

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Potensi Energi Terbarukan

Sumber energi terbarukan adalah sumber energi ramah lingkungan karena tidak menjadi penyebab perubahan iklim dan pemanasan global karena sumber daya yang berasal dari alam yang berkelanjutan. Indonesia memiliki semua potensi energi terbarukan seperti surya, air, angin panas bumi, dan bio energi (Azhar & Satriawan, 2018). Berkurangnya produksi energi fosil juga menjadi salah satu komitmen global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Pemerintah mendorong untuk meningkatkan penggunaan energi baru dan terbarukan secara terus menerus dalam menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Menurut PP No. 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 BBN dan Biogas sebesar 200 ribu Bph digunakan untuk keperluan bahan bakar pada sektor transportasi, rumah tangga, dan industri. 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 Jenderal 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 Ribuan Bph

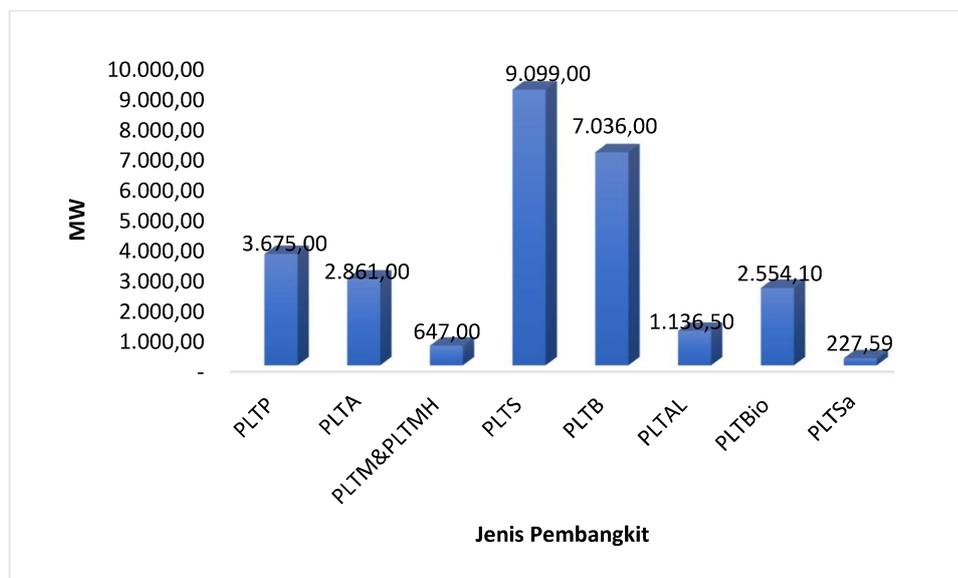
Surya	207,8 GWP
Angin	60,6 GW
Energi Laut	17,9 GW

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 Konservasi Energi. 2016)

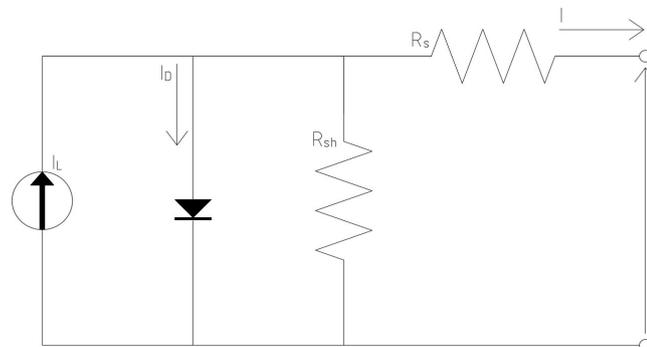
Pembangkit listrik yang memiliki potensi energi terbesar di provinsi Jawa Barat adalah energi surya dan angin dengan total energi sebesar 16.135 MW sehingga potensi untuk memanfaatkan energi tersebut menjadi sebuah sistem *Microgrid* memiliki nilai pemanfaatan energi yang baik.

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 ekuivalen sel surya terdiri dari sumber arus (IL), arus dioda (ID), dan

hambatan seri (R_s). 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/day)

G_{AV} = Intensitas Matahari harian ($kW/m^2/day$)

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 :

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

PSI = Peak Solar *Insolation* adalah 1.000 W/m^2

η_{PV} = Efisiensi Panel Surya (%)

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

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

di mana :

n_{PV} = Jumlah unit panel

P_{WP} = Daya yang dibangkitkan (Wp)

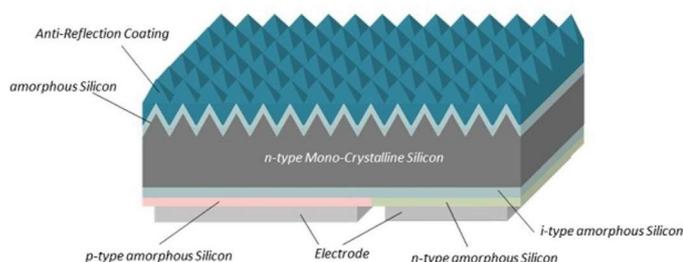
P_{MPP} = Daya maksimum keluaran panel surya (Watt)

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*

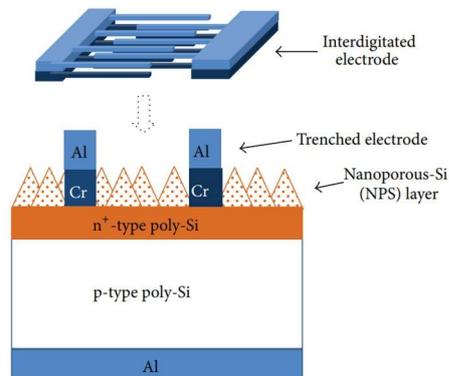
Monocrystalline merupakan panel surya yang memiliki efisiensi 15-20% dengan jenis silikon tunggal. *Monocrystalline* dirancang untuk penggunaan konsumsi listrik besar pada tempat yang memiliki iklim ekstrim. Kelemahan dari modul *Monocrystalline* adalah tidak berfungsi dengan baik pada cuaca dengan kondisi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



