

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Potensi Energi Terbarukan

Sumber energi terbarukan adalah sumber energi ramah lingkungan karena tidak menjadi penyebab adanya perubahan iklim dan pemanasan global karena sumber daya yang berasal dari alam dan berkelanjutan. Indonesia memiliki semua potensi energi terbarukan seperti surya, angin, air, panas bumi, dan bio energi (Azhar & Satriawan, 2018). Berkurangnya produksi energi fosil juga menjadi salah satu komitmen global untuk meminimalisir emisi gas rumah kaca. Pemerintah mendorong untuk meningkatkan penggunaan energi baru terbarukan secara berkesinambungan untuk menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Menurut PP nomor 79 tahun 2014 tentang kebijakan energi nasional, target bauran EBT pada tahun 2025 paling sedikit 23% dan pada tahun 2050 mencapai 31%. (Tim Sekretariat Jendral Dewan Energi Nasional, 2019).

Total potensi EBT ekuivalen 442 GW digunakan untuk pembangkit listrik, sedangkan Bahan Bakar Nabati dan Biogas sebesar 200 ribu Bph digunakan untuk keperluan bahan bakar pada sektor transportasi, industri, dan rumah tangga. Jumlah dari potensi tiap energi baru terbarukan diuraikan pada Tabel 2.1 sebagai berikut.

Tabel 2.1 Potensi Energi Baru Terbarukan di Indonesia

(Tim Sekretariat Jendral Dewan Energi Nasional, 2019)

Jenis Energi	Potensi
Tenaga Air	94,3 GW
Panas Bumi	28,5 GW
Bio Energi	PLT Bio : 32,6 GW BBN : 200 Ribu Bph
Surya	207,8 GWP

Jenis Energi	Potensi
Angin	60,6 GW
Energi Laut	17,9 GW

Sumber energi baru terbarukan terbesar adalah energi surya dengan potensi 207,8 GWP dan untuk daerah Jawa Barat memiliki potensi semua jenis energi baru terbarukan terbesar dengan total 27.362,2 MW potensi energi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 Sebaran Potensi Energi dari Setiap Provinsi.



Gambar 2.1 Sebaran Potensi Energi dari Setiap Provinsi

(Statistik Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, 2016)

Warna hijau yang berbeda, dimulai dari hijau yang cerah sampai gelap menunjukkan banyaknya potensi energi, warna yang semakin gelap menunjukkan daerah tersebut memiliki nilai potensi energi yang semakin tinggi. Setiap daerah memiliki keunggulan tipe pembangkitnya masing-masing seperti provinsi Kalimantan Barat yang memiliki potensi energi surya paling tinggi sebesar 20.113 MW namun dari keseluruhan provinsi, Jawa Barat memiliki total potensi yang paling besar dan nilai potensi daya diuraikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Sebaran Potensi Energi Baru Terbarukan di Jawa Barat

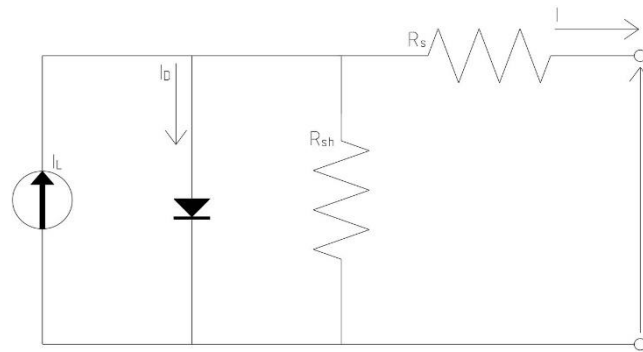
(Statistik Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi, 2016)

Pembangkit listrik yang memiliki potensi energi terbesar di provinsi Jawa Barat adalah energi surya dan angin dengan total energi sebesar 16.135 MW sehingga potensi untuk memanfaatkan energi tersebut menjadi sebuah sistem pembangkit Hybrid memiliki nilai pemanfaatan energi yang baik.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) merupakan pembangkitan listrik dengan mengubah energi elektromagnetik dari sinar matahari menjadi energi listrik. Sistem PLTS terdiri dari modul *Photovoltaic*, *solar charge controller*, baterai, *inverter* baterai, dan komponen pendukung lainnya. (Ridlo & Hakim, 2020)

Listrik tenaga surya ini dihasilkan melalui proses yang dinamakan *Photovoltaic*, proses yang diawali Ketika sinar matahari sampai kepada panel solar cell yang akan memecah elektron agar bergerak sehingga timbul energi listrik. Rangkaian ekivalen sel surya terdiri dari sumber arus (IL), arus diode (ID), dan hambatan seri (Rs). Rangkaian pada Gambar 2.3 digunakan untuk mendapatkan persamaan matematika sel surya, sehingga dapat digunakan untuk simulasi.



Gambar 2.3 Rangkaian Ekuivalen *Photovoltaic*

Dari Gambar 2.3 I_L adalah arus yang dihasilkan langsung akibat penyinaran matahari pada sel surya. Hambatan R_s menunjukkan hambatan seri sel surya, sehingga menurut hukum kirchoff nilai arus *output* sel surya adalah sebagai berikut:

$$I = I_L - I_D \quad (2.1)$$

Adapun rumus efisiensi dari Gambar 2.3 adalah sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{Elektrik}}{P_{Cahaya}} = \frac{V \times I}{A \times S_T} \quad (2.2)$$

di mana:

V = Tegangan yang dibangkitkan *Photovoltaic* (Volt)

I = Arus yang dibangkitkan *Photovoltaic* (Ampere)

A = Luas Penampang *Photovoltaic* (m^2)

S_T = Radiasi Matahari (W/m^2)

Energi keluaran *photovoltaic* didapat dengan mengalikan nilai arus output dengan *peak sun hour* (PSH) dan dikalikan tegangan output, persamaannya ditulis sebagai berikut:

$$E_{out} = V \times I \times PSH \quad (2.3)$$

di mana:

E = Energi output *Photovoltaic* (Wh)

PSH = Nilai efektif dalam satuan waktu (h)

Penentuan kapasitas PLTS bergantung pada energi harian beban dan memiliki kerugian dengan asumsi 5% dari total beban maka, dapat dicari dengan persamaan:

$$E_T = 1,05 \times P_T \times h \quad (2.4)$$

di mana:

E_T = Energi Total (kWh)

P_T = Daya (Watt)

h = Lamanya pemakaian beban (jam)

