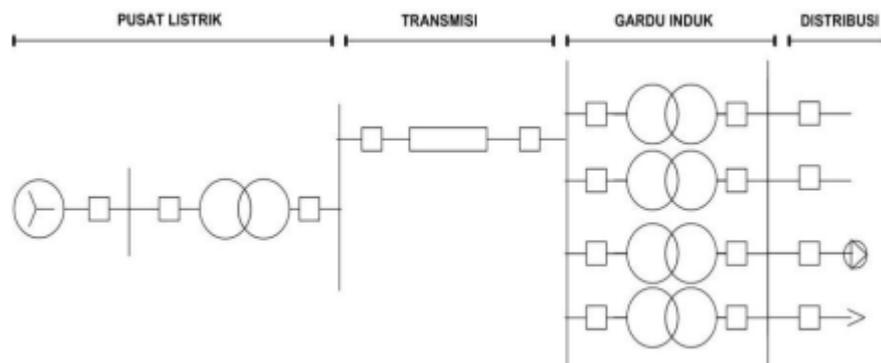


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah kumpulan komponen tenaga listrik yang satu sama lain saling terhubung sehingga merupakan sebuah kesatuan interkoneksi (Machfudiah, 2019). Komponen tenaga listrik tersebut yaitu pembangkitan, transmisi dan subtransmisi, distribusi, dan beban. Energi listrik dibangkitkan oleh pusat-pusat listrik, kemudian energi listrik disalurkan melalui saluran transmisi dan didistribusikan ke beban-beban melalui saluran distribusi (AL-QAEDI, 2018).



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik Sederhana

(Machfudiah, 2019)

2.2 Operasi Sistem Tenaga Listrik

Pembangkit-pembangkit listrik memiliki lokasi yang saling berjauhan satu sama lain dan terhubung satu sama lain melalui sistem transmisi yang luas untuk mendistribusikan tenaga listrik pada beban yang tersebar. Ini bisa dapat dikatakan sebagai sistem interkoneksi. Sebuah sistem tenaga listrik merupakan sebuah unit usaha dimana selain faktor teknis, faktor ekonomis juga diperhatikan karena pengaruhnya sangat dominan. Dalam pengeoperasian sistem tenaga listrik ini,

pendapatan dan pengeluaran harus dijaga agar tercipta kondisi yang seimbang sehingga dapat mencapai keuntungan yang layak. Pendapatan dalam sistem tenaga listrik ini berdasarkan jumlah penjualan listrik ke konsumen dan biasanya dalam bentuk pemakaian energi (kWh) serta harganya yang diatur dalam sistem tarif tertentu (di Indonesia menggunakan Keppres). Sedangkan pengeluaran dalam mengoperasikan sistem tenaga listrik ini meliputi: belanja pegawai, belanja barang dan jasa, pemeliharaan dan penyusutan, penelitian atau pengembangan, pajak, bahan baku energi (BBM, Batubara, Nuklir, Air, dsb) (AL-QAEDI, 2018).

Bagian terbesar dari pembiayaan adalah untuk bahan baku energi (sekitar 80 %), selain itu naik/turunnya pemakaiannya selalu terkait dari penggunaan energi listrik oleh beban. Pembiayaan terbesar ini terletak di pembangkit – pembangkit, sehingga sangat diperlukan cara pengoperasian total pembangkitan yang efisien. Dengan terhubungnya banyak pembangkit kedalam sebuah sistem interkoneksi memberikan kemungkinan pengaturan output setiap pembangkit juga biaya pembangkitannya dapat diatur pada tingkat yang rendah/optimum.

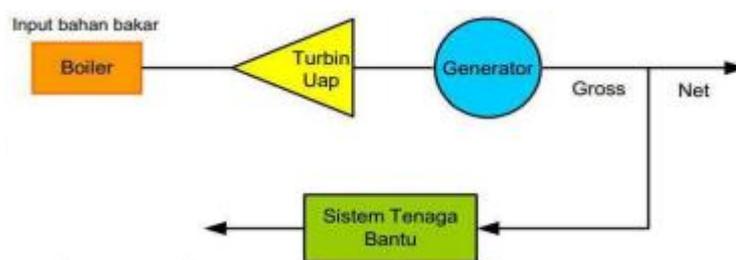
2.3 Pembangkit Listrik

Pusat listrik umumnya terbagi menjadi dua, yaitu pusat tenaga listrik menggunakan energi fosil dan pusat tenaga listrik menggunakan energi baru dan terbarukan. Pusat tenaga listrik menggunakan energi fosil (*fossil fuel*) pada umumnya melibatkan proses panas (*thermal*) dalam pembangkitan tenaga listriknya, sumber energi yang didapat berasal dari bumi, energi tersebut dapat habis pakai dan tidak dapat dimanfaatkan kembali. Bahan dasar dari pembangkit ini meliputi minyak, gas, batu bara, dan nuklir.

Pusat tenaga pada sistem tenaga listrik menggunakan energi baru dan terbarukan (*new and renewable energy*) pada dasarnya sumber energi didapat dari energi baru dan tidak akan habis pakai pemanfaatannya. Sumber energinya dibagi menjadi dua, yaitu sumber energi yang dapat didaur ulang (*renewable*) seperti air, biomassa, biogas, kayu bakar dan Sumber energi yang tidak akan habis pakai (*non-depleted*) seperti energi panas bumi, energi gelombang laut, energi pasang surut, dan energi matahari.

2.3.1 Unit Pembangkit Termal

Secara umum, unit pembangkit termal terdiri dari boiler, turbin, dan generator yang digunakan untuk mengubah bahan bakar menjadi energi listrik.



Gambar 2.2 Sistem Pembangkit Termal

(AL-QAEDI, 2018)

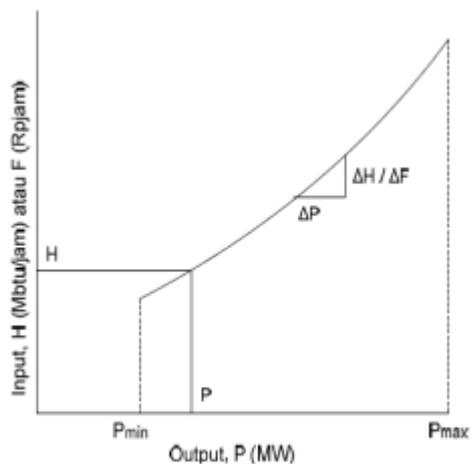
Dari gambar 2.2 di atas, maka dapat diketahui beberapa karakteristik dari unit pembangkit termal.

a. Karakteristik Input Output Pembangkit Termal

Karakteristik input-output pembangkit menggambarkan hubungan antara input bahan bakar (Rp/jam) dan output yang dihasilkan oleh pembangkit (MW). Dengan mengetahui perbedaan karakteristik di antara semua pembangkit yang ada, optimasi

pengoperasian pembangkit dapat dilakukan. Secara umum, karakteristik input-output pembangkit didekati dengan fungsi polynomial.