Gambar 2.4 Struktur Modul Monocrystalline
(Sharp, 2018)

B. *Polycrystalline*

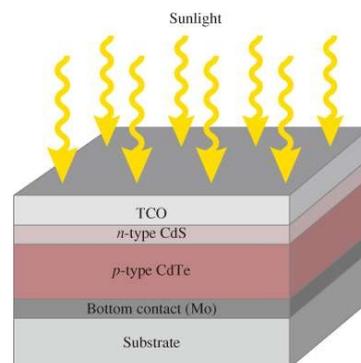
Polycrystalline merupakan modul surya yang memiliki susunan kristal acak karena difabrikasi dengan proses pengecoran. Modul jenis ini agar mendapat daya yang sama dengan tipe *Monocrystalline* memerlukan luas permukaan yang lebih besar. Jenis modul ini memiliki efisiensi yang rendah jika dibandingkan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



Gambar 2.5 Struktur Modul Polycrystalline
(Wu & Tang, 2014)

C. *Thin-Film*

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



Gambar 2.6 Struktur Modul Thin-Film
(Electrical Academia, 2021)

Perbedaan dari ketiga jenis modul surya dijelaskan pada Tabel 2.2.

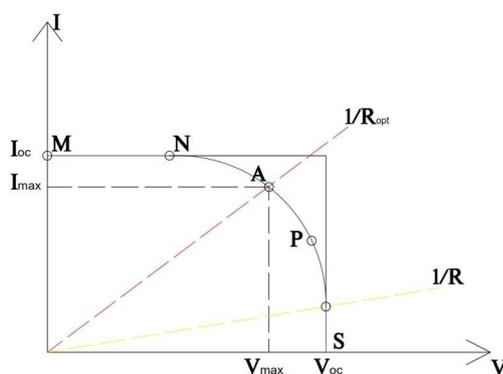
Tabel 2.2 Perbedaan Modul Monocrystalline, Polycrystalline, dan Thin-Film

(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 = $Monocrystalline > polycrystalline > Thin Film$ Temperatur mempengaruhi produktivitas dan daya tahan.
<i>Thin Film (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>

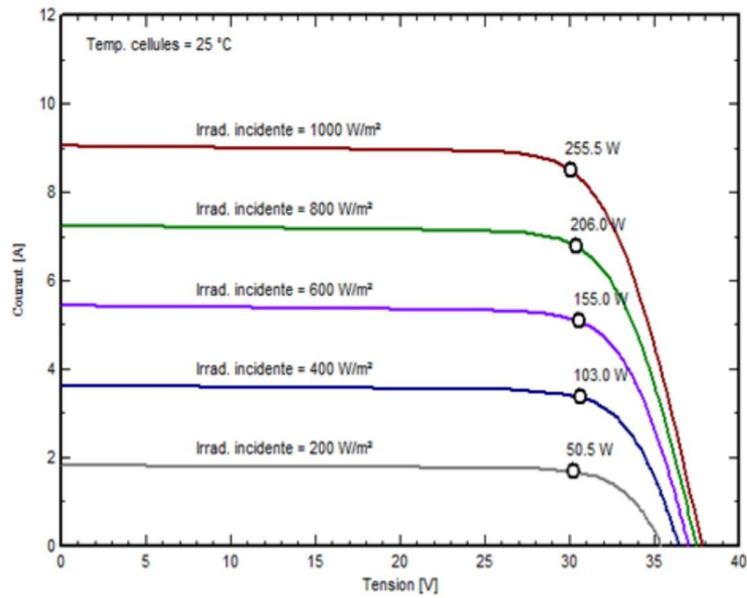
2.2.2 Karakteristik Sel Surya

Karakteristik sel surya merupakan kurva hubungan arus dan tegangan yang dipengaruhi dari radiasi matahari dan suhu. Daya maksimal (W_p) pada sel surya dapat diraih dengan radiasi matahari pada kondisi $1000W/m^2$ dan suhu pada kondisi $25^\circ C$ sesuai *standar tes condition* (STC). (Eka et al., 2018).

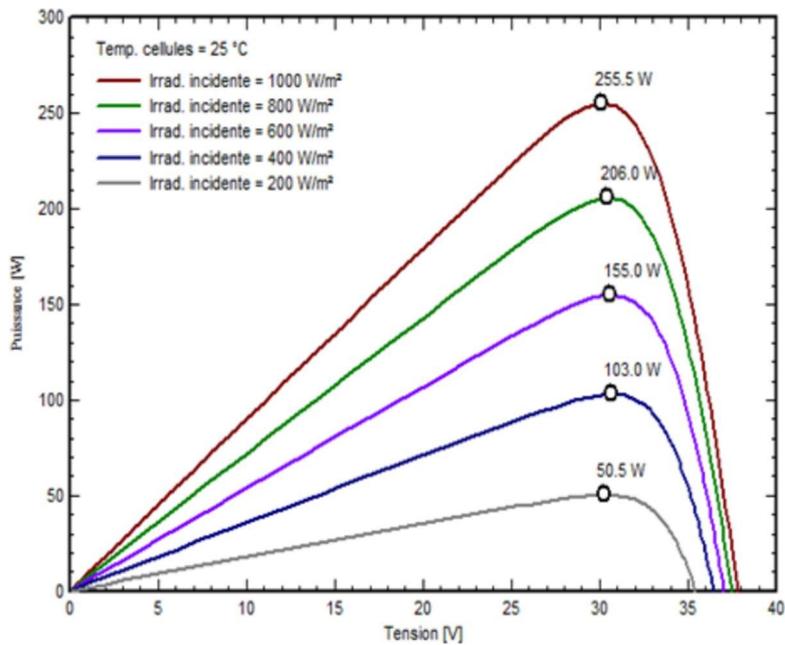


Gambar 2.7 Karakteristik Sel Surya
(Eka et al., 2018)

