegangan dan penurunan yang signifikan pada arus sehingga dayanya juga turun secara signifikan (Honsberg & Bowden, 2019).



Gambar 2.8. Dampak *shading* (Honsberg & Bowden, 2019)

Shading yang terjadi pada satu sel surya akan menurunkan output tegangan dari sel tersebut, dan akan menurunkan daya keseluruhan dari sistem (Honsberg & Bowden, 2019). Maka dari itu *shading* harus sangat dihindari dalam mendesain sistem PLTS. *Shading* bisa dihindari dengan memperhitungkan bayangan dari obyek di sekitar sistem yang tidak dapat dihilangkan pada titik matahari paling ekstrim (paling timur, paling barat, paling utara, dan paling selatan). Selain itu, salah satu hal yang diperlukan dalam menyusun konfigurasi modul surya adalah *self shading*.

2.1.5. Produksi energi PLTS

Hasil produksi listrik (kWh) adalah output utama yang dihasilkan oleh PLTS. Cara menilai aspek produksi adalah dibutuhkan variabel yang relatif bisa dikomparasi antara PLTS satu dengan yang lainnya. Variabel yang digunakan untuk mengukur produksi dalam pembangkitan listrik adalah *Capacity Factor* (CF) (Martín-Martínez, et al., 2019).

Performance Ratio (PR) dengan satuan persen (%) sering digunakan untuk menilai perbandingan kapasitas produksi energi listrik pada PLTS. PR sama dengan CF, namun yang digunakan sebagai pembagi bukan 24 jam sehari, melainkan *Peak Sun Hour* (PSH) dalam satu hari (Necaibia, et al., 2018).

PR adalah parameter yang menggambarkan kinerja dari PLTS seperti yang disajikan pada Tabel 2.1. Nilai PR yang rendah menunjukkan *losses* keseluruhan yang tinggi yang bisa disebabkan karena suhu modul tinggi, radiasi matahari yang tidak sepenuhnya terserap, pengotoran modul, kegagalan komponen, serta ketidaksesuaian keluaran modul (Martín-Martínez, et al., 2019). Sebuah nilai referensi yg umum digunakan, yaitu PR: 75% - 80% pada PLTS *On Grid* dan 60% - 70% pada PLTS *Off Grid*. Persamaan (2.1) memberikan cara yang cepat dan sederhana untuk memperkirakan produksi energi (*Energy Yield*) PLTS selama periode tertentu.

$$Y_f = PSH * W_{p_{PV}} * PR \dots\dots\dots(2.1)$$

Tabel 2.1. Parameter evaluasi kinerja PLTS (Wirawan, et al., 2014)

Parameter	Simbol	Unit
<i>Final energy yield of PV plant over a period of time (e.g. over one year)</i>	Y_f	kWh/time (kWh/year)
<i>Peak Sun Hours incident on the PV modules over the same period of time</i>	PSH	(hours/year, PSH/year)
<i>Peak nominal power of the PV plant</i>	$W_{p_{PV}}$	kW_p
<i>Performance Ratio of the PV plant</i>	PR	%, normally between 0.65 and 0.85

PR dihitung sesuai Persamaan (2.2), yaitu membandingkan energi aktual yang dihasilkan selama periode tertentu (*Final Energy Yield*, Y_f) dengan energi yang tersedia secara teoritis yang dihitung dengan nilai output nominal dari PV Array (*Reference Yield*, Y_r) dan *Peak Sun Hours* yang tersedia di lokasi PLTS

(Martín-Martínez, et al., 2019).