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (2.1)$$



Gambar 2.3 Kurva Karakteristik Input-Output Pembangkit Termal

(Pratama et al., 2017)

dengan:

$F(P)$ atau H = input bahan bakar (Btu/jam)

F = 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/jam)

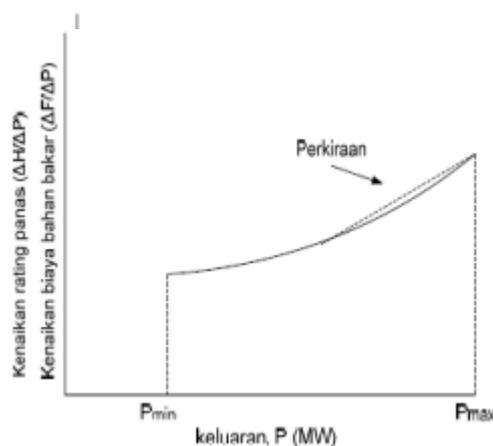
i = indeks pembangkit termal ke i ($i=1, 2, 3, \dots, N$)

Gambar 2.3 di atas menunjukkan karakteristik input dan output dari unit termal dalam bentuk yang ideal. Input dari pembangkit ditunjukkan pada sumbu tegak yaitu energi panas yang dibutuhkan dalam bentuk Mbtu/h (Million Of Btu Per Hour) karena digunakan satuan British Temperatur Unit (apabila menggunakan SI menjadi MJ/h atau Kcal/H) atau biaya total per jam (Rp/jam). *Output* dari pembangkit ditunjukkan pada sumbu mendatar yaitu daya listrik, yang memiliki batas-batas kritis operasi yaitu daya maksimum dan minimum dari pembangkit

(Hadi Saadat, 1998).

b. Karakteristik Kenaikan Biaya atau Panas Pembangkit Termal

Karakteristik laju kenaikan panas yang dapat juga dikatakan sebagai karakteristik kenaikan biaya. Bentuk karakteristik laju kenaikan panas ini dapat dilihat pada gambar 2.4. Karakteristik ini merupakan suatu kemiringan (slope) dari karakteristik input dan output. Pada karakteristik ini ditunjukkan nilai Btu per kWh atau Rp/kWh terhadap daya keluaran dalam satuan MW. Karakteristik ini lebih lanjut digunakan untuk perhitungan pembebanan ekonomis dari unit pembangkit. Jika persamaan input-output unit pembangkit dinyatakan dalam pendekatan (aproksimasi) dengan menggunakan persamaan kuadrat, maka karakteristik kenaikan biaya akan mempunyai bentuk garis lurus (Hadi Saadat, 1998).



Gambar 2.4 Kurva Karakteristik Kenaikan Biaya Atau Panas Pembangkit Termal

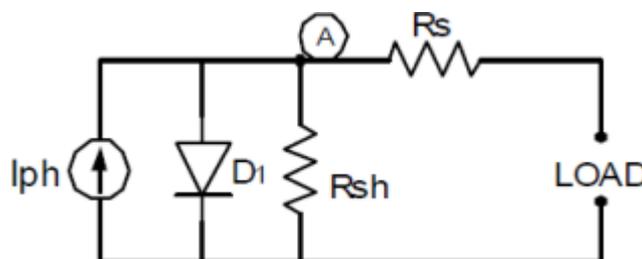
(AL-QAEDI, 2018)

2.3.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

PLTS adalah kumpulan panel surya, yaitu alat yang terdiri dari suatu sel yang terbuat dari bahan semikonduktor yang dapat melepas elektron. Prinsip kerja panel surya adalah dengan memanfaatkan teori cahaya sebagai partikel, selama

cahaya menyinari bahan semikonduktornya maka sel surya akan menghasilkan energi listrik, dan ketika cahaya berhenti menyinari, sel surya berhenti menghasilkan listrik. Sebagaimana diketahui bahwa cahaya baik yang tampak maupun yang tidak tampak memiliki dua buah sifat yaitu sebagai gelombang dan sebagai partikel yang disebut foton (Winarno & Natasari, 2017).

Sel surya bergantung pada efek panel surya untuk menyerap energi matahari dan menyebabkan arus mengalir antara dua lapisan bermuatan yang berlawanan, ketika memproduksi panel surya, produsen harus memastikan bahwa sel surya saling terhubung secara elektrik antara satu dengan yang lain pada sistem tersebut (Faizal & Setyaji, 2016). Persamaan eksponensial untuk memodelkan sel surya diturunkan dari hukum fisika untuk pn junction dan secara umum diterima sebagai representasi karakteristik sel ditunjukkan oleh persamaan berikut.



Gambar 2.5 Rangkaian Pengganti Sel Surya

(Faizal & Setyaji, 2016)

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (2.2)$$

Nilai dari I_{ph} bergantung pada nilai dari radiasi (λ) dan suhu photovoltaic (T).

Berikut ini adalah persamaan yang merepresentasikan

$$I_{ph} = [I_{sc} + Ki(T - 298)] \frac{\lambda}{1000} \quad (2.3)$$

ID merupakan arus yang melalui dioda dan memiliki persamaan

$$ID = Is \left(e^{\frac{q(V+I.R_s)}{N_s.k.T/q}} \right) \quad (2.4)$$

Is merupakan arus saturasi dari photovoltaic dan memiliki persamaan

$$Is = Irs \left[\frac{T}{Tr} \right]^3 e^{\left[\left(\frac{1}{Tr} - \frac{1}{T} \right) \frac{q.Eg}{A.k} \right]} \quad (2.5)$$

Irs merupakan arus reverse saturation yang didapat dari persamaan

$$Irs = \frac{Isc}{\frac{q.Voc}{e^{N_s.A.k.Tr-1}}} \quad (2.6)$$

Ish merupakan arus shunt dan didapat dari persamaan

$$Ish = Np \frac{(V+I.R_s)}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

Maka persamaan dapat ditulis seperti persamaan berikut :

$$I = Iph - Is \left(e^{\frac{q(V+I.R_s)}{N_s.k.T/q}} \right) - \frac{(V+I.R_s)}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

