

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Studi Pustaka

Pada tahun 2007 telah diteliti oleh Supriono mengenai Pertimbangan Ekonomis Untuk Pembangkit Listrik Pada Daerah Terpencil. Penelitian ini menggunakan sistem hibrid, dimana dikaji mengenai pembayaran sebelum dan sesudah diterapkannya sistem hibrid. Sistem hibrid yang dipakai adalah PLTS-PLTD dengan kapasitas masing-masing 13,2 KW dan 40 KW. Pembangunan PLTS memerlukan investasi yang sangat besar yaitu diperlukan biaya Rp 4.492.800.000 dengan harga jual ideal energi listrik Rp 18.653/KWh. Sedangkan pembangunan PLTD memerlukan biaya investasi Rp 266.000.000 dengan harga jual ideal energi listrik Rp 4.930,25/KWh, jauh lebih rendah dibandingkan dengan PLTS. Untuk mengatasi masalah tersebut maka dibangunlah sistem hibrid (PLTS-PLTD). PLTS untuk menangani beban dasar sedangkan PLTD untuk beban puncak serta untuk mengkompensasi kelemahan-kelemahan PLTS. Pembangunan Sistem Hibrid dengan PLTS = 13,2 KW dan PLTD = 40 KW menghabiskan investasi sebesar Rp 4.915.583.000, dengan harga yang diusulkan Rp 11.971/KWh. Jika diperhitungkan harga minyak yang cenderung naik maka sistem hibrid akan menjadi lebih ekonomis dibandingkan dengan PLTS atau PLTD saja. ^[21]

Pada tahun 2013 Supriono dan Ismail kembali mengkaji suatu penelitian tentang Analisis Ekonomi Energi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Meragun (Desa Meragun, Kec. Nanga Taman, Kab. Sekadau). Penelitian ini menggunakan parameter untuk analisis ekonomi energi adalah *Pay Back Period (PBP)*, *Net Present Value (NPV)* dan *Internal Rate of Return (IRR)*, dengan metoda pengelolaan PLTMH dikelola oleh PT. PLN (Persero) Wilayah Kalimantan barat atau PLTMH dikelola langsung oleh masyarakat.

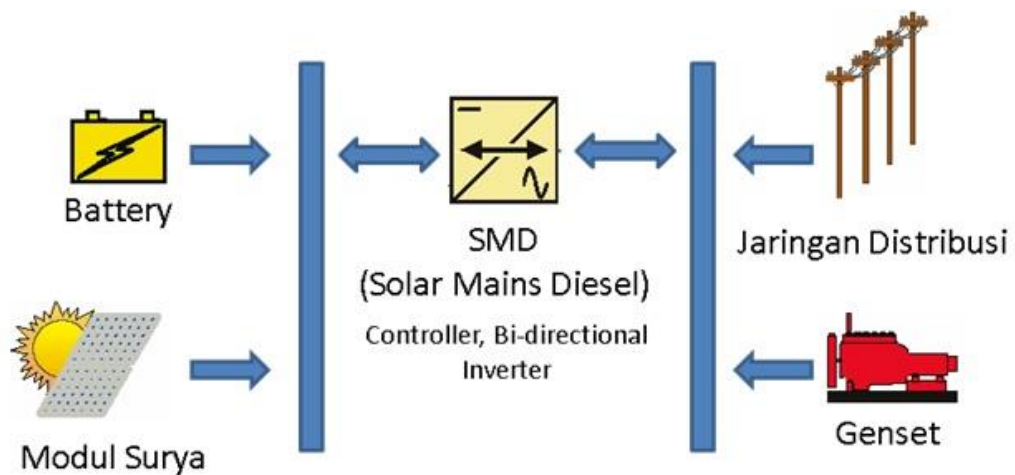
Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa debit air sungai Kemoka mampu membangkitkan daya minimal sebesar 121,5 kW. Energi listrik yang dapat dibangkitkan pertahun sebesar 745.038 kWh. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh biaya investasi yang dibutuhkan untuk merealisasikan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Desa Meragun sebesar Rp. 5.329.094.199,-. HPP sebesar Rp. 834,-/kWh, *Net Present Value (NPV)* PLN = Rp.837.038.116,-, *Net Present Value (NPV)* masyarakat = Rp. 310.803.500,- *Pay Back Period (PBP)* PLN = 9 tahun 6 bulan, *Pay Back Period (PBP)* masyarakat = 19 tahun 1 bulan dan *Internal Rate of Return (IRR)* PLN = 39,65%, *Internal Rate of Return (IRR)* masyarakat = 38,85%. Hal ini berarti Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Meragun layak untuk direalisasikan baik oleh PLN atau oleh masyarakat.^[9]

Melihat beberapa penelitian yang telah dikaji, maka dalam penelitian tentang Analisis Keandalan Potensi Energi Terbarukan Sistem Pembangkit Listrik Hibrid PLN-Mikrohidro-Photovoltaic, akan dikaji mengenai sistem hibrid dengan beberapa kombinasi. Sehingga akan didapatkan suatu sistem yang optimal dari sisi keandalan yang dapat diterapkan di Dusun Margosari.

2.2. Sistem Pembangkit Hibrid

Pengertian hibrid adalah penggunaan dua atau lebih pembangkit listrik dengan sumber energi yang berbeda, umumnya sistem pembangkit yang banyak digunakan untuk hibrid adalah genset, PLTS, *mikrohydro*, dan tenaga angin. Sehingga sistem hibrid bisa berarti PLTS-Genset, PLTS-*mikrohydro*, PLTS-tenaga angin, sehingga diperoleh sinergi yang memberikan keuntungan ekonomis maupun teknis (keandalan sistem suplai)^[23].