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

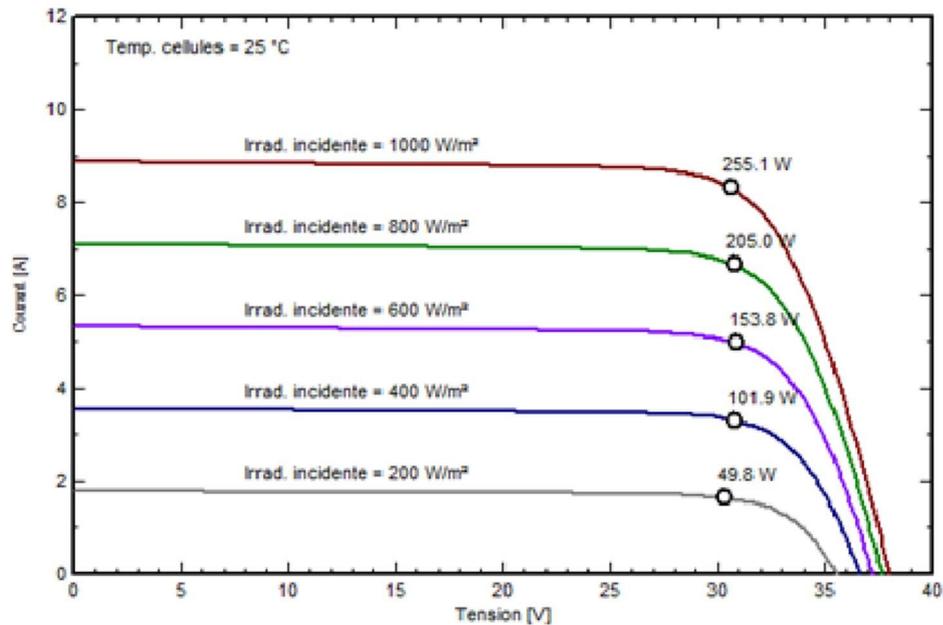


Gambar 2.8 Karakteristik I-V Modul Monocrystalline (Elamim et al., 2017)

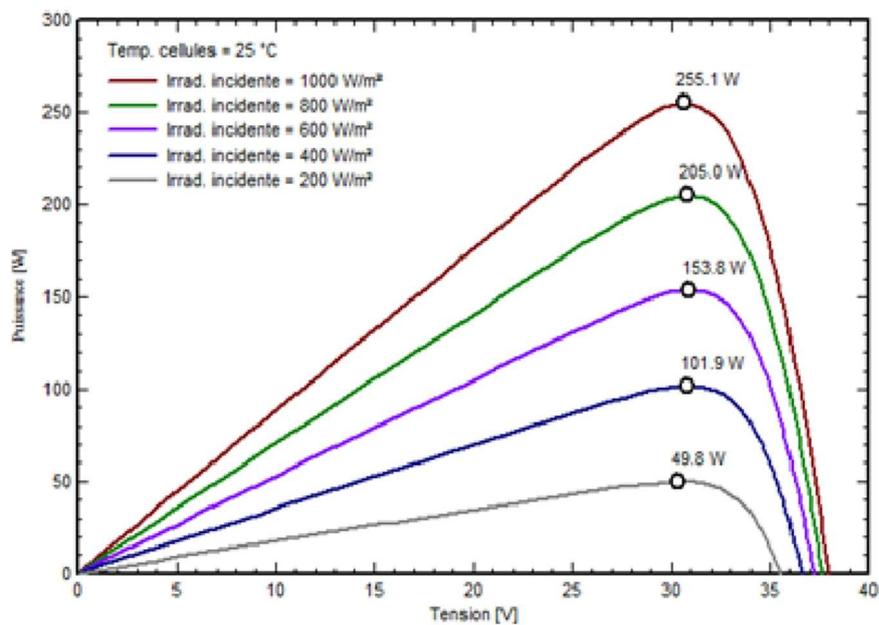


Gambar 2.9 Karakteristik P-V Modul Monocrystalline (Elamim et al., 2017)

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.

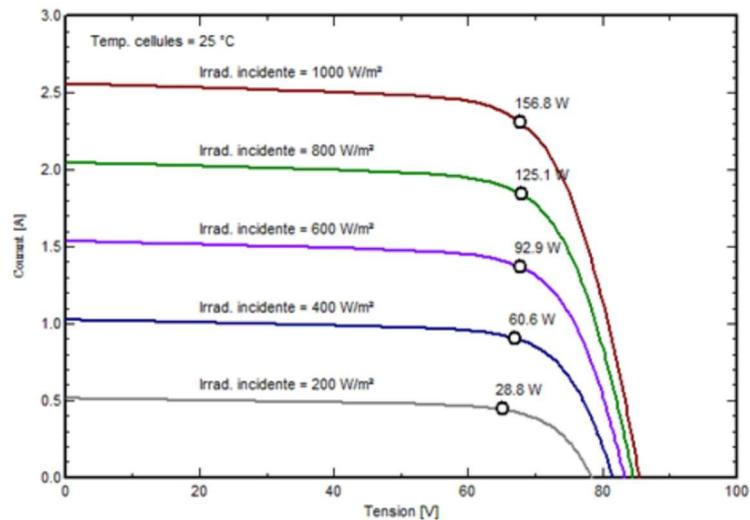


Gambar 2.10 Karakteristik I-V Modul Polycrystalline (Elamim et al., 2017)

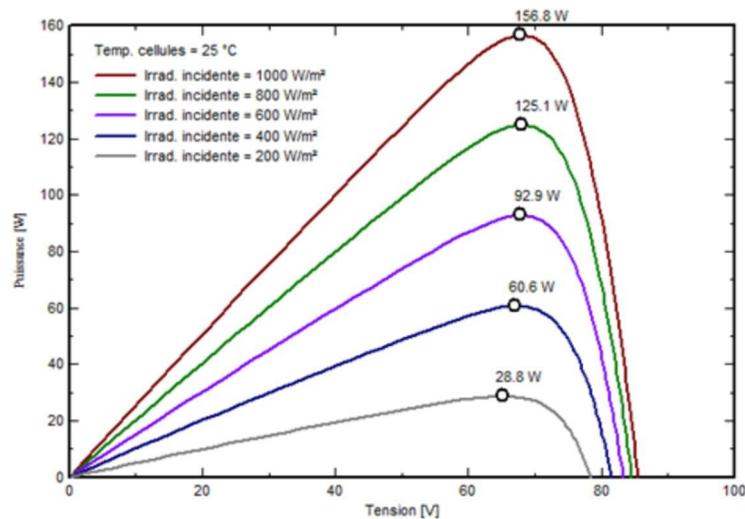


Gambar 2.11 Karakteristik P-V Modul Polycrystalline (Elamim et al., 2017)