Dimana

Iph = Arus hasil konversi energi (A)

Is = Arus saturation dari dioda (A)

q = Muatan elektron ($1,602 \times 10^{-19}$ C)

V = Tegangan keluaran photovoltaic (V)

I = Arus keluaran photovoltaic (A)

k = Konstanta Boltzman ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K)

T = Suhu photovoltaic (K)

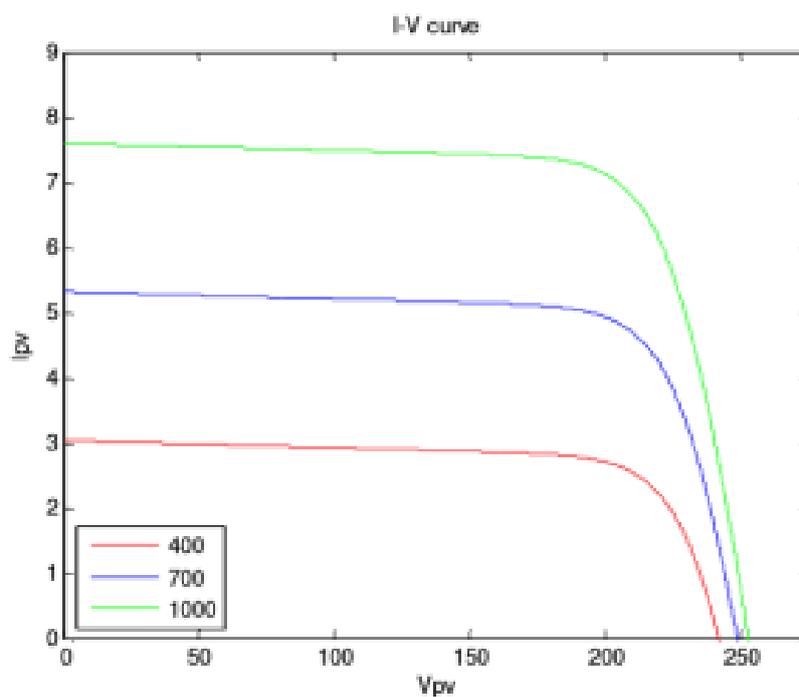
N = Faktor idealitas dari dioda

R_s = Tahanan seri dari dioda (Ω)

R_{sh} = tahanan shunt dari dioda (Ω)

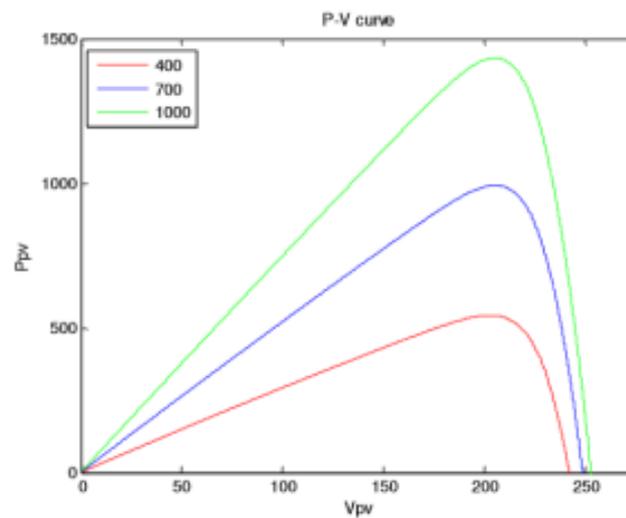
N_s = Jumlah sel PV

Berdasarkan persamaan karakteristik *photovoltaic* tersebut dapat diperoleh kurva hubungan antara arus keluaran (I) dan tegangan keluaran (V) serta daya keluaran (P) dengan tegangan keluaran (V) seperti dalam gambar.



Gambar 2.6 Kurva Karakteristik I-V pada *Photovoltaic*

(Zulhelmi, 2017)



Gambar 2.7 Kurva Karakteristik P-V pada *Photovoltaic*

(Zulhelmi, 2017)

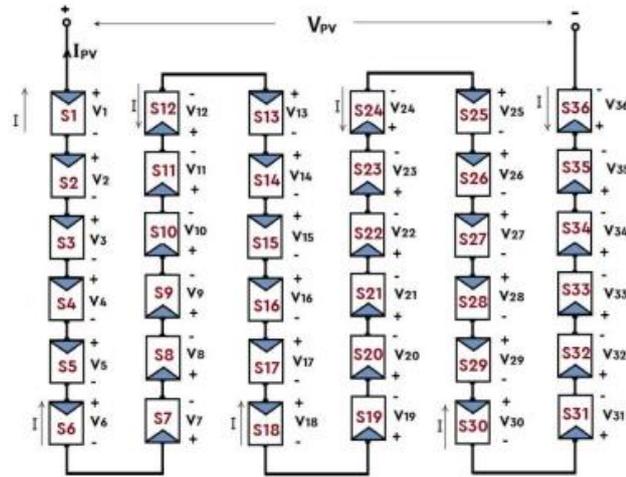
Pada dasarnya daya yang dihasilkan oleh satu *photovoltaic* saja tidak cukup besar untuk memenuhi kebutuhan listrik. Oleh karena itu, beberapa sel *photovoltaic* biasanya digabungkan ke dalam suatu modul yang dihubungkan baik secara seri maupun paralel tergantung pada konfigurasi yang digunakan (Zulhelmi, 2017). Bila terdapat sejumlah N_p (modul yang terpasang paralel) dan sejumlah N_s (modul yang terpasang seri), maka modul tersebut memiliki persamaan karakteristik seperti persamaan

$$I = N_p(I_{ph} - I_D - I_{sh}) \quad (2.9)$$

$$I = N_p \left(I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(V+I.R_s)}{N_s.k.T/q}} \right) - \frac{(V+I.R_s)}{R_{sh}} \right) \quad (2.10)$$

Konfigurasi Array PV Surya dilakukan untuk menentukan daya output yang diinginkan dengan bantuan hukum Kirchhoff sederhana (BALARAJU & Chengaiyah, 2020).