Penggunaan sistem pembangkit hibrid mengurangi penggunaan bahan bakar yang mahal, memungkinkan dilakukannya produksi energi listrik yang bersih dan ramah lingkungan serta meningkatkan standar hidup masyarakat yang tinggal di daerah terpencil. Skema dari sistem pembangkit hibrid ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Skema Sistem Pembangkit Hibrid^[23].

2.2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah jenis pembangkit listrik tenaga air yang dapat menghasilkan daya listrik dengan menggunakan aliran alami air. PLTMH ini dapat memberikan listrik ke rumah yang terisolasi atau komunitas kecil, atau daerah yang belum teraliri listrik. Ada banyak PLTMH di seluruh dunia, terutama di negara-negara berkembang karena mereka dapat memberikan sumber ekonomis energi tanpa pembelian bahan bakar. Potensi daya yang dapat dihasilkan oleh PLTMH dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu:

A. Debit Sungai (Q)

Debit aliran sungai sangat dipengaruhi oleh curah hujan yang terjadi di suatu daerah tertentu. Untuk mendapatkan debit air dapat diperoleh dengan persamaan berikut.

$$Q = 0.278 C . I . A \quad (2.1)$$

Dimana ;

Q = Debit sungai (m^3/det)

C = Angka Koefisien Aliran (0 sampai 1)

I = Curah Hujan (mm/jam)

A = Luas Aliran Sungai atau Penampang (Km^2)

Rumus rasional tersebut dapat diartikan bahwa jika terjadi hujan selama 1 jam dengan intensitas hujan (I) = 1 mm/jam pada daerah aliran sungai seluas (A) = 1 km^2 dengan asumsi koefisien aliran (C) = 1, maka debit banjir yang terjadi sebesar $1/3,6 = 0,278 m^3/dt$.^[12]

B. Intensitas Curah Hujan (I)

Curah hujan sangat mempengaruhi debit air suatu sungai. Intensitas curah hujan adalah ketinggian curah hujan yang terjadi pada kurun waktu tertentu, dimana air tersebut terkonsentrasi.

C. Koefisien Aliran (C)

Koefisien aliran permukaan (C) yaitu bilangan yang menampilkan perbandingan antara besarnya aliran permukaan dan besarnya curah hujan. Angka koefisien aliran permukaan itu merupakan salah satu indikator untuk menentukan kondisi fisik suatu daerah aliran sungai, nilai C berkisar antara 0 sampai 1. Angka koefisien aliran untuk daerah aliran sungai dapat dilihat pada tabel 2.1. berikut.

Tabel 2.1. Angka koefisien (C) untuk Daerah Aliran Sungai^[12]

Kondisi Daerah Aliran Sungai	Angka (C)
Pegunungan Curam	0,75-0,90
Pegunungan Tersier	0,70-0,80
Tanah Bergelombang dan Hutan	0,50-0,75
Daerah Pertanian	0,45-0,60
Pesawahan yang diairi	0,70-0,80
Sungai di Pegunungan	0,75-0,85
Sungai di Dataran	0,45-0,75
Sungai Besar yang Sebagian Alirannya di Dataran Rendah	0,50-0,75

D. Daya Listrik PLTMH

Aliran air menghasilkan energi yang dapat dijadikan listrik. Ini disebut dengan *hydropower* (Pembangkit Listrik Tenaga Air). *Hydropower* saat ini merupakan sumber terbesar dari energi terbarukan. Salah satu *hydropower* adalah Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Penghitungan

potensi daya dilakukan dengan berdasarkan *net-head* dan debit. Potensi daya PLTMH dapat dinyatakan sebagai: ^[12]

$$P = Q \times H \times g \quad (2.2)$$

Dimana,

P = Potensi Daya (kW)

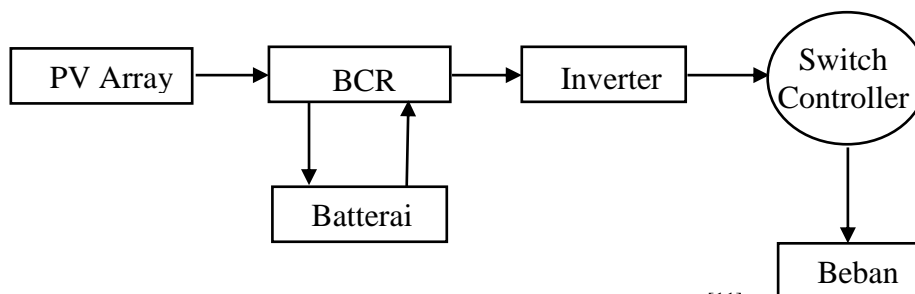
Q = Debit (m³/det)

H = Head (tinggi pipa terjun (m))

g = Konstanta Gravitasi (9,8 m/det)

2.2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Photovoltaic)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atau yang lebih dikenal dengan *solar cell* atau *photovoltaic cell* merupakan sebuah *semiconductor device* yang mampu merubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Dalam hal ini cahaya yang jatuh pada sel surya menghasilkan elektron yang bermuatan positif dan *hole* yang bermuatan negatif, kemudian elektron dan *hole* mengalir membentuk arus listrik. Prinsip ini di kenal sebagai prinsip *photoelectric*.^[11] Blok diagram dari PLTS dapat dilihat pada gambar 2.2. berikut.