Karakteristik keluaran Daya, Tegangan dan Arus pada modul surya jenis *Polyocrsytalline* (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)

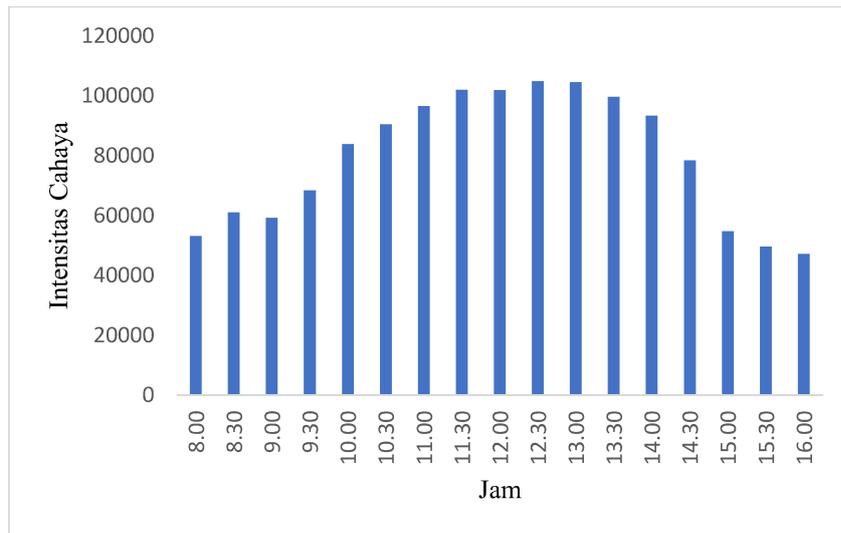
Intensitas cahaya dan suhu matahari mempengaruhi *output* tegangan dan arus, kenaikan tingkat intensitas cahaya (lux) berbanding lurus dengan daya *output*.

(mirzazoni et al. 2019). Berikut merupakan perbandingan antara intensitas matahari, tegangan, arus dan daya *output*.

Tabel 2.3 Pengaruh Intensitas Cahaya terhadap Daya Output.
(mirzazoni et al. 2019)

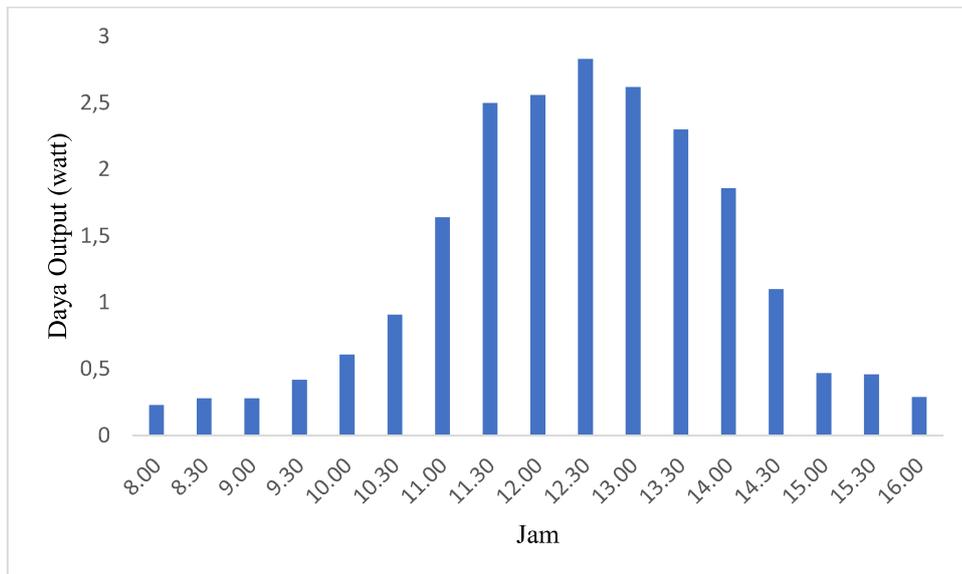
Jam	Intensitas Cahaya (lux)	Suhu (c)	Tegangan (volt)	Arus (A)	Daya (Watt)
8:00	53255,71	33.92	4.26	0.05	0,23
8:30	61104,29	35.64	4.84	0.06	0,28
9:00	59331,43	33.26	4.69	0.06	0,28
9:30	68442,86	32.83	5.94	0.07	0,42
10:00	83971,43	32.91	7.22	0.08	0,61
10:30	90500	32.06	8.15	0.11	0,91
11:00	96600	32.2	9.33	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
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 Micro Hydro (PLTMH)

PLTMH merupakan pembangkit listrik skala kecil dengan air sebagai penggerakannya dengan memanfaatkan tinggi terjunan (*head*) dan jumlah debit air (*Q*). Tenaga air berasal dari aliran air yang mengalir dalam bendungan dengan ketinggian tertentu sehingga memiliki debit air untuk memutar turbin yang dihubungkan ke generator listrik. PLTMH memanfaatkan energi potensial jatuh dari air (*head*), energi potensial berbanding lurus dengan tinggi air. Energi potensial yang mendorong turbin untuk memutar generator yang akan menghasilkan listrik. (Maali, 2017).