Area Array (PV Area) diperhitungkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$PV_{area} = \frac{E_T}{G_{AV} \times TCF \times \eta_{PV} \times \eta_{out}} \quad (2.5)$$

di mana:

PV_{area} = Luas Permukaan Panel Surya (m^2)

E_T = Energi Total (kWh/hari)

G_{AV} = Intensitas Matahari Harian ($kWh/m^2/hari$)

TCF = *Temperature Correction Factor* (%)

η_{PV} = Efisiensi Panel Surya (%)

η_{out} = Efisiensi Keluaran

Menentukan kapasitas dan jumlah modul surya maka diperlukan pengukuran *Temperature Correction Factor* (TCF), untuk mengetahui nilai TCF menggunakan persamaan 2.6 dan mencari efisiensi keluaran dirumuskan pada persamaan 2.7.

$$TCF = \frac{P_{MPP} - (\text{temperature coefficient factor} \times P_{MPP} \times \text{Kenaikan Suhu})}{P_{MPP}} \quad (2.6)$$

$$\eta_{Out} = \eta_{bcu} \eta_{inv} \quad (2.7)$$

di mana:

η_{bcu} = Efisiensi *battery charger unit*

η_{inv} = Efisiensi inverter

Dari perhitungan area array, maka besar daya yang dibangkitkan PLTS (*wattpeak*) dapat diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut:

$$P_{WP} = PV_{area} \times PSI \times \eta_{PV} \quad (2.8)$$

di mana:

P_{wp} = Daya yang dibangkitkan (Wp)

PSI = Peak Solar *Insolation* adalah 1.000 W/m²

η_{PV} = Efisiensi Panel Surya (%)

Selanjutnya berdasarkan besar daya yang akan dibangkitkan (*wattpeak*), maka jumlah panel surya yang diperlukan, diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{WP}}{P_{MPP}} \quad (2.9)$$

di mana:

η_{PV} = Jumlah unit panel

P_{WP} = Daya yang dibangkitkan (Wp)

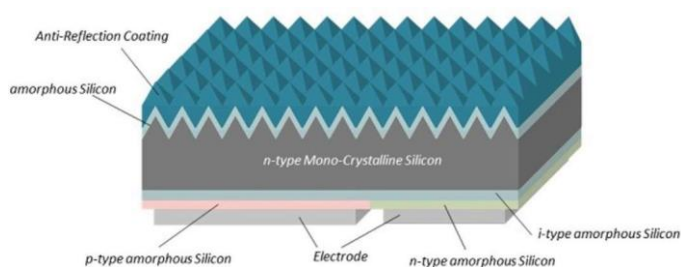
P_{MPP} = Daya maksimum keluaran panel surya (Watt)

2.2.1 Jenis Modul Surya

Panel surya terbagi menjadi beberapa bentuk dan ukuran, namun jenis utama terbagi menjadi tiga bagian yaitu *mono-crystalline*, *poly-crystalline*, dan *thin-film*.

A. *Monocrystalline*

Monocrystalline merupakan panel surya yang memiliki efisiensi 15-20% dengan jenis silicon tunggal. *Monocrystalline* dirancang untuk penggunaan konsumsi listrik besar pada tempat yang memiliki iklim ekstrim. Kelemahan dari modul *Monocrystalline* adalah tidak berfungsi dengan baik pada cuaca dengan kondisi matahari terhalang awan yang menyebabkan efisiensi turun drastis. Gambar dari struktur modul *monocrystalline* ditunjukkan pada Gambar 2.4.

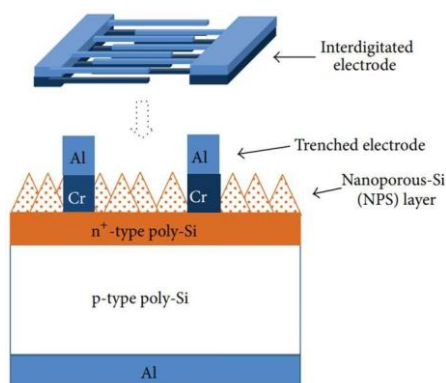


Gambar 2.4 Struktur Modul *Monocrystalline*

(Sharp, 2018)

B. *Polycrystalline*

Polycrystalline merupakan modul surya yang memiliki susunan kristal acak karena difabrikasi dengan proses pengecoran. Modul jenis ini agar tetap mendapat daya yang sama dengan tipe *Monocrystalline* memerlukan luas permukaan yang lebih besar. Jenis modul ini memiliki efisiensi yang rendah jika dibandingkan dengan *Monocrystalline* sekitar 13-18% karena bahannya merupakan campuran silicon dan material lainnya. Gambar dari struktur modul *polycrystalline* ditunjukkan pada Gambar 2.5.

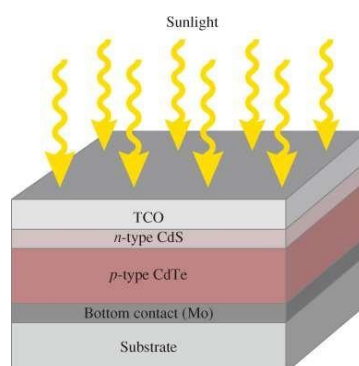


Gambar 2.5 Struktur Modul *Polycrystalline*

(Wu & Tang, 2014)

C. *Thin-Film*

Thin-Film merupakan modul surya dengan struktur lapisan tipis mikrokristal-silikon dan *amorphus* dengan efisiensi modul 8.5%. Panel surya amorf dibuat dari lapisan silikon non kristal yang dilapiskan pada substrat tipis seperti kaca, plastic, atau logam. Bahan konduktor yang dihasilkan sangat serbaguna; lunak, ringan, dan mudah dipotong menjadi bentuk unik yang cocok untuk banyak aplikasi. (Neumeister, 2022). Gambar dari struktur modul *Thin-film* ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Struktur Modul *Thin-Film*

(Electrical Academia, 2021)

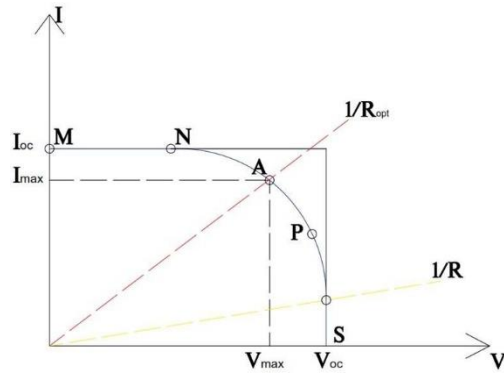
Perbedaan dari ketiga jenis modul surya dijelaskan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Perbedaan Modul *Monocrystalline*, *Polycrystalline*, dan *Thin-Film*
(Neumeister, 2022)