Hukum kirchhoff konfigurasi seri sederhana



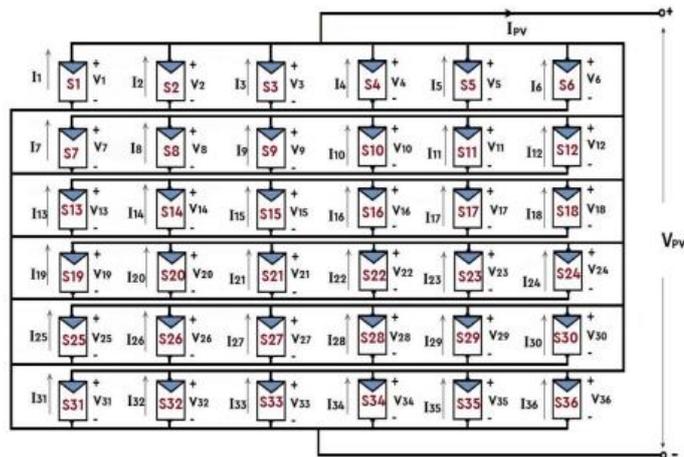
Gambar 2.8 Rangkaian Seri Pada Modul *Photovoltaic*

(BALARAJU & Chengaiah, 2020)

$$V_{pv} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots V_{n+1} \tag{2.11}$$

$$I_{pv} = I \tag{2.12}$$

Hukum kirchhoff konfigurasi paralel sederhana



Gambar 2.9 Rangkaian Paralel Pada Modul *Photovoltaic*

(BALARAJU & Chengaiah, 2020)

$$I_{pv} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots I_{n+1} \tag{2.13}$$

$$V_{pv} = V \quad (2.14)$$

Untuk menentukan jumlah daya pada panel surya di gunakan persamaan

$$P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv} \quad (2.15)$$

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

$$E_T = 1,05 \times P_T \times h \quad (2.16)$$

E_T = Energi Total (kWh)

P_T = Daya (Watt)

h = Lamanya pemakaian beban (jam)

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

$$PV_{area} = \frac{E_T}{G_{av} \times TCF \times \eta_{PV} \times \eta_{out}} \quad (2.17)$$

dimana :

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 Coefficient Factor* (%)

η_{PV} = Efisiensi Panel Surya (%)

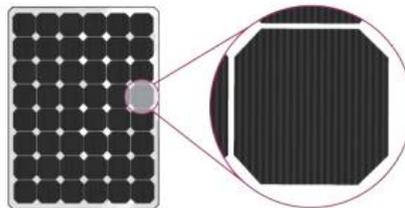
η_{out} = Efisiensi keluaran (asumsi 90%)

2.3.2.1 Jenis Modul Panel Surya

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

1) *Monocrystalline*

Jenis mono-crystalline merupakan panel yang paling efisien yang dihasilkan dengan teknologi terkini dan menghasilkan daya listrik persatuan luas yang paling tinggi. Monokristal dirancang untuk penggunaan yang memerlukan konsumsi listrik besar pada tempat-tempat yang beriklim ekstrim. Panel surya ini memiliki efisiensi sampai dengan 15%. Kelemahan dari panel jenis ini adalah tidak akan berfungsi baik ditempat yang cahaya matahari kurang (teduh). Efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan (Jamaludin, 2022)

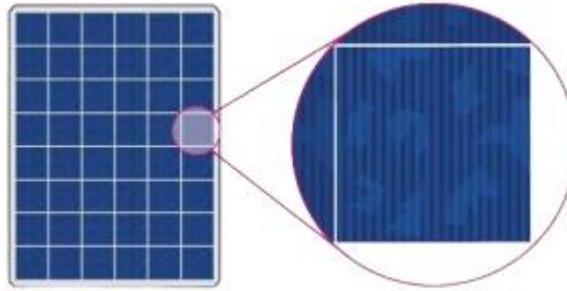


Gambar 2.10 Panel Surya Monokristal

(Jamaludin, 2022)

2) *Polycrystalline*

Polycrystalline merupakan modul surya yang memiliki susunan kristal acak karena difabrikasi dengan proses pengecoran. Jenis modul ini memiliki efisiensi yang rendah jika dibandingkan dengan *Monocrystalline* sekitar 13-18% karena bahannya merupakan campuran silikon dan material lainnya



Gambar 2.11 Panel Surya Polikristal

(Jamaludin, 2022)

3) *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.



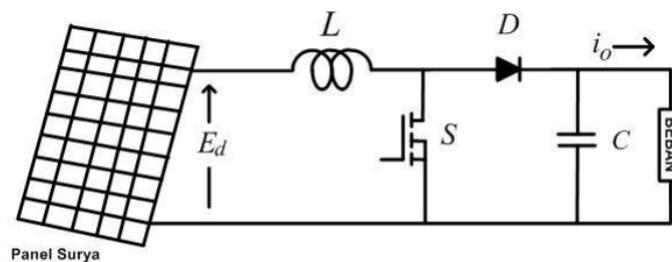
Gambar 2.12 Panel Surya Thin-Film

(Jamaludin, 2022)

2.4 *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)

Maximum Power Point Tracking atau yang biasa disingkat MPPT, adalah sebuah sistem elektronis yang mengoperasikan modul *photovoltaic* (PV) atau modul sel surya agar dapat menghasilkan daya maksimal yang bisa diproduksi oleh modul sel surya. MPPT bukan merupakan sistem *tracking* mekanis yang secara fisik menggerakkan modul agar mengarah langsung ke matahari. MPPT merupakan

sistem elektronis dengan sebuah algoritma yang secara keseluruhan mengubah-tubah titik operasi elektronis modul sel surya sehingga dapat mengirim daya maksimal yang tersedia. Dari daya tambahan yang terkumpul yang berasal dari modul sel surya, sehingga arus pengisian baterai dapat ditingkatkan. MPPT dapat juga dihubungkan dengan sistem *tracking* mekanis, tetapi kedua sistem ini benar-benar sangat berbeda (Faizal & Setyaji, 2016).



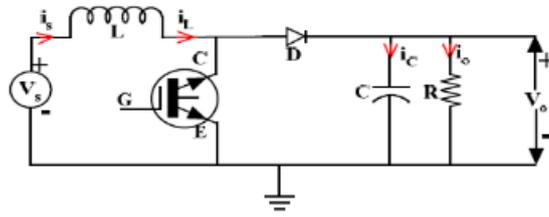
Gambar 2.13 Rangkaian *Maximum Power Point Tracking* pada Panel Surya

Dimana rangkaian elektronik yang terhubung ke panel surya tersebut adalah rangkaian *DC-DC boost converter*. Pada umumnya *DC-DC boost converter* dalam sebuah sistem MPPT digunakan untuk menggeser daya operasi dari photovoltaic menjadi titik daya maksimalnya, sesuai kemampuan pada setiap perubahan level intensitas penyinaran matahari.