Gambar 2.2 Blok Diagram PLTS ^[11]

Daya yang dihasilkan panel surya, adalah sama dengan hasil kali arus dan tegangan yang dihasilkan oleh panel surya.^[22]

$$P = V \times I \quad (2.3)$$

Dengan :

P = Daya keluaran panel (Watt)

V = Tegangan kerja panel (Volt)

I = Arus kerja panel (Ampere)

Tegangan kerja dan arus panel surya yang terjadi pada saat daya maksimum (P_{max}) tercapai berturut-turut dinyatakan sebagai V_{oc} dan I_{sc} . Apabila pengukuran dilakukan pada radiasi 1000 W/m^2 dan suhu 25^0 C , maka daya maksimum (P_{max}) yang dihasilkan oleh panel disebut pula sebagai daya puncak (*peak power*) suatu panel surya dan dinyatakan sebagai P_{peak} .^[22]

$$P_{max} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (2.4)$$

Dengan :

P_{max} = Daya maksimum keluaran panel (Watt)

V_{oc} = Open Circuit Voltage (Volt)

I_{sc} = Short Circuit Current (Ampere)

Pada kondisi penyinaran 1000 W/m^2 dan temperatur 25^0 C , maka $P_{max} = P_{peak}$.

Kualitas fabrikasi panel surya dapat dilihat dari besaran suatu factor yang disebut sebagai *fill-factor*. Daya puncak suatu panel surya dapat dibayangkan sebagai luasan hasil kali I_m dan V_m . Sedangkan daya maksimum ideal dari suatu panel surya adalah luasan dari hasil kali I_{sc} dan V_{oc} . *Fill-factor* dari suatu panel surya didefinisikan menurut persamaan 2.5. ^[22]

berikut :

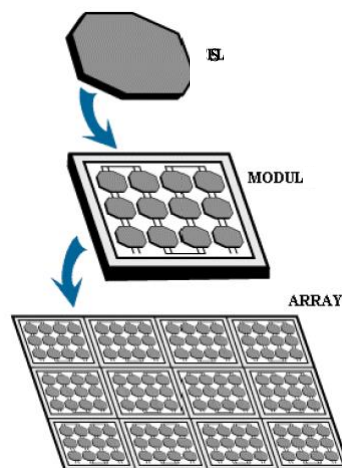
$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2.5)$$

Komponen dari PLTS dapat dilihat dari gambar 2.2. diatas yaitu :

A. PV Array

Konversi energi dari cahaya matahari menjadi energi listrik dilakukan oleh komponen yang disebut sel *photovoltaic* (sel PV). Sel PV pada dasarnya semikonduktor dioda yang memiliki sambungan P-N. Dalam semikonduktor ini terbentuk tiga daerah berbeda, yaitu daerah tipe P, N dan pengosongan (depleksi). Pada daerah tipe P mayoritas pembawa muatannya adalah *hole*, sedangkan pada daerah tipe N mayoritas pembawa muatan adalah elektron. Daerah depleksi memiliki medan listrik internal dengan arah dari N ke P. Saat radiasi matahari mengenai sel surya maka akan terbentuk elektron dan *hole*. Karena pengaruh medan listrik internal pada daerah depleksi maka menyebabkan *hole* bergerak menuju daerah P dan elektron bergerak menuju daerah N. Perpindahan *hole* dan elektron ini menghasilkan arus yang disebut arus fotodifusi. Selain itu pada daerah depleksi dapat pula terjadi pasangan *hole* dan elektron karena pengaruh medan yang sama yang akan bergerak menuju ke arah mayoritasnya, sehingga menghasilkan arus generasi.

Pada aplikasinya, tenaga listrik yang dihasilkan oleh satu modul sel surya masih cukup kecil, maka dalam pemanfaatannya beberapa modul digabungkan dengan cara hubungan seri maupun paralel yang disebut *array*. Bentuk *array* ini yang banyak diaplikasikan untuk pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Hirarki modul sel surya ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut:

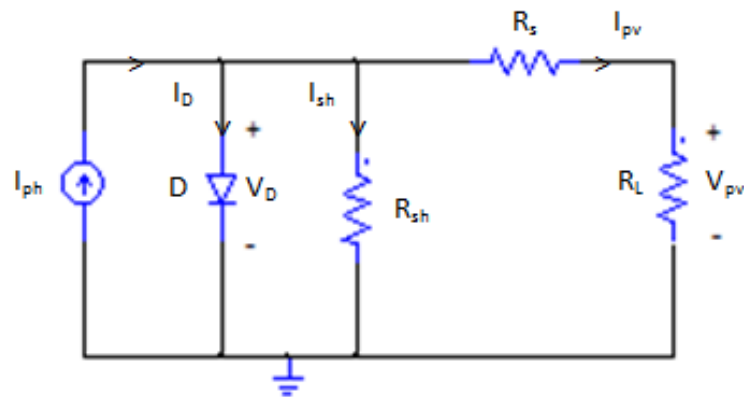


Gambar 2.3 Hirarki Modul Sel Surya (Sel-Modul-Array) ^[13]

Karakteristik Sel Surya

Rangkaian Ekuivalen Sel Surya

Rangkaian ekuivalen sel surya terdiri dari sebuah *photocurrent* (I_{ph}), sebuah dioda, hambatan seri (R_s) dan hambatan paralel (R_{sh}), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Rangkaian Ekivalen dari Sel Surya

Dari rangkaian di atas, *light generated current* atau *photocurrent* (I_{ph}) adalah arus yang dihasilkan langsung akibat penyinaran sinar matahari pada sel surya. Arus ini bervariasi secara linear dengan radiasi matahari dan tergantung pada suhu yang diberikan. Hambatan R_{sh} dan R_s menunjukkan hambatan intrinsik paralel dan seri dari sel. Biasanya nilai R_{sh} lebih besar dibandingkan R_s . Persamaan 2.6 menjelaskan prinsip sederhana dari rangkaian ekivalen sel surya di atas. Besarnya arus sel surya (I_{pv}) adalah pengurangan dari arus I_{ph} , arus dioda (I_D) dan arus hambatan paralel (I_{rsh}), yang dirumuskan sebagai berikut.:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{rsh} \quad (2.6)$$