Jenis Modul	Kelebihan	Kekurangan
<i>Monocrystalline</i>	Panel yang memiliki efisiensi yang tinggi dan memiliki masa pakai ± 25 tahun	Jenis panel surya termahal
<i>Polycrystalline</i>	Efisiensi dan biaya panel seimbang, dan memiliki masa pakai ± 25 tahun	Nilai efisiensi= <i>Monocrystalline</i> > <i>Polycrystalline</i> > <i>Thin Film</i> Temperatur mempengaruhi produktivitas dan daya tahan.
<i>Thin Film</i> (<i>Amorphous</i>)	Temperatur tinggi tidak mempengaruhi produktivitas dan biaya rendah	Efisiensi yang rendah dan masa pakai lebih pendek dibanding panel <i>Monocrystalline</i> dan <i>Polycrystalline</i>

2.2.1 Karakteristik Sel Surya

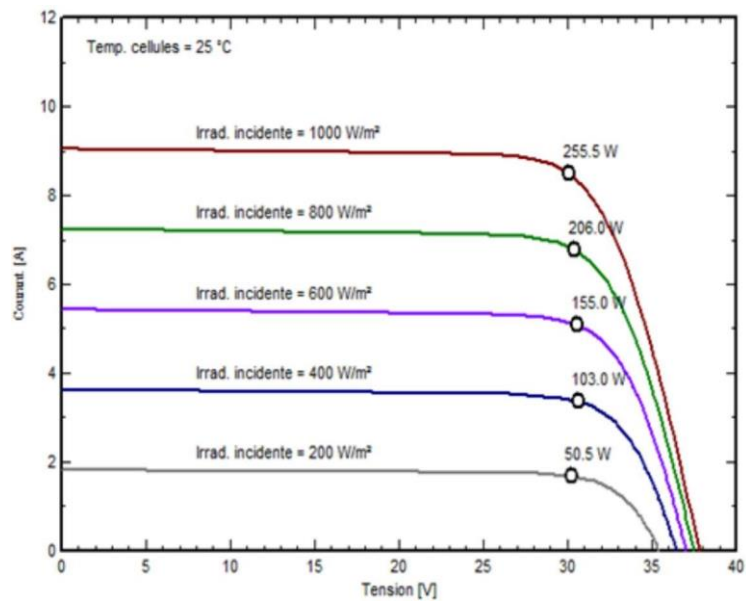
Karakteristik sel surya merupakan kurva hubungan arus dan tegangan yang mempengaruhi dari radiasi matahari dan suhu. Daya maksimal (W_p) pada sel surya dapat diraih dengan radiasi matahari pada kondisi 1000 W/m^2 dan suhu pada kondisi 25°C sesuai *standart test condition* (STC). (Eka et al., 2018). Karakteristik sel surya ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Karakteristik Sel Surya

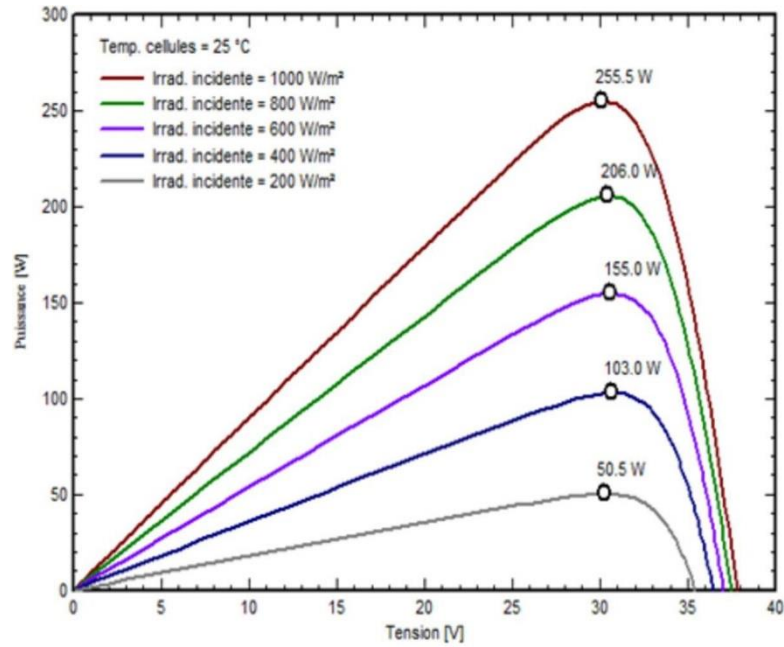
(Eka et al., 2018)

Karakteristik keluaran Daya, Tegangan dan Arus pada modul surya jenis *Monocrystalline* (Modul PV: SolarWord, Sunmodule SW 255 mono) ditunjukkan pada Gambar 2.8 dan Gambar 2.9.



Gambar 2.8 Karakteristik I-V Modul *Monocrystalline*

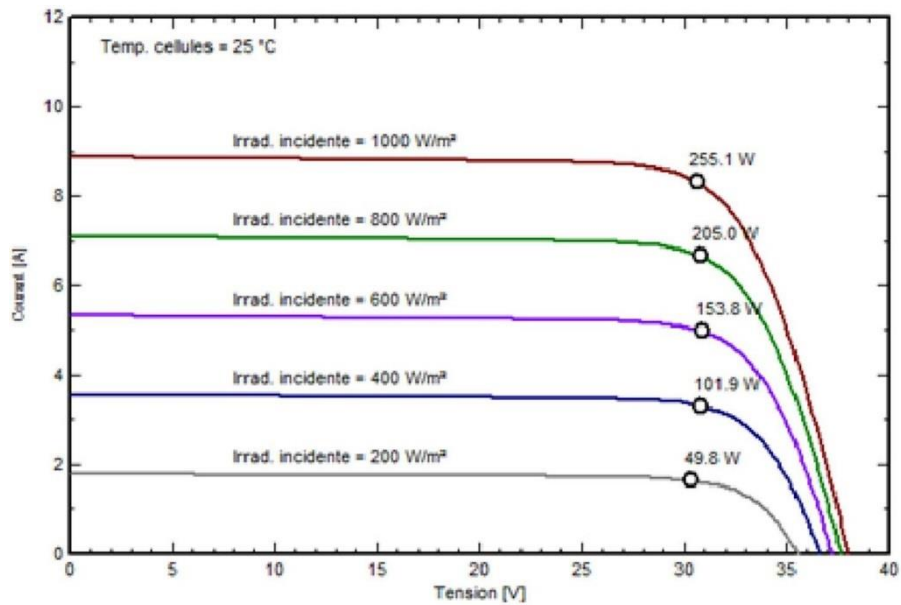
(Elamim et al., 2017)