2.5 DC-DC Boost Converter

Boost Converter (Step-Up Converter) merupakan DC to DC *converter* yang menghasilkan tegangan *output* yang jauh lebih besar dari tegangan *inputnya*. *Boost Converter* ini termasuk ke dalam rangkaian *Switched-Mode Power Supply* (SMPS) yang setidaknya terdapat dua switch semikonduktor seperti dioda dan transistor serta setidaknya satu komponen penyimpan energi seperti kapasitor atau induktor atau kombinasi keduanya. Filter yang dibuat dengan kapasitor atau terkadang juga

dengan induktor biasanya disimpan pada output dari konverter tersebut untuk mengurangi tegangan ripple (Rashid, 2014).



Gambar 2.14 Rangkaian Boost Converter

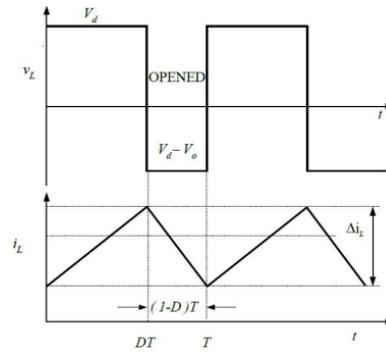
(Faizal & Setyaji, 2016)

Jika saklar dalam kondisi tertutup arus akan mengalir ke induktor sehingga menyebabkan energi yang tersimpan di induktor naik. Saat saklar terbuka, arus induktor akan mengalir menuju beban melewati dioda sehingga energi yang tersimpan di induktor akan turun. Rasio antara tegangan keluaran dan tegangan masukan sebanding dengan rasio antara periode pensaklaran dan waktu pembukaan saklar, yang disebut dengan *duty cycle*. Jika $D = \text{duty cycle}$, maka hubungan antara tegangan masukan V_d dan tegangan keluaran V_o dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1-D} \quad (2.18)$$

Nilai *duty cycle* akan mempengaruhi nilai tegangan output. Perbandingan *duty cycle* antara keadaan saklar terbuka dan saklar tertutup.

Tegangan yang dihasilkan merupakan nilai rata-rata dari keadaan saklar yang terbuka dan tertutup.



Gambar 2.15 Pengaruh Duty Cycle Pada Boost Converter

(Fathurachman et al., 2016)

Teknik pemberian pulsa pada *DC-DC Converter* menggunakan metode *pulse width modulation* (PWM) yang berfungsi sebagai *switching power supply* untuk mengontrol *on* dan *off* saklar. Pada PWM *switching* terdapat suatu *switching* frekuensi yang konstan. *Switch control signal* dengan control *ON* atau *OFF* dihasilkan dengan membandingkan suatu level tegangan *control signal* dengan suatu bentuk gelombang berulang. Frekuensi tetap konstan dalam suatu kontrol *Pulse Width Modulator* (PWM) dengan batasan rentang frekuensi yang ditentukan (Kazimierczuk, 2008).

Dalam perancangan *boost converter* untuk menentukan parameter setiap komponen dapat menggunakan persamaan berikut. (Hauke, 2014).

Langkah pertama untuk menghitung arus sakelar

$$D = 1 - \frac{V_{in(min)} \times n}{V_{out}} \quad (2.19)$$

Langkah selanjutnya adalah menentukan arus riak induktor

$$\Delta I_L = \frac{V_{in(min)} \times D}{L \times f_s} \text{ atau bisa juga } = 0.01 \times I_{maxout} \times \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (2.20)$$

Sekarang harus ditentukan arus keluaran maksimum

$$I_{out} = \left(I_{UM(\min)} - \frac{\Delta IL}{2} \right) \times (1 - D) \text{ atau bisa juga } = \frac{P}{V_{out}} \quad (2.21)$$

Lalu menentukan induktor

$$L = \frac{V_{in} \times (V_{out} - V_{in})}{\Delta IL \times f_s \times V_{out}} \quad (2.22)$$

Menentukan resistor

$$R = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (2.23)$$

Menentukan kapasitor

$$C = \frac{I_{out} \times D}{f_s \times \Delta V_{out}} \text{ dengan } \Delta V_{out} = 0.001 \times V_{out} \quad (2.24)$$

Dimana :

D = Duty cycle

$V_{in(\min)}$ = Tegangan input minimum (V)

V_{out} = Tegangan keluaran yang diinginkan (V)

n = Efisiensi konverter, misal diperkirakan 85%

f_s = Frekuensi switching minimum dari konverter

ΔIL = Arus riak induktor (A)

L = Nilai induktor (L)

I_{maxout} = Arus keluaran maksimum (A)

$I_{UM(\min)}$ = Nilai minimum dari arus (diberikan dalam lembar data)

R = Nilai resistor (Ohms)

C = Nilai kapasitor (F)

2.6 Fuzzy Logic

Saat ini metode *fuzzy logic* merupakan metode yang mulai banyak digunakan. Pada sistem MPPT untuk sel surya *input* dari *fuzzy logic* adalah *error*, E dan perubahan dari *error*, ΔE . Penggunaan MPPT yaitu untuk mengatur *duty cycle* dari konverter yang digunakan dengan mengatur sudut penyulutan mosfet dengan sinyal PWM agar daya yang dihasilkan maksimal dengan menggunakan *soft switching*. Nilai *error* diperoleh dari pembagian antara perbedaan daya dengan perbedaan tegangan $\Delta P/\Delta V$, yang mana ΔP adalah selisih antara daya saat ini dengan daya sebelumnya, dan ΔV adalah selisih antara tegangan saat ini dengan tegangan sebelumnya. Dan nilai delta *error* diperoleh dari selisih antara nilai *error* saat ini dengan *error* sebelumnya (Trigun et al., 2022). Pemilihan *error* sepenuhnya bergantung pada pengetahuan pembuat sistem pada jenis aplikasi yang dikerjakan untuk sistem PV sel surya. Kebanyakan akan memilih slope dari kurva P-V, dP/dV sebagai persamaan *error* karena nilai nol didapat dari MPP (Jusoh et al., 2014).

$$E(k) = [P(k) - P(k-1)] / [V(k) - V(k-1)] \quad (2.25)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-) \quad (2.26)$$