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \dots\dots\dots (2.2)$$

Yr pada Persamaan (2.3) adalah energi yang tersedia secara teoritis karena mendefinisikan sumber radiasi matahari untuk sistem PLTS.

$$Y_r = H \cdot A \cdot \eta_{Module} \dots\dots\dots (2.3)$$

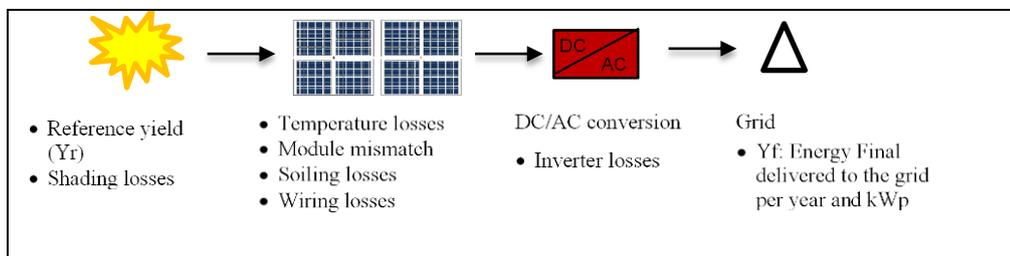
Di mana:

- H : Irradiation selama waktu tertentu, per tahun [kWh/m²]
- A : luasan aktif modul [m²]
- ηModule : Efisiensi Modul Surya [%]

Sebagai alternatif , Yr dapat dihitung sesuai Persamaan (2.4), yaitu dengan *Peak Sun Hours* (PSH) dan nilai daya dari PV Array :

$$Y_r = PSH \cdot P_{peak} \dots\dots\dots (2.4)$$

Evaluasi kinerja PLTS secara menyeluruh melalui pendekatan *Root Causes Analysis* dapat dilakukan sesuai uraian pada Gambar 2.9.



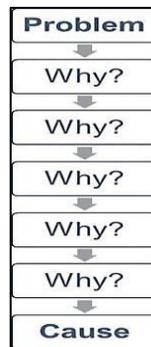
Gambar 2.9. Rangkaian evaluasi kinerja PLTS

2.2. Metode Root Cause Analysis

Root Cause Analysis (RCA) merupakan pendekatan terstruktur untuk mengidentifikasi faktor-faktor berpengaruh pada satu atau lebih kejadian kejadian yang lalu agar dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja (Okes, 2019).

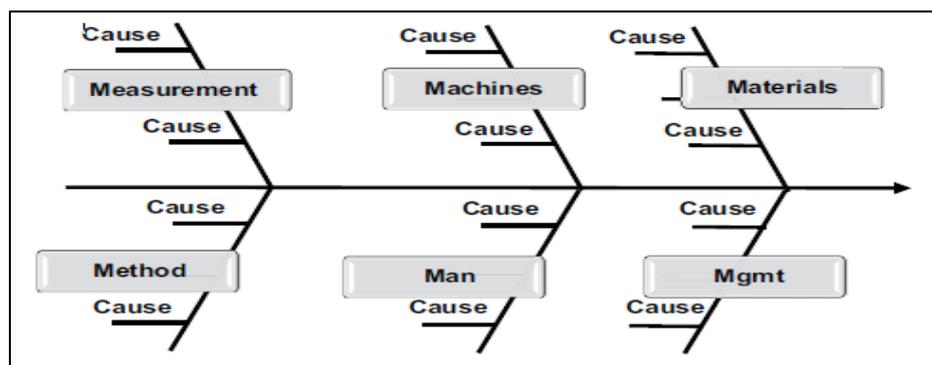
Terdapat beberapa alat analisis akar masalah yang telah banyak diterapkan untuk mengidentifikasi akar permasalahan (Dogget, 2005). Adapun analisis tersebut adalah *5 Why Analysis* sesuai Gambar 2.10, *Fish Bone Diagram* sesuai Gambar 2.11, dan *Root Cause Tree* sesuai Gambar 2.12. Dogget (2005) menyebutkan *5 Why Analysis* adalah alat analisis akar penyebab yang sederhana

dan dapat digunakan untuk menganalisis kegagalan sistem dan dapat bekerja dengan baik dalam mengidentifikasi sebab dan akibat suatu kejadian.