Gambar 2.9 Karakteristik P-V Modul *Monocrystalline*

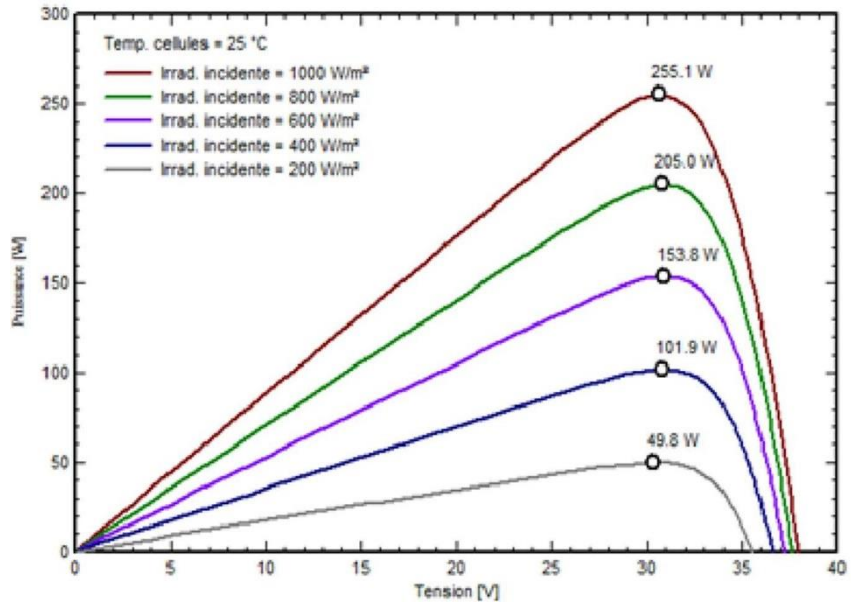
(Elamim et al., 2017)

Karakteristik keluaran Daya, Tegangan, dan Arus pada modul surya jenis *Polycrystalline* (Module PV: SolarWord, Sunmodule SW 255 poly) ditunjukkan pada Gambar 2.10 dan Gambar 2.11.



Gambar 2.10 Karakteristik I-V Modul *Polycrystalline*

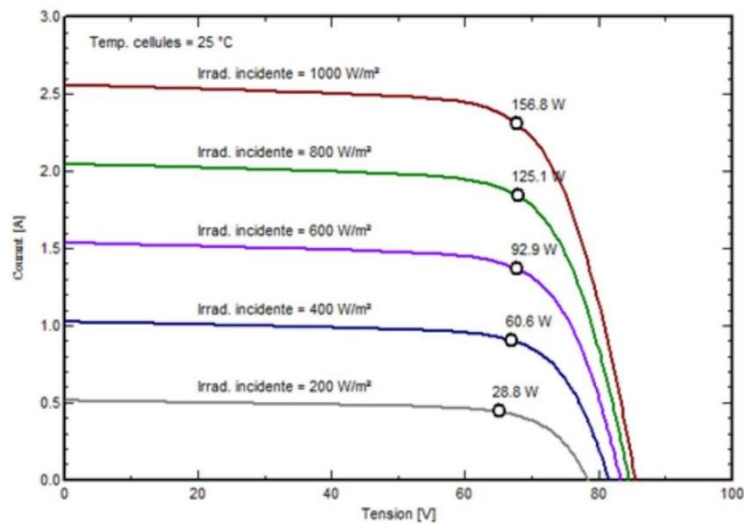
(Elamim et al., 2017)



Gambar 2.11 Karakteristik P-V Modul *Polycrystalline*

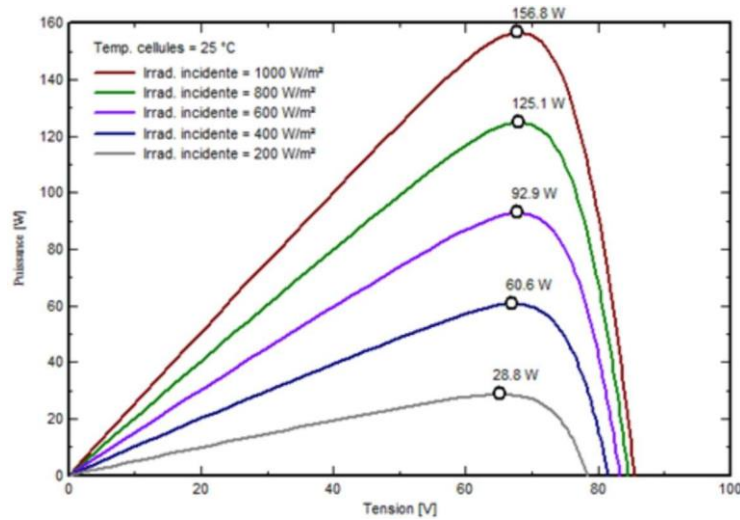
(Elamim et al., 2017)

Karakteristik keluaran Daya, Tegangan dan Arus pada modul surya jenis Amorphus (Modul PV: NexPower, NT-155AF) ditunjukkan pada Gambar 2.12 dan Gambar 2.13.



Gambar 2.12 Karakteristik I-V Modul *Amorphous*

(Elamim et al., 2017)



Gambar 2.13 Karakteristik P-V Modul *Amorphous*

(Elamim et al., 2017)

Intensitas cahaya dan suhu matahari mempengaruhi *output* tegangan dan arus, kenaikan tingkat intensitas cahaya (lux) berbanding lurus dengan daya *Output*. (Mirzazoni et al., 2019). Berikut merupakan perbandingan antara intensitas matahari, tegangan, dan arus daya *output*.