Dimana,

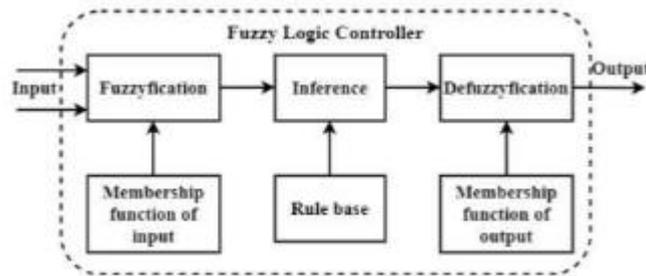
$P(k)$ = Daya sekarang

$P(k-1)$ = Daya Sebelumnya

$V(k)$ = Tegangan Sekarang

$V(k-1)$ = Tegangan Sebelumnya

Terdapat beberapa tahap dalam perancangan kontrol menggunakan algoritma *fuzzy logic*. Tahapan tersebut dapat dilihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Alur Perancangan Kontrol *Fuzzy Logic*

Contoh rule base pada lagoritma *fuzzy logic* ditampilkan pada tabel 2.1

Tabel 2.1 *Rule Base Table*

(Jusoh et al., 2014)

E \ dE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Tabel 2.1 menunjukkan aturan dasar dari *boost converter*, dimana *output* nya adalah perubahan dari tegangan referensi. Variabel input seperti tegangan dan arus di beri label (NB: Negative Big, NS: Negative Small, ZO: Zero, PS: Positive Small, PB: Positive Big).

Keuntungan dari algoritma *fuzzy logic* yaitu tidak memerlukan persamaan matematika dalam perancangan sistem, mampu bekerja dengan input yang tak terbatas. Kelemahannya yaitu penentuan *input* dan *output* berdasarkan pengalaman dari pengamatan yang telah dilakukan sebelumnya.

2.7 *Perturb and Observe (P&O)*

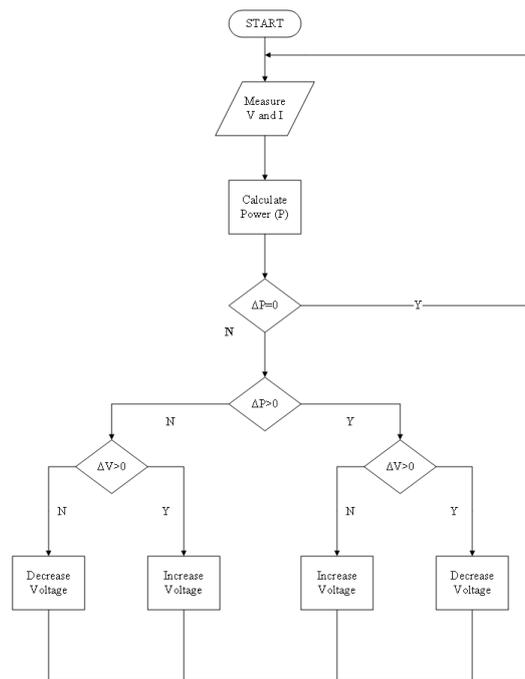
Metode *Perturb and Observe* terdiri dari dua tahap, *perturb* yaitu mengubah tegangan referensi (V_{ref}) dan *observe* yaitu menghitung perubahan daya akibat aksi *perturb* sebelumnya. Jika daya terbaru lebih besar dari sebelumnya, siklus kerja akan ditingkatkan sampai MPP ditemukan.

Metode *Perturb and Observe* terdiri dari dua tahap, *perturb* yaitu mengubah tegangan referensi (V_{ref}) dan *observe* yaitu menghitung perubahan daya akibat aksi *perturb* sebelumnya. Jika perubahan daya positif maka *perturb* selanjutnya akan tetap pada arah yang sama, sedangkan jika perubahan daya negatif maka *perturb* akan dibalik.

Tabel 2.2 Aturan *Perturb and Observe*

Perturb	Perubahan Daya	Perturb Selanjutnya
Positif	Positif	Positif
Positif	Negatif	Negatif
Negatif	Positif	Negatif
Negatif	Negatif	Positif

Perturb and Observe disebut juga dengan metode *hill climbing*, yang mengacu pada karakteristik P-V dari sel surya.



Gambar 2.17 *Flowchart Algoritma Perturb and Observe*

(ALHarbi & John, 2017)

2.8 Optimal Power Flow (OPF)

Metode OPF merupakan metode untuk menentukan kondisi operasi optimal dari suatu sistem tenaga listrik. Faktor mana yang akan dicari titik optimal, akan dirumuskan dan diselesaikan dengan menggunakan algoritma optimasi yang sesuai, seperti metode Newton Raphson. Contoh batasan-batasan yang harus diperhatikan dalam metode OPF ini yaitu seperti pengaturan pembangkit listrik dan besar pembebanan (Gama et al., 2012). OPF atau aliran daya optimal tidak mudah dalam hal program matematika. Beberapa metode yang digunakan, yaitu :

1. Metode Iterasi Lamda : Salah satu metode dari banyak standar pada economic dispatch, dalam melakukan pengiterasian nilai lamda sampai diperoleh nilai lamda yang dikehendaki.

2. Metode Gradient : Metode ini lambat dalam konvergen dan sulit dalam memecahkan masalah dari inequality constraint.
3. Metode Newton : Kemungkinan untuk konvergen yang sangat cepat, tetapi memiliki masalah terhadap inequality constraint.
4. Metode Linear Programming (LPOPF) : Salah satu metode yang terkenal dalam penggunaan secara umum. Mudah dalam mengatasi masalah dari inequality constraint . Fungsi objektif nonlinear dan masalah constraint dapat diatasi dengan linearisasi.
5. Metode Interpoint : Salah satu juga dari metode OPF yang terluas dan terkenal. Mudah untuk mengatasi masalah dari inequality constraint.