Persamaan di atas dapat dijabarkan dengan persamaan berikut :^[4]

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_s \left(\exp \frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{N_s n k T_c} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

Dimana:

I_s = Arus saturasi sel surya

q = Elektron = 1.6×10^{-19} C

V_{pv} = Tegangan pada sel

T_c = Suhu kerja sel

- R_s = Hambatan seri
 R_{sh} = Hambatan *shunt*
 n = Faktor ideal
 k = Konstanta Boltzmann = 1.38×10^{-23} J/K
 N_s = Jumlah sel surya yang disusun seri
 N_p = Jumlah sel surya yang disusun parallel

Dari persamaan 2.7 di atas masih terdapat 5 parameter yang belum diketahui. Lima parameter tersebut adalah arus *photovoltaic* (I_{ph}), arus saturasi sel surya (I_s), hambatan seri (R_s), hambatan paralel (R_{sh}) dan besarnya faktor ideal dioda (n). Berikut ini adalah persamaan untuk mencari arus I_{ph} dan arus I_s untuk memodelkan sel surya, yaitu:^[15]

- Arus *photovoltaic*, I_{ph} :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T_c - T_{ref})] \frac{\beta}{\beta_{ref}} \quad (2.8)$$

Dimana:

- β = Solar irradiance
 β_{ref} = Solar irradiance reference = 1000 W/m^2
 K_i = Koefisien suhu dari arus I_{sc}
 I_{sc} = Arus hubung singkat pada suhu kerja
 T_{ref} = Suhu referensi = $25 \text{ }^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$
 I_{rs} = Arus saturasi gelap

- Arus saturasi sel surya, I_s :

I_s atau arus saturasi dioda adalah bagian dari arus balik di dioda yang disebabkan oleh difusi pembawa minoritas dari daerah netral ke daerah deplesi. Besarnya arus saturasi ini dirumuskan sebagai berikut:

$$I_s = I_{rs} \left[\frac{T_c}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\frac{qE_g}{nk} \left\{ \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right\} \right] \quad (2.9)$$

Dimana:

E_g = Energi *Gap*

- Arus saturasi gelap, I_{rs} :

$$I_{rs} = I_{sc-ref} / [\exp(qV_{oc-ref} / N_s k n T_{ref}) - 1] \quad (2.10)$$

Dimana:

I_{sc-ref} = Arus hubung singkat pada *standar test condition*

V_{oc-ref} = Tegangan hubung singkat pada *standar test conditions*

Untuk parameter hambatan seri (R_s) dan ideal faktor (n), terdapat tiga metode dalam menentukan parameter tersebut. Pertama adalah metode *simplified explicit* yang merupakan metode yang disederhanakan secara *eksplisit* berdasarkan pada beberapa penyederhanaan rumusan awal. Kedua adalah metode lereng (*slope*) yang didasarkan pada algoritma pada perhitungan geometri. Dan ketiga adalah metode iteratif yang sebagian didasarkan dari algoritma pada resolusi numerik. Dalam penelitian ini, digunakan metode *simplified explicit* untuk menentukan parameter R_s dan n , sebagai berikut :^[10]

- Hambatan Seri, R_s :

$$R_s = \frac{\frac{N_s n k T_c}{q} \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) + V_{oc-ref} - V_m}{I_m} \quad (2.11)$$

- Ideal Faktor, n :

$$n = \frac{q(2V_m - V_{oc-ref})}{N_s k T \left(\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_m} + \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \right)} \quad (2.12)$$

Dimana:

I_m = Arus maksimum sel surya

V_m = Tegangan maksimum sel surya

Hambatan *shunt* idealnya dibuat dengan nilai hambatan yang sebesar-besarnya.

Agar didapat nilai yang besar, maka diasumsikan besar dari $I_{sc} - I_x = 1$ mA dan $V_{sc} = 0$ V. I_x merupakan besarnya arus yang mengalir pada hambatan *shunt* setelah melewati setiap cabang dioda dan hambatan seri. Dan penentuan nilai hambatan *shunt* ini pada kondisi standar, sehingga diperoleh sebagai berikut: ^[24]

$$R_{sh} = \frac{0,5V_{oc} - V_{sc}}{I_{sc} - I_x} \quad (2.13)$$

Dimana:

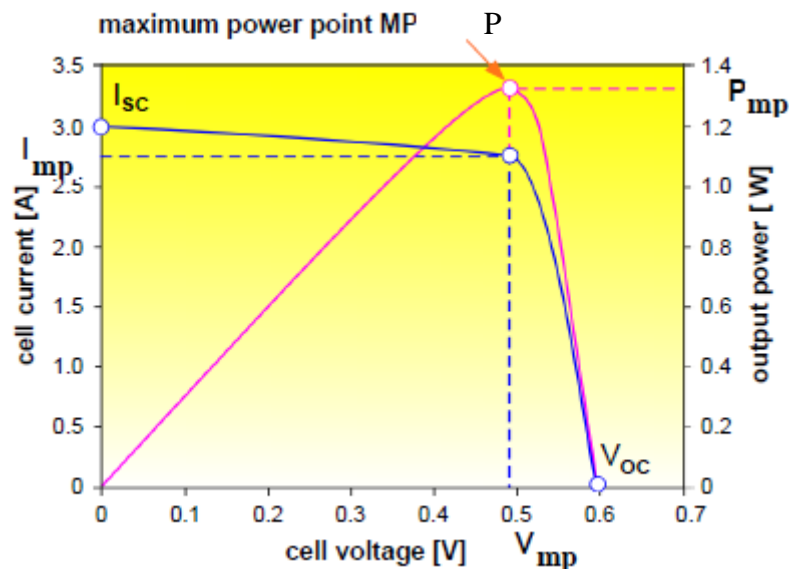
V_{oc} = Tegangan *open circuit* sel surya