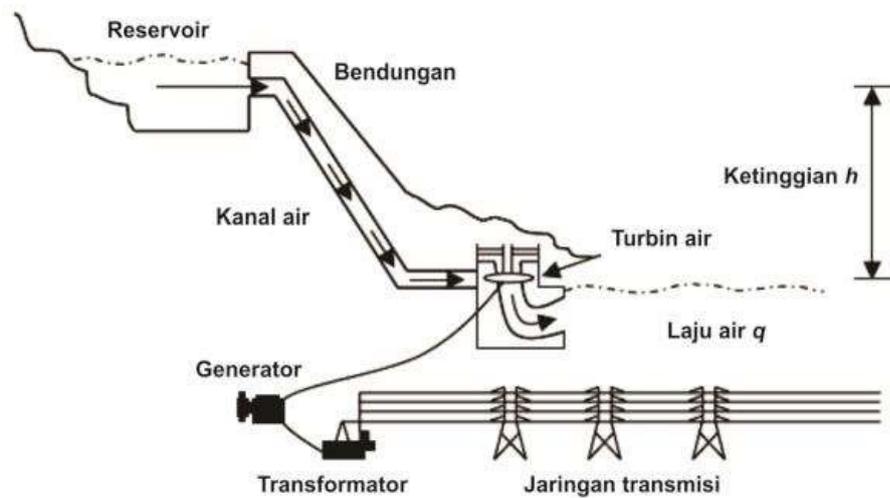
Tabel 2.4 Klasifikasi PLTA
(Syarif et al., 2019)

Tipe	Kapasitas (kW)
Mikro Hidro	≤ 100
Mini Hidro	101 – 2000
Small Hidro	2001 – 25000
Large Hidro	> 25000

PLTMH memiliki kapasitas pembangkitan maksimum 100 kW, semakin besar kapasitas turbin maka semakin besar juga kebutuhan debit air untuk menghasilkan energi potensial.

2.3.1 Struktur PLTMH

Secara teknik, PLTMH memiliki tiga komponen utama yaitu air, turbin, dan generator. Energi potensial yang berasal dari jatuhnya air menumbuk turbin untuk menghasilkan energi mekanik yang memutar generator dan menghasilkan energi listrik. Alur prinsip kerja digambarkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Prinsip Kerja PLTMH
(Ottentri & Matalata, 2020)

Adapun persamaan daya terbangkit generator oleh turbin air adalah:

$$P = k \eta H Q \quad (2.10)$$

di mana:

P = Daya (watt)

H = Tinggi air jatuh (m)

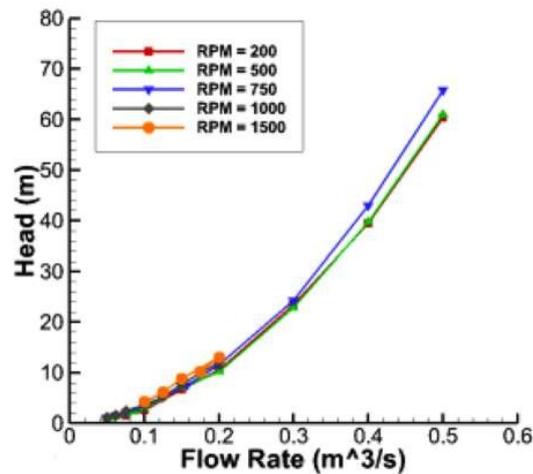
Q = debit air (m^3/s)

η = efisiensi turbin dan generator

k = konstanta

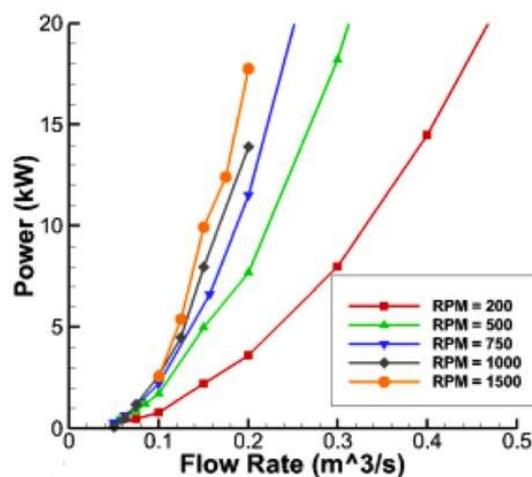
2.3.2 Karakteristik PLTMH

Putaran turbin dan generator dipengaruhi oleh energi potensial debit air, ketinggian jatuh air yang mempengaruhi daya turbin, dan efisiensi turbin, karakteristik ditunjukkan pada Gambar 2.17, Gambar 2.18, dan Gambar 2.19.



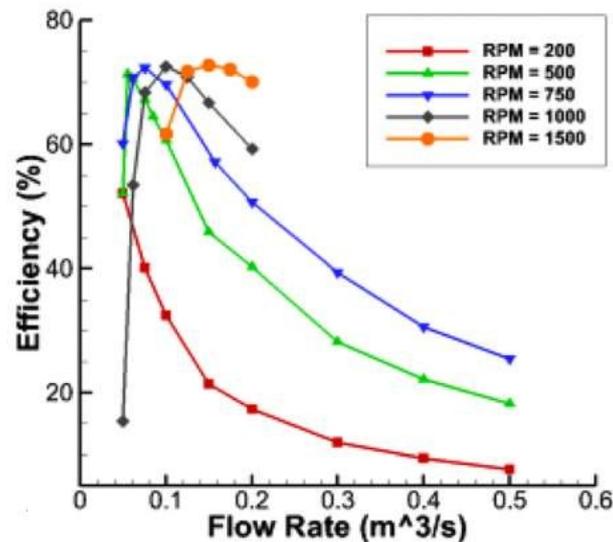
Gambar 2.17 Karakteristik Hubungan Debit Air dan Tinggi Jatuh Air (Schleicher et al., 2014)

Tidak peduli laju rotasi, tinggi jatuh air yang diperlukan untuk laju alir kira-kira sama. Itu hanya mulai bervariasi di sekitar tingkat aliran yang lebih tinggi (sekitar 0,4 m³/s). Saat laju aliran meningkat, tinggi jatuh air yang dibutuhkan meningkat dengan hubungan daya.