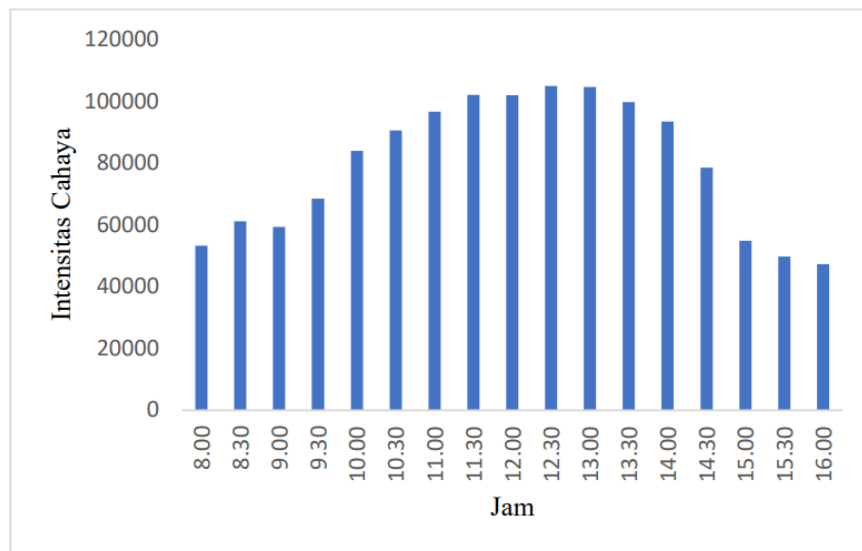
Tabel 2.3 Pengaruh Intensitas Cahaya terhadap Daya Output

(Mirzazoni et al., 2019)

Jam	Intensitas Cahaya (lux)	Suhu (c)	Tegangan (volt)	Arus (A)	Daya (Watt)
8:00	53255,71	33.92	4.26	0.05	0,23
8:30	61104,29	35.64	4.84	0.06	0,28
9:00	59331,43	33.26	4.69	0.06	0,28
9:30	68442,86	32.83	5.94	0.07	0,42
10:00	83971,43	32.91	7.22	0.08	0,61
10:30	90500	32.06	8.15	0.11	0,91
11:00	96600	32.2	9.33	0.18	1,64
11:30	102071,43	32.47	10.34	0.24	2,5
12:00	101942,86	32.79	10.01	0.26	2,56
12:30	104900	33.54	10.61	0.27	2,83
13:00	104628,57	33.77	10.62	0.25	2,62
13:30	99728,57	33.47	9.93	0.23	2,3

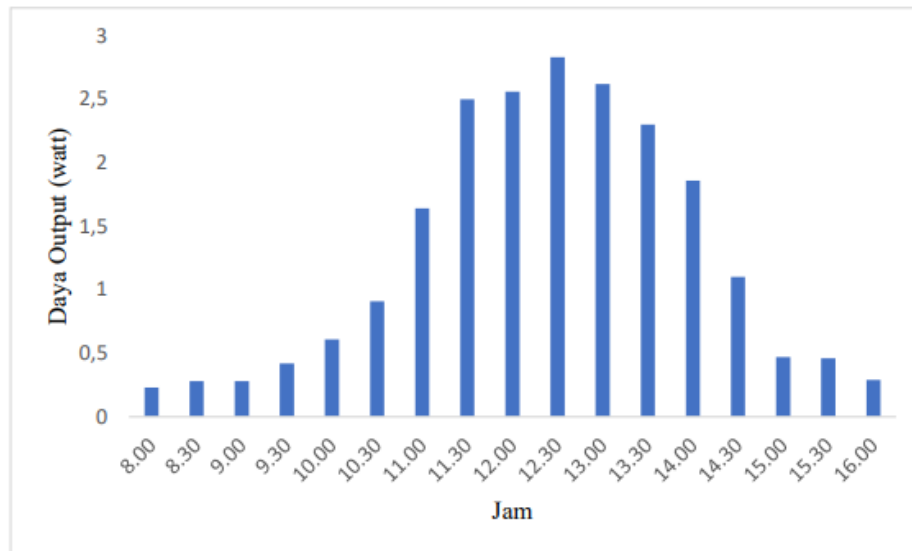
Jam	Intensitas Cahaya (lux)	Suhu (c)	Tegangan (volt)	Arus (A)	Daya (Watt)
14:00	93400	33.70	9.32	0.20	1,86
14:30	78448,57	34.37	7.91	0.14	1,1
15:00	54815,71	34.16	5.45	0.09	0,47
15:30	49727,14	33.77	5.23	0.09	0,46
16:00	47240	34.62	4.45	0.07	0,29

Pada Tabel 2.3 Pengaruh Intensitas Cahaya terhadap Daya Output, dapat dilihat bahwa nilai intensitas cahaya berubah tergantung posisi matahari, semakin siang maka intensitas cahaya semakin besar dan menghasilkan keluaran tegangan dan arus yang besar. Berikut merupakan grafik perubahan intensitas cahaya terhadap waktu dengan selisih 30 menit dalam setiap pengukuran.



Gambar 2.14 Grafik Perubahan Intensitas Cahaya/jam

Nilai intensitas cahaya yang semakin besar saat siang hari dapat memberikan daya keluaran yang besar juga sehingga dapat dikatakan nilai intensitas cahaya berbanding lurus dengan nilai daya output seperti yang ditunjukkan pada grafik dibawah ini.



Gambar 2.15 Grafik Keluaran Daya/jam

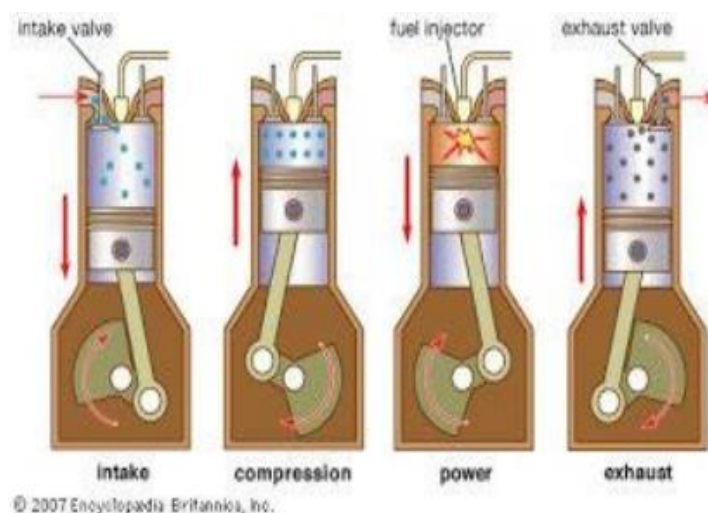
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

Pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) ialah pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak mula (*prime mover*), yang berfungsi menghasilkan energy mekanis yang diperlukan untuk memutar rotor generator. Didalam mesin diesel terjadi penyalaan sendiri, karena proses kerjanya berdasarkan udara murni yang dimanfaatkan didalam silinder pada tekanan yang tinggi (35-50 atm), sehingga temperatur didalam silinder naik, dan pada saat itu bahan bakar disemprotkan dalam silinder yang bertemperatur dan bertekanan tinggi melebihi titikny bahan bakar sehingga akan menyala secara otomatis yang menimbulkan ledakan bahan bakar. (Buntarto, 2016)

Mesin diesel memiliki efisiensi termal terbaik dibandingkan dengan mesin pembakaran dalam maupun pembakaran luar lainnya, karena memiliki rasio kompresi yang sangat tinggi. Mesin diesel kecepatan-rendah (seperti pada mesin kapal) dapat memiliki efisiensi termal lebih dari 50% (KEMENDIKBUD, 2013)

2.3.1 Prinsip Kerja PLTD

Udara yang masuk ke dalam silinder melalui katup masuk karena hisapan piston yang bergerak dari titik mati atas (TMA) ke titik mati bawah (TMB), kemudian ditekan atau dikompresikan oleh piston sehingga, ketika udara dikompresi suhunya akan meningkat (seperti dinyatakan oleh Hukum Charles), mesin diesel menggunakan sifat ini untuk proses pembakaran. Udara disedot ke dalam ruang bakar mesin diesel dan dikompresi oleh piston yang merapat, jauh lebih tinggi dari rasio kompresi dari mesin bensin. Beberapa saat sebelum piston pada posisi TMA atau BTDC (before top dead center), bahan bakar diesel disemprotkan ke ruang bakar dalam tekanan yang cukup tinggi melalui nozzle supaya bercampur dengan udara panas yang bertekanan tinggi. Hasil pencampuran ini terbakar dengan sendirinya dan terbakar dengan cepat (Buntarto, 2016). Gambaran prinsip kerja dari mesin diesel ditunjukkan pada Gambar 2.16



Gambar 2.16 Prinsip Kerja Mesin Diesel

Penyemprotan bahan bakar ke ruang bakar mulai dilakukan saat piston mendekati TMA untuk menghindari detonasi. Penyemprotan bahan bakar yang langsung ke ruang bakar di atas piston dinamakan injeksi langsung (direct injection)

sedangkan penyemprotan bahan bakar ke dalam ruang khusus yang berhubungan langsung dengan ruang bakar utama di mana piston berada dinamakan injeksi tidak langsung (*indirect injection*). Ledakan tertutup ini menyebabkan gas dalam ruang pembakaran mengembang dengan cepat mendorong piston ke bawah dan menghasilkan tenaga linear. batang penghubung (*connecting rod*) menyalurkan gerakan ini ke crankshaft dan oleh crankshaft tenaga linear tadi diubah menjadi tenaga putar. Tenaga putar pada ujung poros crankshaft dimanfaatkan untuk berbagai keperluan. (Buntarto, 2016)

2.3.2 Bagian-Bagian PLTD

Pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) ialah pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak mula (*prime mover*), yang berfungsi menghasilkan energi mekanis yang diperlukan untuk memutar rotor generator (Yudha, 2012). Dilengkapi dengan bagian-bagian utama pembangkit listrik tenaga diesel yaitu:

1. Tangki Penyimpanan Bahan Bakar
2. Penyaring Bahan Bakar
3. Tangki Penyimpanan Bahan Bakar Sementara (Bahan Bakar yang Disaring)
4. Pengabut
5. Mesin Diesel
6. Turbo Charger
7. Penyaring Gas Pembuangan
8. Tempat Pembuangan Gas (Bahan Bakar yang Disaring)
9. Generator
10. Trafo

11. Saluran Transmisi

Selain bagian-bagian terdapat juga sistem-sistem yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga diesel. (A. S. Fofiet, 2017)

1. Sistem Penggerak Mula

Termasuk aki, tangki hampa udara, starter sendiri dan sebagainya. Fungsi sistem penggerak mula adalah menjalankan mesin. Sistem ini memungkinkan mesin pada awalnya berputar dan berjalan sampai terjadi pembakaran dan unit meninggalkannya untuk memperoleh daya.

2. Sistem Bahan Bakar (Fuel System)

Berfungsi untuk mengatur pendistribusian pemakaian bahan bakar pada tiap-tiap silinder sesuai dengan tekanan pengabutan dan volume yang dibutuhkan pada tiap perubahan beban saat mesin beroperasi.

3. Sistem Pelumasan (Lube Oil System)

Termasuk pompa minyak pelumas, tangki minyak, penyaring, pendingin, alat pembersih dan sambungan pipa kerja. Fungsi sistem pelumasan yaitu untuk mengurangi pergeseran dari bagian yang bergerak dan mengurangi pemakaian dan sobekan bagian-bagian mesin.

4. Sistem Pendingin (Cooler System)

Termasuk pompa-pompa pendingin, menara pendingin, perawatan air atau mesin penyaring dan sambungan pipa kerja. Kegunaan system pendinginan adalah untuk meningkatkan panas dari mesin silinder yang menyimpan temperature silinder dalam tempat yang aman. Pompa mengedarkan air melewati silinder dan kepala selubung mengangkut panas. Sistem pendinginan membutuhkan sumber air, sebuah pompa dan tempat untuk pembuangan air panas, penyebaran air oleh mesin

pendingin ini seperti dalam alat radiator, pendingin uap, menara pendingin, penyemprot dan sebagainya.

5. Sistem Udara Masuk

Termasuk saringan udara, saluran pompa kompresor (bagian integral dari mesin). Kegunaan saringan udara adalah untuk membersihkan debu dari udara yang disuplai ke mesin, juga semua ini dapat menimbulkan kenaikan daya keluaran.

Berfungsi untuk mengarahkan aliran udara masuk agar temperatur udara masuk konstan dan gas sisa pembakaran dari tiap-tiap silinder untuk dimanfaatkan serta meredam polusi saat mesin beroperasi. Dan untuk Menyaring udara masuk dari partikel debu yang dapat merusak komponen yang berhubungan dengan ruang bakar.

6. Sistem Pembuangan Gas

Termasuk peredam dan penyambungan saluran. Temperatur pembuangan gas panasnya cukup tinggi, gas ini merupakan pemanas minyak atau persediaan udara pada mesin. Peredam mengurangi kegaduhan suara.