V_{sc} = Tegangan *short circuit* sel surya

I_{sc} = Arus hubung singkat pada suhu kerja

Kurva Karakteristik Sel Surya

Sel surya memiliki kurva karakteristik yang menunjukkan hubungan antara arus dengan tegangan keluaran (kurva I-V) dan daya dengan tegangan keluaran sel surya (kurva P-V). Kurva ini ditunjukkan pada Gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.5 Kurva Karakteristik Arus-Tegangan dan Daya-Tegangan pada Sel Surya ^[16]

Pada saat keluaran sel surya tidak terhubung dengan beban (*open cicuit*) maka tidak ada arus yang mengalir dan tegangan pada sel berada pada nilai maksimum, disebut tegangan *open circuit* (V_{oc}). Pada keadaan lain, saat keluaran sel surya dihubung singkatkan (*short cicuit*) maka arus bernilai maksimum, yang disebut arus *short circuit* (I_{sc}). Selain itu terdapat nilai daya maksimum (P_{mp}) yang dapat dihasilkan pada saat tegangan maksimum (V_{mp}) dan arus maksimum (I_{mp}). Titik dimana nilai arus dan tegangan pada titik yang menghasilkan daya terbesar disebut dengan *Maximum Power Point* (MPP). ^[24]

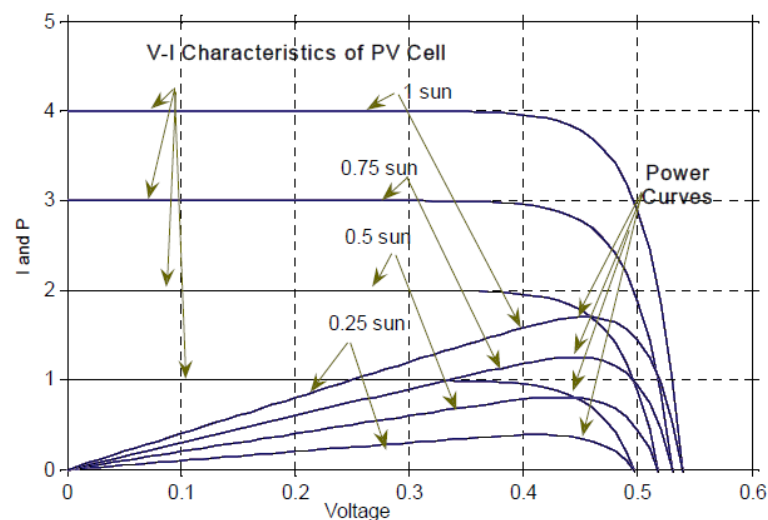
Perubahan *irradiance*, suhu dan susunan sel surya (disusun secara seri atau paralel) dalam modul berpengaruh terhadap parameter utama sel surya yaitu arus, tegangan dan daya keluaran dari sel surya. Karakteristik kurva hubungan antara arus dan tegangan (kurva I-V) serta daya dan tegangan (kurva P-V) dianalisa berdasarkan variasi *irradiance*, suhu dan susunan sel surya dalam modul. Pengaruh perubahan *irradiance*, suhu dan susunan sel surya terhadap keluaran dari sel surya adalah sebagai berikut: ^[6]

Efek Variasi *Irradiance* terhadap Arus, Tegangan dan Daya

Irradiance sangat mempengaruhi besar kecilnya arus yang dihasilkan. Hal ini berdasarkan persamaan 2.8, yaitu :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T_c - 298)] \frac{\beta}{\beta_{ref}}$$

Terlihat bahwa *irradiance* sel surya berbanding lurus dengan arus yang dihasilkan. Artinya semakin berkurang *irradiance* yang mengenai sel surya maka semakin berkurang arus yang dihasilkan oleh sel surya.



Gambar 2.6 Kurva Karakteristik Akibat Variasi *Irradiance* Matahari

Gambar 2.6 di atas menunjukkan bahwa arus *short circuit* mengalami penurunan ketika *irradiance* yang diterima oleh sel surya berkurang. Hal ini karena saat *irradiance* yang berkurang menyebabkan elektron-elektron yang terlepas semakin sedikit sehingga arus listrik yang dihasilkan menurun. *Irradiance* juga berpengaruh terhadap perubahan tegangan *open circuit*. Tegangan *open circuit* semakin berkurang ketika *irradiance* dikurangi, namun perubahan yang dihasilkan tidak signifikan atau perubahannya sangat kecil. Karena *irradiance* yang mengenai sel surya mempengaruhi keluaran dari sel surya maka daya yang dihasilkan pun terpengaruh. Daya merupakan perkalian antara arus dan tegangan, sehingga nilai daya yang dihasilkan sel surya akan menurun saat *irradiance* yang diterima menurun.

Kapasitas daya modul sel surya dapat diperhitungkan dengan memperhatikan beberapa faktor, yaitu kebutuhan energi sistem yang disyaratkan, insolasi matahari, dan faktor penyesuaian (*adjustment factor*). Faktor penyesuaian pada kebanyakan instalasi PLTS adalah 1,1^[11]. Penentuan kebutuhan total beban rumah tangga merupakan langkah awal dalam merancang sistem PLTS. Pada sistem hibrid yang dirancang, persentasi PLTS dapat mensuplai energi keseluruhan dapat dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$EA = \text{Persentase (\%)} \times EB \quad (2.14)$$

Dimana;

EA = Total Energi yang dapat disuplai PLTS (Wh)

% = Persentase kebutuhan daya PLTS

EB = Jumlah total energi beban rumah tangga (Wh)