Gambar 2.10. Metode RCA: 5 why analysis (Latino, et al., 2020)

Fishbone Diagram adalah alat yang sering digunakan bersama dengan *Brainstorming*, di mana diputuskan set kategori penyebab yang akan digunakan dan terus menanyakan faktor-faktor apa dalam kategori yang menyebabkan peristiwa tersebut terjadi. Setelah faktor-faktor ini diidentifikasi dan konsensus tercapai, perhatian difokuskan pada solusi. Sebagai teknik *brainstorming*, alat ini cenderung tidak bergantung pada bukti untuk mendukung hipotesis dan lebih cenderung membiarkan desas-desus sebagai fakta. Proses ini juga tidak berdasarkan sebab-akibat, tetapi berdasarkan kategori. Pengguna harus memilih set kategori yang ingin digunakan dan menawarkan ide dalam kategori tersebut. Jika kategori yang tepat untuk acara yang ada tidak dipilih, penyebab utama dan faktor pendukung dapat diabaikan.

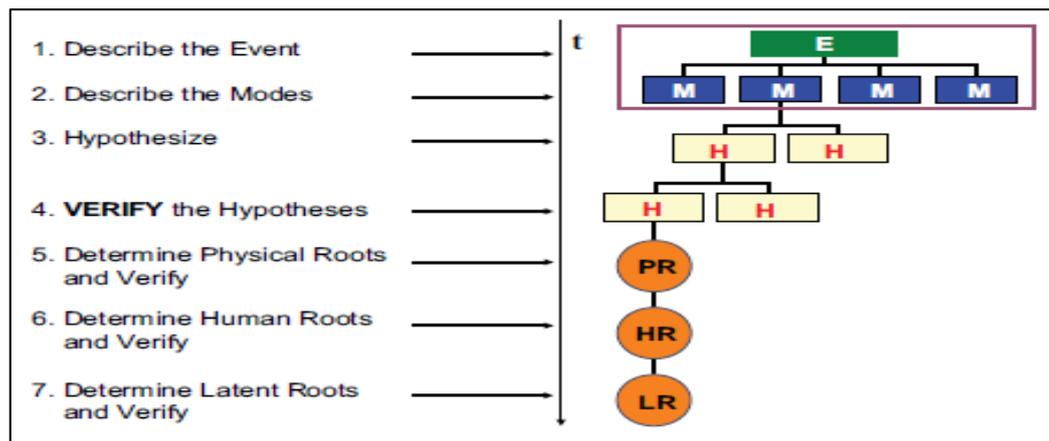


Gambar 2.11. Metode RCA: fishbone diagram (Latino, et al., 2020)

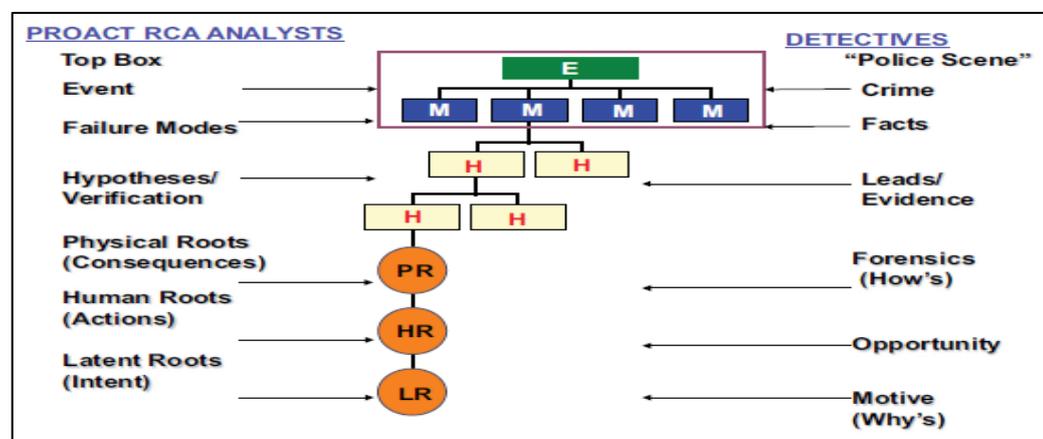
Berbagai metode RCA berbeda dalam penyajiannya, yaitu berbeda dalam cara penyajian secara grafis yang mewakili penentuan sebab-akibat. Kegagalan/penyebab masalah tidak selalu terjadi dalam pola linier. Beberapa faktor

bergabung secara lateral (paralel) untuk memungkinkan hasil yang tidak diinginkan (permasalahan) terjadi (Latino, et al., 2020).