Berfungsi untuk meredam polusi dari gas buang yang terdiri dari panas, gas beracun, suara dan debu-debu carbon.

2.4 Sistem Pembangkit Hybrid

Pembangkit listrik Tenaga Hybrid (PLTH) merupakan sistem pembangkit listrik yang mengintegrasikan beberapa jenis pembangkit listrik yang bertujuan untuk menyatukan kelebihan dari dari setiap pembangkit serta melengkapi kekurangan pada keadaan tertentu agar sistem lebih ekonomis dan efisien terwujud (Herlina, 2009). PLTH dapat terhubung dengan jaringan PLN disebut dengan

sistem *grid-tied*, sedangkan PLTH yang tidak terhubung dengan jaringan PLN disebut dengan sistem *off-grid* (Worthmann, 2022).

a. Sistem Grid Tier

Sistem *grid-tier* atau *on-grid* berarti pembangkit energi baru terbarukan masih terhubung dengan jaringan layanan listrik PLN. Sistem ini dapat membantu ketika kebutuhan daya listrik lebih tinggi dibandingkan dengan daya yang dibangkitkan dari pembangkit EBT. Sistem *grid-tier* pembangkit energi baru terbarukan menyuplai daya listrik melalui inverter serta terhubung dengan jaringan listrik PLN. Komponen utama dari sistem *grid-tier* adalah inverter *grid-tier* dan *power meter*.

Sistem ini memiliki keuntungan antara lain biaya instalasi yang lebih rendah, energi listrik berlebih dapat dijual ke PLN, serta tidak khawatir jaringan listrik akan seluruhnya hilang karena terhubung langsung dengan jaringan PLN. Sistem ini juga tidak memerlukan baterai. Kekurangan sistem ini yaitu apabila jaringan dari PLN mati maka listrik dari sistem ini juga akan berhenti sepenuhnya. Sistem ini tidak sepenuhnya ramah lingkungan dan perawatannya memerlukan biaya yang lebih tinggi.

b. Sistem *off-grid*

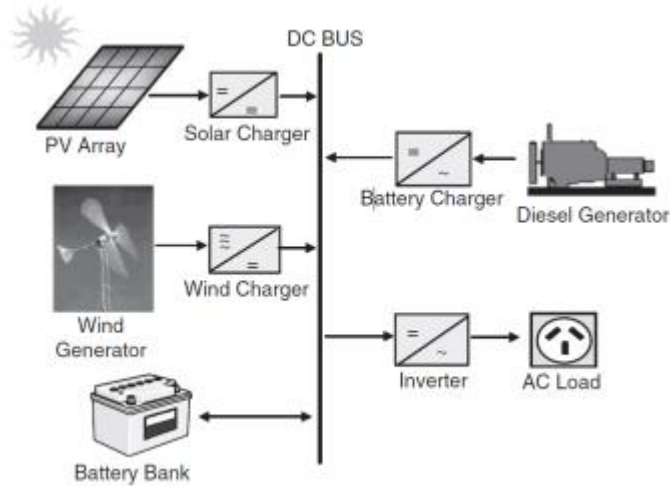
Sistem *off-grid* berarti pembangkit energi baru terbarukan bekerja secara independen dan tidak terhubung dengan jaringan layanan listrik PLN. Kebutuhan daya listrik sepenuhnya bergantung pada daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit energi baru terbarukan. Komponen utama dari sistem *off-grid* adalah inverter *off-grid* dan baterai.

Kelebihan sistem ini yaitu perawatannya yang memerlukan biaya rendah dan mengurangi inefisiensi distribusi listrik. Sistem ini juga cocok untuk daerah yang kurang berkembang serta menghasilkan return yang tinggi. Sistem ini ramah lingkungan karena mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Kekurangan sistem ini yaitu biaya instalasi yang mahal dan memerlukan banyak baterai. Selain itu sistem ini sangat bergantung pada lingkungan dan cuaca sehingga mengandalkan penggunaan *charge controller*.

Menurut Rosyid (2008), PLTH memiliki tiga jenis sistem operasi yaitu sistem serial, sistem tersaklar, dan sistem paralel (Usman, 2014)

a. Sistem Serial

Daya DC yang dihasilkan semua pembangkit disuplai ke baterai, sehingga masing-masing pembangkit harus memiliki *charge controller* sendiri. Hal ini menyebabkan siklus baterai yang tinggi dan efisiensi sistem yang dihasilkan berkurang. Siklus baterai yang terlalu sering juga akan menyebabkan masa pakainya memendek (Prieto, 2019). Inverter yang digunakan harus dapat melayani beban puncak apabila menggunakan sistem ini (Azizah & Purbawanto, 2021). Adanya *fault* pada inverter dapat mengakibatkan hilangnya daya sepenuhnya ke beban. Gambaran mengenai sistem serial pembangkit listrik tenaga Hybrid ditunjukkan pada Gambar 2.17.

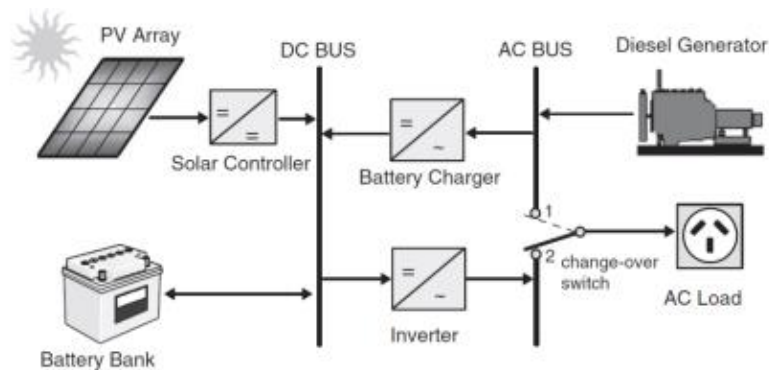


Gambar 2.17 Sistem Pembangkit Hybrid Serial

(Prieto, 2019)

b. Sistem Tersaklar (*Switched*)

Inverter sebagai sumber AC, dimana masing-masing pembangkit dapat langsung mengisi (*charging*) baterai. Kelemahan sistem ini yaitu pada saat pemindahan sumber listrik, suplai daya ke beban terinterupsi (Herlina, 2009). Keuntungan utama dari sistem ini yaitu beban dapat disuplai langsung oleh generator yang meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan (Prieto, 2009). Gambaran mengenai sistem tersaklar pembangkit listrik tenaga Hybrid ditunjukkan pada Gambar 2.18.