Kapasitas daya modul surya yang dihasilkan dapat ditentukan dengan mengetahui total energi beban (E_t), Insolasi Matahari dan Faktor Penyesuaian dengan menggunakan persamaan berikut. ^[11]

$$\text{Kapasitas Daya Modul} = \frac{E_t}{\text{Insolasi Matahari}} \times \text{Faktor Penyesuaian} \quad (2.15)$$

B. Baterai Charge Regulator (BCR)

BCR merupakan perangkat elektronik yang mengatur aliran listrik dari modul surya ke baterai dan aliran listrik dari baterai ke peralatan listrik inverter. *Charge-Discharge* pengontrol melindungi baterai dari pengisian berlebihan dan melindungi dari pengiriman muatan arus berlebihan ke input terminal. BCR, juga mempunyai beberapa indikator yang akan memberikan kemudahan kepada pengguna PLTS dengan memberikan informasi mengenai kondisi baterai sehingga pengguna PLTS dapat mengendalikan konsumsi energi menurut ketersediaan listrik yang terdapat didalam baterai. *BCR* sebagai pengatur sistem berfungsi agar penggunaan listrik menjadi aman dan efektif, sehingga semua komponen - komponen sistem aman dari bahaya perubahan level tegangan. ^[11]

C. Baterai

Baterai berfungsi menyimpan arus listrik yang dihasilkan oleh modul surya sebelum dimanfaatkan untuk kebutuhan beban. Ukuran baterai yang dipakai sangat tergantung pada ukuran panel dan *load pattern*. Ukuran baterai yang terlalu besar baik untuk efisiensi operasi tetapi mengakibatkan kebutuhan investasi yang terlalu besar. Sebaliknya ukuran baterai terlalu kecil dapat mengakibatkan tidak tertampungnya daya yang lebih. Baterai tersebut mengalami proses siklus

menyimpan dan mengeluarkan, tergantung pada ada atau tidak adanya sinar matahari. Selama waktu adanya matahari, *array panel* menghasilkan daya listrik. Daya yang tidak digunakan dengan segera dipergunakan untuk mengisi baterai. Selama waktu tidak adanya matahari, permintaan daya listrik disediakan oleh baterai. Kapasitas baterai tergantung dari daya modul. Satuan energi (dalam WH) dikonversikan menjadi Ah yang sesuai dengan satuan kapasitas baterai sebagai persamaan berikut: ^[11]

$$Ah = \frac{Et}{Vs} \quad (2.16)$$

Dimana ;

Ah = Kapasitas Baterai (Ah)

Et = Total Energi Beban (Wh)

Vs = Tegangan Baterai

D. Inverter

Inverter berfungsi untuk merubah arus dan tegangan listrik DC (*direct current*) yang dihasilkan array PV menjadi arus dan tegangan listrik AC (*alternating current*). Inverter yang digunakan adalah inverter dengan kapasitas yang tergantung pada kapasitas daya modul surya dengan tegangan keluaran AC 220 Volt. ^[11]

E. Switch Controller

Proses kendali sistem hibrid antara PLTS dan PLN dilakukan oleh unit kontroler. Sistem hibrid dengan *switch controller* dapat dirancang menggunakan prinsip satu arah, yaitu dalam satu waktu tertentu beban hanya disuplai oleh salah satu pembangkit, oleh karena itu *switch controller* akan bertindak mengatur sumber pembangkit yang akan mensuplai beban. Apabila beban yang dicatu melebihi kemampuan PLTS, maka listrik dari PLN akan masuk membantu. Untuk alasan keamanan, bila listrik dari PLN mati dan PLTS menghasilkan daya yang kurang dari beban yang ada, maka sistem otomatis akan mati.^[11]

F. Insolasi Matahari

Istilah insolasi berasal dari kata insolation, yaitu singkatan dari “*Incoming Solar Radiation*” adalah radiasi matahari yang diterima oleh permukaan bumi persatuan luas dan satuan waktu. Energi matahari dalam bentuk gelombang pendek, oleh permukaan bumi kemudian diemisikan kembali dalam bentuk radiasi gelombang panjang dan digunakan untuk memanasi *atmosfer* bawah, panas ini kemudian didistribusikan oleh *konveksi* atau *turbulensi* dalam *atmosfer*. Insolasi matahari ($\text{kWh/m}^2/\text{day}$) akan berubah terhadap *variasi* ketinggian matahari:

1. Jika matahari tinggi, radiasi yang jatuh tegak lurus terhadap permukaan bumi, matahari rendah, radiasi akan disebarkan di dalam area yang luas.
2. Insolasi juga dipengaruhi terhadap panjang waktu dari matahari terbit sampai dengan terbenam oleh lintang geografis dan letak tempat. Bertambahnya lintang suatu tempat menyebabkan sudut jatuh dan intensitas insolasi menjadi berkurang.

2.3. Keandalan Sistem Tenaga Listrik

2.3.1. Konsep Umum Keandalan

Keandalan adalah kemungkinan bekerjanya suatu peralatan atau sistem sesuai dengan fungsinya dalam periode waktu tertentu dan dalam kondisi operasi tertentu^[3]. Keandalan sistem tenaga listrik merupakan suatu ukuran tingkat pelayanan sistem terhadap pemenuhan kebutuhan energi listrik konsumen. Ada empat faktor yang berhubungan dengan keandalan, yaitu probabilitas, bekerja sesuai dengan fungsinya, periode waktu dan kondisi operasi^[3].

1. Probabilitas

Probabilitas adalah suatu ukuran yang dapat dinyatakan secara angka dengan nilai antara 0 dan 1 atau antara 0 dan 100%.

2. Bekerja sesuai dengan fungsinya / unjuk kerja

Faktor yang menandakan perlunya diadakan kriteria tertentu untuk menyatakan peralatan atau sistem beroperasi secara memuaskan.