Gambar 2.18 Karakteristik Hubungan Debit Air dan Daya Turbin (Schleicher et al., 2014)

Daya meningkat dengan hubungan kekuasaan seperti halnya kepala yang dihitung; namun, tingkat rotasi memiliki efek drastis pada daya yang dihitung. Pada laju aliran konstan, daya yang dihitung meningkat dengan laju rotasi.



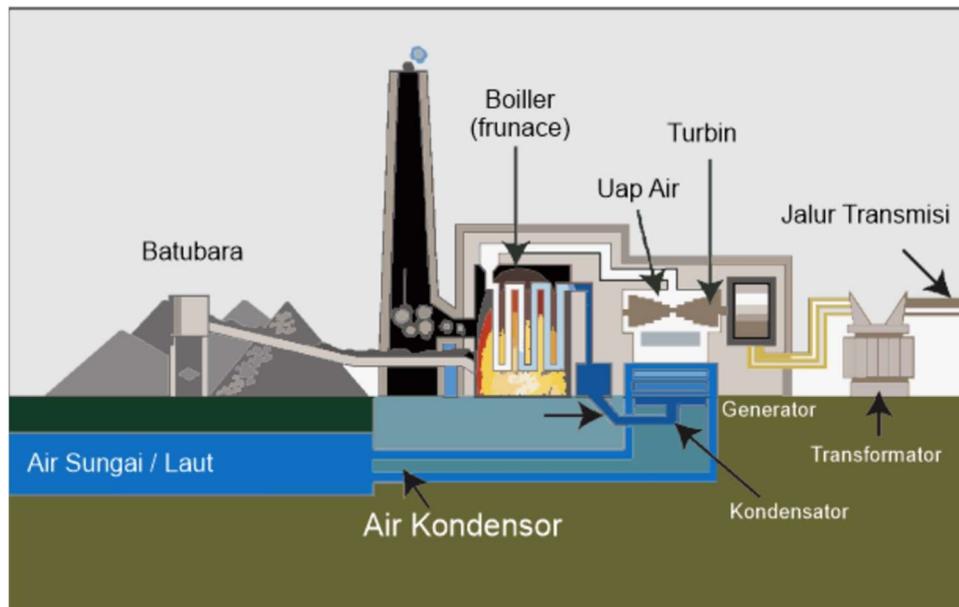
Gambar 2.19 Karakteristik Hubungan Debit Air dan Efisiensi Turbin
(Schleicher et al., 2014)

Efisiensi hidrolik yang dihitung untuk berbagai tingkat rotasi. Nilai puncak sekitar 72% efisiensi untuk setiap tingkat rotasi diselidiki, menunjukkan bahwa tingkat rotasi tidak mempengaruhi efisiensi puncak. Namun, tingkat rotasi tidak mempengaruhi laju aliran di mana efisiensi puncak terjadi. Tingkat rotasi yang lebih tinggi memindahkan efisiensi puncak ke tingkat aliran yang lebih tinggi dan sebaliknya.

2.4 Pembangkit Listrik Termal (PLTU)

Pembangkit listrik tenaga uap adalah pembangkit yang menggunakan uap sebagai penggerak utama (*prime mover*). Uap dihasilkan melalui proses pembakaran air, sehingga energi listrik dihasilkan oleh konversi dari energi kimia menggunakan uap air sebagai fluida kerja, yaitu dengan memanfaatkan energi kinetik oleh uap untuk menggerakkan proses sudu pada turbin dalam memutar poros turbin sehingga generator dapat bergerak menghasilkan listrik. (Kurniawan, 2019)

2.4.1 Prinsip Kerja PLTU



Gambar 2.20 Ilustrasi Prinsip Kerja PLTU

Prinsip kerja PLTU menggunakan siklus uap air yang merupakan sistem tertutup dari kondensat hasil kondensasi di kondensator dan air yang dimurnikan dipompa oleh *condensat pump* ke pemanas tekanan rendah. Air yang dipanaskan dimasukkan oleh daerator untuk menghilangkan oksigen, air selanjutnya di pompa *boiler feed water pump* masuk ke *economizer* untuk di alirkan dan dipanaskan pada *tube boiler*. Air yang dipanaskan menjadi uap dan dikumpulkan pada *steam drum*, di panaskan oleh *superheater* menjadi uap kering yang mempunyai temperatur dan tekanan tinggi, sehingga uap digunakan untuk menggerakkan sudu turbin tekanan tinggi, setelah poros turbin berputar maka generator yang dihubungkan dengan *coupling*, dari putaran turbin menghasilkan energi listrik. (Kurniawan, 2019)

2.4.2 Bagian – Bagian PLTU

Sistem pembangkit PLTU memiliki komponen utama dan pendukung (Yuniarti & Aji, 2019), yaitu:

1. *Boiler*

Boiler atau penguap adalah alat berbentuk bejana tertutup digunakan untuk menghasilkan uap. Uap dihasilkan melalui pembakaran bahan bakar, terdapat dua sistem pada boiler di antaranya sistem air dan sistem bahan bakar. Sistem air atau uap terdiri dari dua katup yaitu sistem air masuk atau mengatur komposisi air dan sistem uap air keluar.

2. Turbin

Turbin uap merupakan komponen mengubah energi panas menjadi energi gerak. Uap yang telah dipanaskan oleh *boiler* menjadi bertekanan, tekanan tersebut menjadi energi kinetik untuk memutar turbin.

3. Kondensor

Kondensor berfungsi mengkondensasi sisa uap air yang telah melewati turbin untuk diubah menjadi cair untuk disirkulasikan kembali ke sistem. Proses kondensasi dibantu oleh cairan pendingin dalam proses kerjanya.

4. Generator

Komponen untuk membangkitkan konversi energi listrik dengan mengubah energi mekanik.

5. *Desalination Plant*

Desalination Plant merupakan komponen pendukung, untuk mengubah air laut menjadi air tawar dengan metode penyulingan, agar tidak memiliki sifat korosif.