2.8.1 Metode *Newton-Raphson*

Salah satu cara yang dipakai dalam menyelesaikan perhitungan aliran daya adalah metode Newton-Raphson. Metode Newton- Raphson merupakan prosedur pendekatan berurutan berdasarkan estimasi awal yang tidak diketahui dan merupakan penggunaan deret Taylor. Jumlah iterasi yang dibutuhkan ditentukan berdasarkan ukuran sistem. Untuk mencari daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) sebagai berikut :

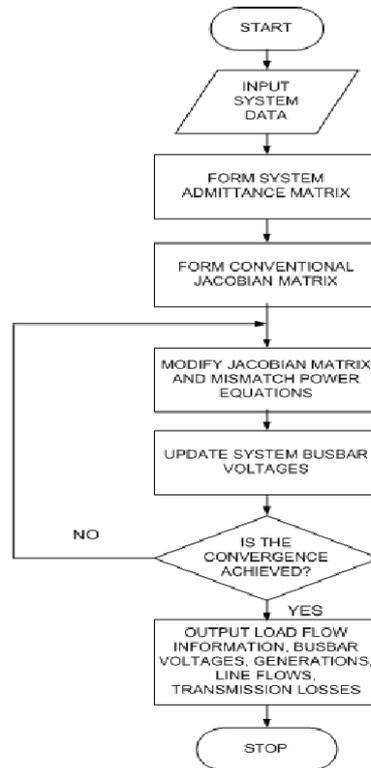
$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.25)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.26)$$

Dalam metode ini persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar. Deret Taylor seperti pada persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \dots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Matriks Jacobian memberikan perbandingan linear antara perubahan pada sudut tegangan ($\Delta\delta_i^{(k)}$) dan tegangan ($\Delta|V_i^{(k)}|$) dengan sedikit perubahan pada daya aktif ($\Delta|P_i^{(k)}|$) dan daya reaktif ($\Delta|Q_i^{(k)}|$).



Gambar 2.18 Flowchart Solusi OPF Metode Newton Rapshon

(Adepoju & Komolafe, 2011)

2.9 Automatic Generation Control (AGC)

Sistem kontrol dan mekanisme yang melakukan kontrol frekuensi beban disebut dengan Automatic Generation Control (AGC). Dalam sistem tenaga listrik

masal saat ini, AGC digunakan untuk bertukar daya berdasarkan jadwal tertentu untuk memenuhi kebutuhan. Hal ini memberikan kontinuitas layanan, keandalan, dan mengurangi jumlah total generator yang bekerja. Menjaga deviasi frekuensi dalam kisaran yang diizinkan adalah peran utama dari kontrol pembangkitan otomatis, perubahan frekuensi terjadi karena beban sistem bervariasi secara acak sepanjang hari sehingga perkiraan yang tepat dari permintaan daya yang sebenarnya tidak dapat dipastikan. (Rahimi & Virginia, 2013). AGC adalah nama yang diberikan untuk sistem kontrol yang memiliki tiga tujuan utama:

- 1) Untuk mempertahankan frekuensi sistem pada atau sangat dekat dengan nilai nominal yang ditentukan.
- 2) Untuk mempertahankan nilai yang benar dari pertukaran daya antar kontrol.
- 3) Untuk mempertahankan pembangkitan setiap unit pada nilai yang paling ekonomis. (mis, 50 Hz).

Perhitungan AGC dilakukan dengan perhitungan komputer otomatis di pusat kendali energi.

Fungsi pengatur kecepatan adalah untuk memantau terus menerus kecepatan turbin-generator dan untuk mengontrol katup throttle yang menyesuaikan aliran uap ke turbin (atau posisi gerbang di turbin hidro) untuk menanggapi perubahan "kecepatan sistem" atau frekuensi.

$$R_u = \frac{(f_2 - f_1)/f_R}{P_{GR}/S_R} \text{ per unit} \quad (2.28)$$

Dimana :

$$R_u = \text{Speed Droop}$$

f_2 = Frekuensi tanpa beban (Hz)

f_1 = Frekuensi pada keluaran megawatt terukur (Hz)

P_{gR} = Keluaran Megawatt (MW)

f_R = Frekuensi pengenalan unit (Hz)

S_R = Megawatt dasar (MW)

Ketika k unit generating beroperasi secara paralel pada sistem, karakteristik penurunan kecepatan mereka menentukan bagaimana perubahan beban dibagi di antara mereka dalam keadaan stabil.

$$\Delta P_{gK} = - \frac{S_{RK}}{R_{Ku}} \cdot \frac{\Delta f}{f_R} \quad (2.29)$$

$$\Delta P = - \left(\frac{S_{R1}}{R_{1u}} + \dots + \frac{S_{Ri}}{R_{iu}} + \dots + \frac{S_{RK}}{R_{Ku}} \right) \cdot \frac{\Delta f}{f_R} \quad (2.30)$$

$$\frac{\Delta f}{f_R} = - \frac{\Delta P}{\left(\frac{S_{R1}}{R_{1u}} + \dots + \frac{S_{Ri}}{R_{iu}} + \dots + \frac{S_{RK}}{R_{Ku}} \right)} \text{ per unit} \quad (2.31)$$

dengan mensubstitusikan dari persamaan, kita menemukan output tambahan dari unit i

$$P_{gi} = \frac{S_{Ri}/R_{iu}}{\left(\frac{S_{R1}}{R_{1u}} + \dots + \frac{S_{Ri}}{R_{iu}} + \dots + \frac{S_{RK}}{R_{Ku}} \right)} \cdot \Delta P \text{ MW} \quad (2.32)$$

2.10 Economic Dispatch (ED)

Economic dispatch (ED) yaitu merupakan skema pada sistem tenaga listrik dengan menganalisis aliran daya optimal yang dilakukan untuk meminimalisir biaya serta mendapatkan biaya yang ekonomis dari operasi pembangkitan. Pada ED, unit-unit pembangkit termal yang terdapat pada sistem dibagi secara optimal

sehingga pada biaya operasi menjadi lebih minim, namun total beban yang diminta tetap dapat dipenuhi dengan memperhatikan hambatan-hambatan teknis serta operasional dari tiap unit pembangkit. Dalam pengoperasiannya setiap dari unit pembangkit termal memiliki kriteria dan karakteristik yang berbeda-beda. Kriteria input dan output dari pembangkit memperlihatkan suatu hubungan antara input biaya bahan bakar (\$/Mbtu) dan output yang dihasilkan dari unit pembangkit (MW). Unit pembangkitan dapat dilakukan optimasi pengoperasian dengan memahami perbedaan karakteristik dari seluruh pembangkit (Dzikra & Budiman, 2019). Secara umum, karakteristik input dan output unit pembangkitan diselesaikan dengan menggunakan fungsi polinomial orde dua, yaitu sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$F_i(P_i) = \alpha_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (2.33)$$

Dimana,

F_i = Biaya bahan bakar unit i .

i = Masing-masing unit pembangkit.

α_i, b_i, c_i = Koefisien biaya bahan bakar dari unit i .

P_i = Daya yang ditentukan dari unit i .