3. Periode waktu

Faktor yang menyatakan ukuran dari periode waktu yang digunakan dalam pengukuran probabilitas.

4. Kondisi Operasi

Faktor ini menyatakan pada kondisi operasi yang dilakukan untuk mendapatkan angka keandalan.

Suatu unit pembangkit dapat keluar dari sistem operasi tenaga listrik, sehingga tidak dapat membangkitkan energi listrik untuk mensuplai daya listrik. Dalam

keadaan ini, unit pembangkit mengalami *outage*. *Outage* (pelepasan) adalah keadaan dimana suatu komponen tidak dapat bekerja sesuai fungsinya^[17].

Sistem mempunyai dua tipe outage yaitu :

1. *Forced Outage*

Forced Outage adalah pelepasan yang terjadi akibat dari keadaan darurat yang langsung berhubungan dengan komponen, sehingga perlu dikeluarkan atau dilepas dengan segera, baik secara manual oleh operator maupun secara otomatis.

2. *Schedule Outage*

Schedule Outage adalah pelepasan yang diakibatkan salah satu komponen dikeluarkan (*out of service*) pada waktu yang telah direncanakan untuk keperluan pemeliharaan atau perbaikan.

2.3.2. Keandalan Sistem Seri

Keandalan sistem seri dapat diartikan sebagai komponen-komponen tertentu harus beroperasi semua untuk keberhasilan sistem dalam batas keandalan^[17].



Gambar 2.7. Blok diagram untuk sistem seri

Keandalan dari sistem seri dengan 2 komponen dapat dinyatakan sebagai :

$$R_{sys} = R_1 \cdot R_2 \quad (2.17)$$

Sedangkan ketidakandalan dari sistem dengan susunan seri dari n buah komponen adalah

$$Q_{sys} = 1 - R_{sys} \quad (2.18)$$

dengan :

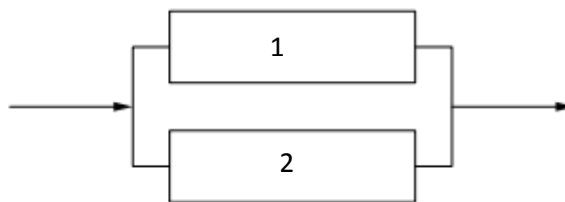
R_{sys} = keandalan sistem.

R_1 = keandalan dari komponen 1.

R_2 = keandalan dari komponen 2.

2.3.3. Keandalan Sistem Paralel

Keandalan sistem paralel merupakan suatu rangkaian komponen yang dapat beroperasi hanya dibutuhkan satu komponen saja yang bekerja atau sistem akan gagal beroperasi bekerja bila seluruh komponen sistem gagal ^[17].



Gambar 2.8. Blok diagram untuk sistem paralel

Persamaan kegagalan atau ketidakandalan sistem (Q_{sys}) dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$Q_{sys} = \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (2.19)$$

dengan :

Q_{sys} = Ketidakandalan sistem.

R_i = Ketidakanalan komponen 1.

n = Jumlah komponen

2.3.4. *Forced Outage Rate (FOR)*

Ukuran sering tidaknya unit pembangkit mengalami gangguan dinyatakan dengan *Forced Outage Rate (FOR)* yaitu:

$$FOR = \frac{\Sigma[\text{down time}]}{\Sigma[\text{down time}] + \Sigma[\text{up time}]} \quad (2.20)$$

Dari persamaan diatas, dapat dijelaskan bahwa semakin kecil jumlah jam gangguan maka nilai FOR semakin kecil. Dengan semakin kecil FOR, keandalan sebuah unit pembangkit semakin baik ^[2].

2.3.5. Probabilitas

Probabilitas adalah peluang kemunculan suatu kejadian. Sebagian besar Probabilitas suatu kejadian akan bernilai di antara 0 (gagal / *failure* (f)) dan 1 (berhasil / *success* (s)) kecuali untuk kasus-kasus yang ekstrim.

Jika p = probabilitas keberhasilan, q = probabilitas kegagalan, s = jumlah keberhasilan, dan f = jumlah kegagalan,

maka

$$P = \frac{s}{s+f} \quad (2.21)$$

Dan

$$q = \frac{f}{s+f} \quad (2.22)$$

dimana $p + q = 1$.

Selain itu perlu diingat kembali konsep *kombinasi* dan *permutasi*, agar dapat menganalisis dengan lebih efisien dibanding jika harus menuliskan satu-persatu

kemungkinan kejadian-kejadian dalam analisis. *Kombinasi* berhubungan dengan banyaknya cara sebuah item dapat divariasikan/diatur namun tidak melihat urutan pengaturan tersebut, sedangkan pada *permutasi* urutan pengaturan tersebut harus dilihat atau diperhatikan. Pada sistem tenaga listrik, akan lebih banyak menggunakan *kombinasi* dibandingkan *permutasi*, dimana *kombinasi* lebih memperhatikan *event-event* yang mana jika dikombinasikan, akan menyebabkan sistem tenaga listrik gagal, ketimbang urutan *event-eventnya* (*permutasi*) yang menyebabkan sistem gagal. Untuk menentukan *event* yang gagal dan tidak dapat digunakan persamaan kombinasi seperti dibawah ini.

$$P = \sum_{r=0}^n C_r^n p^r q^{n-r} = 1 \quad (2.23)$$

Dimana ;

P = Probabilitas

C_r^n = Kombinasi

n = Service

r = outage

2.3.6. Capacity Outage Probability Table (COPT)^[2]

COPT suatu susunan yang sederhana dari tingkat kapasitas pembangkit bersama dengan probabilitasnya. Asumsi dasar untuk model kapasitas ini adalah

1. Setiap unit pembangkit terdiri dari dua *state* atau keadaan yaitu operasi (*up*) dan tidak operasi (*down*). Model *multy-state* dapat juga digunakan untuk menunjukkan unit pembangkit dengan kondisi yang telah menurun.