6. *Demineralizer*

Komponen ini menghilangkan kandungan mineral di dalam air karena mineral memiliki risiko menyebabkan kegagalan sistem kelistrikan maupun korosi pada fluida.

7. *Chlorination Plant*

Komponen ini berfungsi menghasilkan senyawa kimia natrium hipoklorit (NaOCl) untuk memanipulasi kesadaran mikroorganisme untuk meminimalisir risiko perkembangbiakan pada pipa.

8. *Coal Handling Unit*

Unit pengolahan batu bara adalah unit yang bertanggung jawab atas distribusi batu bara di dalam PLTU.

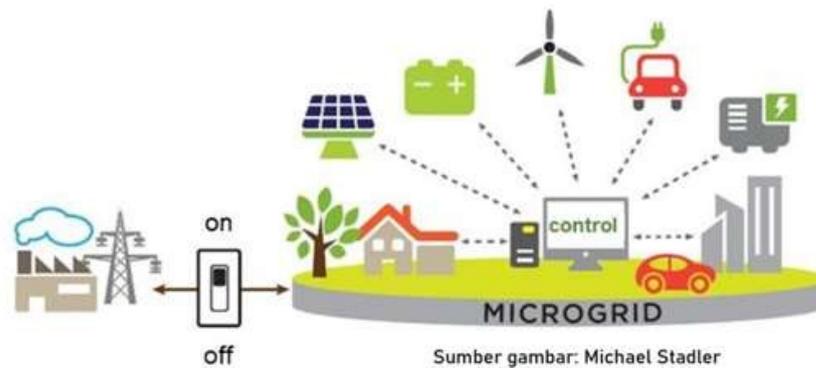
9. *Ash Handling Unit*

Unit pengolahan abu yang merupakan unit penanggung jawab atas sisa bahan bakar dari hasil pembakaran agar tidak mencemari lingkungan.

2.5 Microgrid

Sistem *Microgrid* merupakan suplai daya berskala kecil dengan jangkauan yang terbatas menggunakan pembangkit yang beragam diinterkoneksi agar dapat memberikan sumber energi yang memberikan fleksibilitas dan efisiensi yang tinggi. *Sistem Microgrid* bersumber dari energi baru terbarukan dan memiliki

sistem pengaturan energi (EMS)(Suryanto & Hariyanto, 2018). Pada Gambar 2.21 merupakan desain dari *microgrid*.



Gambar 2.21 Desain Microgrid
(BPPT.2020)

Microgrid merupakan sebuah sistem tenaga berskala kecil yang harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

1. Memiliki batas-batas yang jelas secara elektrik.
2. Mampu mengkonsolidasi pembangkitan terdistribusi (*distributed generation* atau disingkat DG), beban, dan penyimpanan energi sebagai sebuah entitas tunggal.
3. Dapat beroperasi dalam mode *islanding*, yakni memiliki *self-sufficiency* untuk menyuplai beban kritis ketika tidak terhubung ke grid utama.

Sebuah sistem *microgrid* bisa beroperasi secara mandiri (stand-alone microgrid) ataupun terhubung ke grid utama (grid-connected microgrid). Stand-alone microgrid didesain agar beroperasi secara mandiri dan lebih sederhana dalam perencanaannya, namun rawan dengan fluktuasi kondisi alam sehingga microgrid dengan terhubung ke grid utama lebih banyak digunakan.

Terdapat beberapa komponen dalam sistem *microgrid* di antaranya:

1. Komponen utama, biasa disebut pembangkitan terdistribusi (DG). Sumber energi DG berupa sumber energi terbarukan maupun non terbarukan. Beberapa jenis pembangkit yang digunakan pada *microgrid* dijelaskan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Tipe pembangkit pada *microgrid*
(Budiman, 2021)

Pembangkit	Prinsip Kerja
Turbin angin	Konversi energi kinetik angin menjadi listrik dengan generator.
Panel Surya	Konversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik.
Turbin gas mikro	Konversi energi panas dari gas alam menjadi energi mekanik yang menjadi input pada generator untuk menghasilkan listrik.
Sel bahan bakar	Konversi energi kimia dari bahan bakar (hidrogen) dan agen oksidasi menjadi energi listrik melalui mekanisme reaksi redoks.
Mesin diesel	Konversi energi bahan bakar solar menjadi energi listrik.
Turbin air	Konversi energi kinetik dari air yang menghasilkan energi mekanik untuk memutar turbin sehingga menghasilkan listrik.

Karena sifat energi terbarukan yang fluktuasi, maka tidak dapat mengandalkan energi baru terbarukan 100%, sehingga pembangkitan dengan energi non-terbarukan seperti diesel dan turbin gas mikro bisa dipakai.

2. Komponen kedua atau beban. Beban perlu diatur sedemikian rupa agar tingkat ekonomis pengoperasian *microgrid* dapat tercapai.

3. Komponen ketiga atau media penyimpan energi. Media penyimpanan energi yang dipakai pada *microgrid* dapat dibagi menjadi 5 kategori yang diuraikan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Kategori perangkat penyimpan energi.
(Budiman, 2021)

Kategori	Contoh perangkat
Penyimpanan energi berbasis mekanik	<i>Flywheel, compresses-air, gravity</i>
Penyimpanan energi berbasis elektrokimia	Baterai dengan beberapa tipe: Li-Ion, PbA, NaS, NiCd/NiMH, NaNiCl ₂ , redoks
Penyimpanan energi berbasis kimia	Hydrogen fuel cell
Penyimpanan energi berbasis elektrik	Ultra Kapasitor, super magnetic
Penyimpanan energi berbasis termal	Low temperature, high temperature

2.6 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 Mikrohidro 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 PLTA sehingga kekurangan daya akan dicatu oleh pembangkit termal.