Jadi, biaya total untuk seluruh unit pembangkit dalam pembangkitan listrik terdapat dalam persamaan (13). Dan untuk meminimalisasi penggunaan biaya bahan bakar pada pembangkitan total diperlukan nilai daya yang optimal dan dapat diselesaikan dengan persamaan (14).

$$F_t = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (2.34)$$

Dimana,

F_t = Total biaya bahan bakar.

i = Masing-masing unit pembangkit.

n = Koefisien biaya bahan bakar dari unit i .

P_i = Pembangkit dari unit i .

$$\min F_t = \sum_{i=1}^n (\alpha_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad (2.35)$$

Dimana,

$\min F_i$ = Minimal total biaya bahan bakar.

i = Masing-masing unit pembangkit.

α_i, b_i, c_i = Koefisien biaya bahan bakar dari unit i .

P_i = Daya yang ditentukan dari unit i .

2.10.1 Cubic Cost Model

Merupakan metode perhitungan ED sederhana dengan memanfaatkan persamaan karakteristik generator. Persamaan *cubic cost model* ditampilkan sebagai berikut :

$$F_i(P_i) = \text{IndFixedCost} + (\alpha_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + d_i P_i^3) \times \text{UnitFuelCost} \quad (2.36)$$

Dimana,

F_i = Biaya bahan bakar unit i .

i = Masing-masing unit pembangkit.

α_i = Koefisien biaya tetap (*dependent cost*) bahan bakar dari unit i.

b_i, c_i, d_i = Koefisien yang digunakan untuk memodelkan input-output (I/O)

P_i = Daya yang ditentukan dari unit i.

IndFixedCost = Biaya tetap independen bahan bakar.

UnitFixedCost = Biaya bahan bakar yang dinyatakan dalam \$/MBtu

Nilai *UnitFixedCost* bervariasi tergantung pada bahan bakar yang digunakan dalam generator. Nilai tipikalnya adalah \$1,25/MBtu untuk batu bara, dan \$2/MBtu untuk gas alam (Ziane & Benhamida, 2016).

2.11 Batasan-Batasan Dalam Pembangkitan Tenaga Listrik

Pengoperasian pembangkit tenaga listrik yang ekonomis harus memenuhi batasan-batasan atau constraints yang ada. Dalam penelitian ini *constraints* yang digunakan adalah *equality constraints* dan *inequality constraints*.

Equality constraint merupakan batasan dari kesetimbangan daya yang dihasilkan saat pengoperasian unit pembangkit, yang mengharuskan daya total yang dihasilkan oleh setiap unit pembangkit harus sesuai dengan jumlah kebutuhan beban konsumen, yang dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_R \quad (2.37)$$

Dimana,

P_i = Daya output pembangkit.

P_R = Total beban pada sistem.

Inequality constraint merupakan batasan yang mengharuskan daya output dari setiap unit pembangkit yang ada lebih besar atau sama dengan daya minimum yang diperbolehkan dan juga lebih kecil atau sama dengan daya maksimum yang diperbolehkan oleh batasan yang telah ditentukan pada tiap unit pembangkit (Dzikra & Budiman, 2019). Yang dapat dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max} \quad (2.38)$$

Dimana,

$P_{i \min}$ = Batas minimal daya pembangkitan unit i.

$P_{i \max}$ = Batas maksimal daya pembangkitan unit i.

P_i = Daya pembangkitan unit i.

Kemudian batasan pembangkitan oleh sel surya dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$P_V(t) \leq P_{V \max}(t) \quad (2.39)$$

Dimana,

$P_V(t)$ = Daya yang dibangkitkan oleh sel surya.

$P_{V \max}(t)$ = Daya pembangkitan maksimum dari sel surya.

2.12 Penelitian Terkait

Tabel 2.3 State of The Art

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan
1.	<i>Economic Dispatch and Cost Analysis on a Power System Network</i>	Suresh, Velamuri Sreejith, S. 2015	Menyajikan model ED yang dikembangkan untuk sistem tenaga listrik yang

	<i>Interconnected Solar Farm</i>	<i>With</i>		terdiri dari unit termal dan pertanian surya.
2.	Analisis <i>Dispatch</i> Pembangkit Sistem 500 Kv Jawa Bali Menggunakan <i>Firefly Algorithm</i>	<i>Economic</i> Pada Termal Metode	Al-Qaedi, Muhammad Rahmatullah. 2018	Membahas permasalahan <i>Economic Dispatch</i> yang akan diselesaikan menggunakan metode optimisasi <i>Firefly Algorithm</i> . Metode ini termasuk dalam lingkup <i>Computational Intelligence and Metaheuristics</i> . Terinspirasi oleh perilaku kunang-kunang, menarik satu sama lain dengan lampu berkedip. Hal ini sangat berguna untuk optimasi multimodal.
3.	<i>Solving the Generation Scheduling with Cubic Fuel Cost Function using Simulated Annealing</i>		Ziane, Ismail Benhamida, Farid. 2016	Membahas permasalahan <i>economic dispatch</i> dengan menggunakan metode <i>cubic fuel cost</i> yang di padukan dengan algoritma <i>simulated annealing</i> . Jaringan yang digunakan adalah jaringan Wollenberg dan jaringan Liang.

Penelitian yang akan dilakukan oleh penulis memiliki perbedaan dengan penelitian terkait yang tersaji pada tabel 2.3. Dengan permasalahan *economic dispatch* pada sistem tenaga listrik yang terdiri dari pembangkit termal dan pertanian surya ditambahkan atau diintegrasikan dengan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) yang menggunakan dua metode berbeda, yaitu *fuzzy logic* dan *perturb and observe*. Penerapan MPPT ini bertujuan agar terjadi konversi energi maksimal diberbagai kondisi pada pertanian surya. Pemodelan akan dilakukan pada *software* MATLAB/SIMULINK untuk perancangan kontrol MPPT dan *software* POWER WORLD untuk pengujian skenario *economic dispatch*.

Pemilihan kedua metode tersebut dikarenakan merupakan metode MPPT yang umum digunakan, tetapi memiliki perbedaan mendasar dengan *perturb and observe* merupakan metode MPPT konvensional karena algoritma tidak bisa diubah, sedangkan *fuzzy logic* merupakan metode berdasarkan kecerdasan buatan karena algoritma bisa diubah sesuai dengan keinginan perancang. Hasil dari pengaplikasian kedua metode tersebut akan dibandingkan tingkat efisiensinya, dan pengaruhnya terhadap *economic dispatch*.