2. Performansi kegagalan dari satu unit pembangkit tidak tergantung pada tingkat operasi, beban sistem dan pola kegagalan dari unit yang lain.

Tujuan dari model kapasitas ini adalah untuk mengenali *individual probability* dari kapasitas pembangkit. Model jenis ini cukup untuk menghitung indeks keandalan yang berkaitan dengan probabilitas, jumlah hari atau jam hilangnya beban, dan tidak tersuplainya energi. Dasar statistik yang digunakan dalam mengembangkan model kapasitas ini adalah probabilitas suatu unit pembangkit gagal, yaitu *Forced Outage Rate (FOR)*. *Capacity outage probability table* dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2. *Capacity Outage Probability Table*

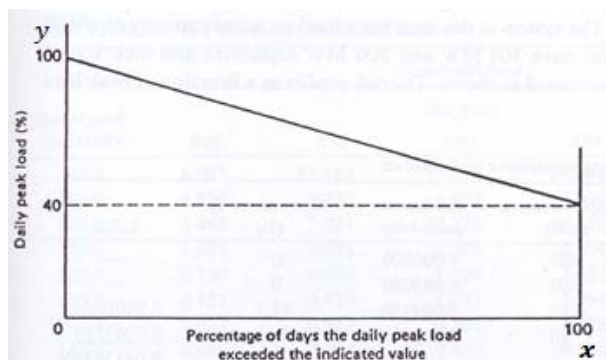
No	<i>Capacity out of service</i>	<i>Probability</i>
1	<i>Outage 1</i>	P1
2	<i>Outage 2</i>	P2
3	<i>Outage 3</i>	P3

Nilai *probability* dapat ditentukan dengan menggunakan rumus kombinasi pada persamaan 2.23 diatas.

2.3.7. Outage Duration

Outage duration merupakan durasi berapa lama sistem pembangkitan tidak dapat melayani beban atau jumlah pembangkitan lebih kecil dari total beban yang akan disuplai. Untuk menentukan *outage duration* maka harus diketahui suatu kurva

lama beban dengan durasi waktu tertentu. Berikut adalah gambaran kurva lama beban.



Gambar 2.9. Kurva Lama Beban

Gambar 2.9 adalah kurva lama beban suatu sistem tenaga listrik. Dari kurva lama beban dapat diketahui beban puncak dan beban dasar suatu sistem tenaga listrik. Setelah diketahui nilai beban puncak dan beban dasar maka dapat dicari nilai *outage duration*. Untuk menghitung *outage duration* digunakan persamaan garis seperti pada persamaan garis lurus 2.24 berikut.

Persamaan Garis

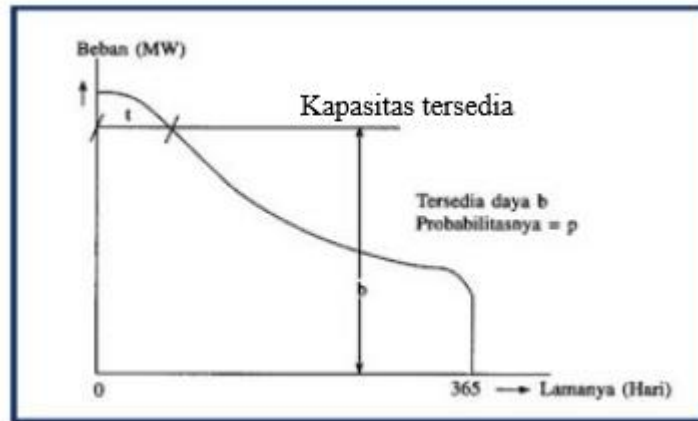
$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \quad (2.24)$$

Dimana; y = daya (watt)
 x = waktu (hari/bulan/tahun)

2.3.8. Loss of Load Probability (LOLP)^[3]

Kehilangan beban (*loss of load*) adalah suatu kondisi dengan kapasitas daya yang tersedia lebih kecil dari beban sistem sehingga ada pelepasan sebagian beban. Probabilitas kehilangan beban (*Loss of Load Probability*) menyatakan besarnya nilai kemungkinan terjadinya kehilangan beban karena kapasitas daya tersedia sama atau lebih kecil dari beban sistem, yang dinyatakan dalam hari per tahun.

Kapasitas daya tersedia adalah kapasitas daya terpasang dikurangi kapasitas gangguan.



Gambar 2.10. Penggambaran LOLP

Dari gambar 2.10 terlihat bahwa garis kapasitas daya yang tersedia memotong garis kurva lama beban, sehingga menimbulkan kehilangan beban selama waktu t . Jadi secara umum :

$$LOLP = P \times t \quad (2.25)$$

keterangan

P : menggambarkan probabilitas sistem dapat menyediakan daya sebesar b .

t : menggambarkan lamanya garis tersedianya daya sebesar b memotong kurva lama beban dari sistem (outage duration).

Makin kecil nilai LOLP, makin baik keandalan sistem. Sebaliknya, semakin besar nilai LOLP, makin rendah keandalan sistem, ini berarti probabilitas sistem tidak dapat melayani beban semakin besar. Nilai *LOLP* dapat diperkecil dengan menambah daya terpasang atau menurunkan nilai *Forced Outage Rate (FOR)* unit pembangkit, karena dua langkah ini dapat memperkecil probabilitas daya

tersedia b pada gambar 2.10 menjadi terlalu rendah sehingga memotong kurva lama beban dengan nilai t yang lebih lama ^[17].