2.7 Economic dispatch

Economic Dispatch adalah pendistribusian beban pada genset yang ada pada sistem secara ekonomis optimal pada harga beban sistem tertentu sehingga diperoleh biaya pembangkitan yang minimum untuk menghasilkan energi listrik yang dibangkitkan pada sistem tenaga listrik. (Syah et al., 2012)

Economic Dispatch merupakan skema sistem tenaga listrik untuk meminimalkan biaya operasi serta ekonomis melalui aliran daya yang optimal pada operasi pembangkitan. (Dzikra and Budiman 2019). Fungsi *economic dispatch* untuk mengurangi biaya bahan bakar dengan tujuan mengatur keluaran daya masing-masing pembangkit agar dapat memenuhi kebutuhan beban dengan biaya yang minimum. (Mutlaq & Kumar, 2019)

Beberapa komponen biaya yang terkait pada optimasi pembangkit di antaranya:

1. Biaya tetap atau biaya yang mencakup biaya perawatan, operator, biaya pengadaan suku cadang, biaya pelumas dan administrasi.
2. Biaya bahan bakar.
3. Biaya *start up* yang diperlukan oleh pembangkit untuk transisi dari keadaan *off* ke *on*.

4. Biaya produksi, yang merupakan jumlah biaya *running cost* dan biaya *start up* dari setiap unit pembangkit.
5. Biaya daya cadangan, yang merupakan biaya yang dihitung untukantisipasi bila ada kegagalan operasi pada salah satu unit.

Setiap pembangkit memiliki karakteristik tersendiri saat beroperasi. Karakteristik *input-output* pembangkit menggambarkan hubungan antara *input* bahan bakar (Rp/jam) dan *output* yang dihasilkan pembangkit (MW). optimasi dapat dilakukan ketika mengetahui perbedaan karakteristik pada pembangkit, secara umum karakteristik *input-output* pembangkit didekati dengan fungsi polinomial orde dua yaitu :

$$F_i(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (2.9)$$

di mana :

F_i = biaya bahan bakar pembangkit termal ke i (Rp/jam)

P_i = output pembangkit termal ke i (MW)

a_i, b_i, c_i = konstanta *input-output* pembangkit termal ke i (Rp/MWh)

i = indeks pembangkit ke i (1, 2, 3,N)

Untuk mendapatkan konstanta *input-output* pada pembangkit termal menggunakan metode last square.

$$\begin{vmatrix} n & \sum P_1 & \sum P_1^2 \\ \sum P_1 & \sum P_1^2 & \sum P_1^3 \\ \sum P_1^2 & \sum P_1^3 & \sum P_1^4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum F_1 \\ \sum P_1 F_1 \\ \sum P_1^2 F_1 \end{vmatrix} \quad (2.10)$$

Fungsi total biaya pembangkit dalam sistem diformulasikan sebagai berikut :

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_N \quad (2.11)$$

$$F_T = \sum_i^N F_i(P_i) \quad (2.12)$$

di mana :

F_T = Total biaya pembangkit dalam sistem

$F_i(P_i)$ = fungsi biaya pembangkit ke i

N = banyaknya pembangkit

Penyelesaian matriks pada persamaan 2.10 yaitu dengan menggunakan metode *LU decomposition*, menggunakan persamaan berikut.

$$[A][X]=[B] \quad (2.13)$$

$$[I][A] = [L][U] \quad (2.14)$$

Matriks pada persamaan 2.10 di pecah dengan pengali matriks identitas sebagai berikut.

$$[I][A] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} b_{11} & b_{12} & b_{13} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{array} \right] \quad (2.15)$$

$$\text{keterangan, } [I] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & 1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

Proses konversi matriks $[I][A]$ menjadi matrik $[L][U]$ adalah dengan mengubah bilangan pada matriks menjadi,

$$[L][U] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} b_{11} & b_{12} & b_{13} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ b_{21}' & b_{22}' & b_{23}' & a_{21}' & a_{22}' & a_{23}' \\ b_{31}' & b_{32}' & b_{33}' & a_{31}' & a_{32}' & a_{33}' \end{array} \right] \quad (2.16)$$

Proses konversi matriks pada persamaan 2.14 mempengaruhi nilai dalam matriks, maka dalam proses mengubah nilai menggunakan persamaan *gauss elimination*, sebagai berikut:

$$a_{2n}' = a_{2n} - \frac{a_{12}}{a_{11}} a_{1n}, \text{ untuk } n = 1, 2, 3 \quad (2.17)$$

Proses konversi matriks [A] menjadi [U] pada persamaan 2.17 berpengaruh pada matriks [I], sehingga agar nilai dari kedua ruas tetap sama, matriks [I] diubah menjadi matriks [L] dengan persamaan sebagai berikut:

$$b_{2n}' = b_{21} + \frac{a_{12}}{a_{11}} b_{1n}, \text{ untuk } n = 1, 2, 3 \quad (2.18)$$

2.8 Penelitian Terkait

Tabel 2.7 Penelitian Terkait

No.	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan
1	<i>Dynamic Optimal Dispatch for Stand-alone Microgrid</i>	Yue Dua, Zhiyuan Qi, Guochen Yu. 2020	Peningkatan efisiensi dan keandalan pada sistem <i>microgrid</i> dengan menghindari turbin mikro gas yang sering beralih antara on-off yang mempengaruhi masa pakai turbin mikro.
2	<i>Optimal Generation Scheduling with Demand Side Management for Microgrid Operation</i>	(Wynn, Boonraksa, and Marungsri 2021)	Penjadwalan pembangkitan dan mengusulkan peningkatan sumber daya terbarukan, mengurangi konsumsi bahan bakar dan mempertimbangkan penurunan permintaan daya pada sistem <i>Microgrid</i> .
3	<i>Harnessing demand-side management benefit towards achieving a 100% renewable energy microgrid.</i>	(Kipngetich, Bode, and Elsayed 2020)	Perencanaan dan operasi <i>microgrid</i> yang digabungkan dengan strategi manajemen energi. Model yang terdiri dari turbin angin, solar sel dan sistem penyimpanan energi baterai. Output pembangkitan digunakan untuk menjadwalkan ulang sumber daya permintaan fleksibel untuk mengurangi ketidaksesuaian antara permintaan dan pasokan daya.