Pemanfaatan RCA dalam Analisis Perbaikan Kinerja dapat memudahkan pelacakan terhadap faktor yang mempengaruhi kinerja (Latino, et al., 2020). RCA adalah bagian dari beberapa faktor (kejadian, kondisi, faktor organisasional) yang memberikan kontribusi, atau menimbulkan kemungkinan penyebab dan diikuti oleh akibat yang tidak diharapkan. Metode RCA *Logic Tree* adalah ekspresi hubungan sebab-akibat yang mengantri dalam urutan tertentu untuk menyebabkan hasil yang tidak diinginkan terjadi pada hari tertentu. Hubungan sebab-akibat ini divalidasi dengan bukti kuat. Pendekatan alat sebab-akibat yang komprehensif seperti metode *Logic Tree* akan mengidentifikasi penyebab dan faktor-faktor yang berkontribusi seperti pada Gambar 2.13.



Gambar 2.12. Metode RCA: *logic tree* (Latino, et al., 2020)



Gambar 2.13. Contoh RCA: *logic tree* investigasi kriminal (Latino, et al., 2020)

Pendekatan terstruktur dan logis diperlukan untuk analisis akar penyebab yang efektif (Barsalou, 2015). Terdapat beberapa langkah-langkah yang harus dilakukan dalam melakukan analisis akar masalah, yaitu sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi Masalah

Dalam mengidentifikasi masalah harus memperhatikan kejadian yang menyebabkan sebuah dampak atau kerugian yang tinggi, sehingga sangat diperlukan untuk melakukan tindakan perbaikan. Kumpulkan detail masalah, yaitu laporan insiden, bukti masalah (*screenshot, log, laporan*), kemudian analisis masalah dengan panduan pertanyaan sebagai berikut:

- Apa masalahnya?
- Apa urutan peristiwa yang menyebabkan masalah?
- Sistem apa yang terlibat?
- Berapa lama masalah itu ada?
- Apa dampak dari masalah tersebut?

Kemudian menggunakan konsep SMART (*Specific, Measurable, Action oriented, Relevant, Time Bound*) untuk mendefinisikan masalah.

2. Menjelaskan Apa yang Terjadi

Melakukan analisis ulang dengan cara mengumpulkan data, informasi dan fakta tentang kejadian untuk memahami permasalahan apa yang sebenarnya terjadi.

3. Mengidentifikasi Faktor Penyebab

Menggali lebih dalam mengenai masalah apa yang terjadi dan menemukan mengapa permasalahan tersebut terjadi.

4. Mengidentifikasi Akar Penyebab

Melakukan analisis secara menyeluruh terhadap faktor-faktor permasalahan yang menjadi akar penyebab dari permasalahan. Hal ini dapat dilakukan dengan menggali lebih dalam mengenai akar penyebab dengan mengajukan pertanyaan “mengapa” secara berulang kali hingga diketahui akar permasalahan, teknik tersebut dikenal metode “*Five (5) Why Analysis*”.

5. Merancang dan Menentukan Rencana Perbaikan

Merancang dan menentukan rencana perbaikan dalam memperbaiki sebuah masalah dan mencegah agar masalah tersebut tidak terjadi kembali pada masa yang akan datang.

6. Menentukan Skala Prioritas Tindak Lanjut Perbaikan.

Tindakan perbaikan yang digunakan untuk mengurangi atau menghilangkan akar penyebab harus dievaluasi kembali apakah rencana tersebut efektif dalam mengurangi atau mencegah suatu permasalahan terjadi kembali. Dalam hal ini digunakan pendekatan *Cost Benefit & Risk Analysis* untuk menentukan urutan skala prioritas tindak lanjut perbaikan.