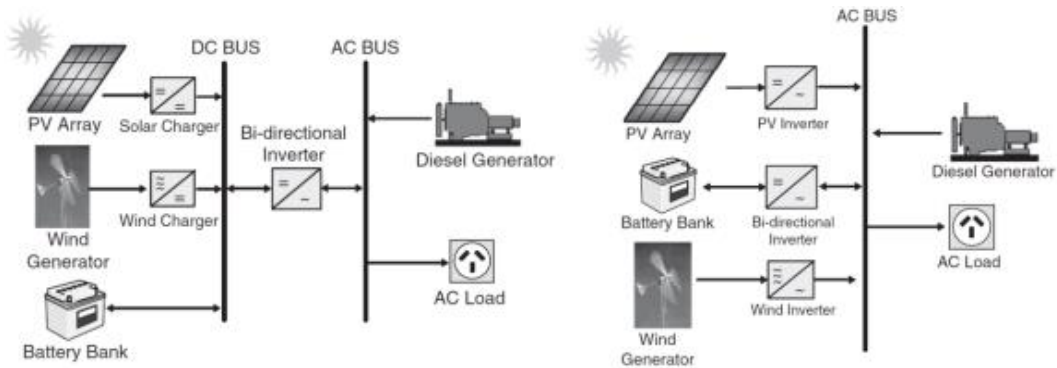


Gambar 2.18 Sistem Pembangkit Hybrid Tersaklar

(Prieto, 2019)

c. Sistem paralel

Sistem ini memanfaatkan inverter *bi-directional* (BDI) yang berfungsi sebagai AC-DC converter, serta berfungsi untuk menghubungkan baterai dan sumber AC. Sumber energi baru terbarukan dihubungkan pada sisi DC (Usman, 2014). Dengan sistem paralel, kapasitas komponen yang digunakan tidak terlalu besar namun tetap dapat menyuplai beban puncak. Kelemahan dari DC Coupling yaitu biaya sistem yang tinggi untuk pemasangan, komponen, serta biaya perawatan. Hal tersebutlah yang menyebabkan AC Coupling lebih unggul karena biaya-biaya tersebut lebih terjangkau (Prieto, 2009). Gambaran mengenai sistem paralel pembangkit listrik tenaga Hybrid ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Sistem Pembangkit Hybrid Paralel, DC Coupling, dan AC Coupling

(Prieto, 2019)

Densitas energi yang dihasilkan oleh sistem pembangkit Hybrid dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$E_d = \frac{E_a}{A_a} \tag{2.10}$$

di mana:

E_d = densitas energi (Wh/m²)

E_a = total energi terbangkitkan oleh sistem (Wh)

A_a = luas area sistem pembangkit (m²)

2.5 Interkoneksi Hybrid

Pengertian umum dari *Hybrid* adalah menggunakan 2 atau lebih jenis energi yang berbeda sebagai sumber daya pembangkitan listrik dengan tujuan mencapai keandalan *supply* daya yang ekonomis. Umumnya energi baru terbarukan seperti matahari, angin, dan sebagainya yang dapat dikombinasikan menjadi sebuah pembangkit yang lebih efisien, efektif, dan andal untuk melayani kebutuhan listrik baik sebagai penerangan rumah maupun kebutuhan peralatan listrik seperti TV, pompa air, dan sebagainya. (Rafiq, 2019)

Tujuan utama menggabungkan dua atau lebih sumber energi untuk mencapai keandalan sumber daya dan efisiensi ekonomis pada *type load (load profile)* tertentu. Untuk *load profile* yang berbeda diperlukan berbeda diperlukan *system hybrid* dengan komposisi yang optimum, sehingga untuk mencapai target ekonomis, sistem desain dan sistem *sizing* menjadi peranan penting. (Sau, Patoding, and Kasa n.d.). Kombinasi *hybrid* PV dan PLTD akan memaksimalkan pembagian waktu ketika siang hari, di mana ketika siang hari PV akan memaksimalkan potensi dari energi matahari, ketika malam hari beban akan di *supply* oleh PLTD sehingga kekurangan daya akan dicatu oleh PLTD.

2.6 Aplikasi HOMER

Perangkat lunak HOMER (*Hybrid Optimization Model for Energy Renewable*) merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk desain sistem pembangkit listrik tenaga Hybrid dalam skala kecil. Perangkat lunak ini dapat mengoptimalkan sistem pembangkit listrik yang didesain *off-grid* maupun *grid-*

connected, termasuk menganalisis sensitivitas setiap variabel yang digunakan seperti radiasi matahari atau kecepatan angin. (Usman, 2014)

a. Perhitungan Panel Surya

Homer dapat memodelkan panel surya sebagai perangkat yang memproduksi listrik DC maupun listrik AC. HOMER menghitung daya output dari panel surya dengan menggunakan persamaan 2.1, namun apabila efek suhu sel surya disetiap *time-step* ikut dipertimbangkan, maka persamaan keseimbangan energi untuk *array* PV menjadi (A. Duffie & A. William, 1991):

$$\tau_a G_t = \eta_c G_T + U_L(T_c - T_a) \quad (2.20)$$

di mana:

τ = Transmisi matahari dari setiap penutup di atas *array* PV (%)

a = Absorbansi matahari pada *array* PV (%)

G_T = Radiasi matahari yang mengenai permukaan *array* PV (kW/m²)

η_c = Efisiensi konversi listrik dari *array* PV (%)

U_L = Koefisiensi perpindahan panas ke lingkungan sekitar (kW/m²°C)

T_C = Suhu sel PV (°C)

T_a = Suhu lingkungan sekitar (°C)

b. Perhitungan Diesel

Konsumsi bahan bakar dari unit generator diesel berhubungan dengan daya pengenal dan daya yang dihasilkannya. Biaya bahan bakar dapat dihitung selama satu tahun dengan persamaan berikut:

$$AFC = C_f \sum_{t=1}^{Tend} F(t) \quad (2.21)$$

di mana:

$F(t)$ = Konsumsi bahan bakar per jam (Rp/jam)

Berdasarkan pada karakteristik beban dari generator diesel, parameter ini dapat dihitung dengan persamaan:

$$F(t) = (0.246 \times P_{DG}(t) + 0.08415 \times P_R) \quad (2.22)$$

di mana:

P_R = Daya pengenal dari generator diesel

$P_{DG}(t)$ = Daya yang dihasilkan generator diesel

C_f = Biaya bahan bakar per liter (Rp/l)