

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit listrik tenaga angin atau bayu adalah suatu sistem pembangkit listrik yang dapat mengkonversi energi kinetik menjadi energi mekanik. Secara umum PLTB terbagi menjadi 4 bagian, yaitu rotor turbin, *gearbox*, generator dan pembebanan. Prinsip kerja PLTB adalah mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik dari putaran baling-baling yang dapat memutar rotor. Putaran rotor relatif lambat sehingga PLTB secara umum menggunakan *gearbox* untuk mempercepat laju putaran rotor. Setelah itu generator mengubah putaran dari *gearbox* tersebut menjadi energi listrik (Muhammad, 2018).

2.1.1 Komponen Utama Pembangkit Listrik Tenaga Angin

1. Turbin Angin

Dalam perkembangan teknologi turbin angin, umumnya dikenal dua jenis turbin angin, yaitu turbin angin *propeller* dan turbin *Darrieus*. Saat ini kedua jenis turbin inilah yang sering mendapat perhatian besar untuk dikembangkan. Turbin angin *propeller* adalah jenis turbin angin dengan poros horizontal, berbentuk seperti baling-baling pesawat terbang pada umumnya. Dalam penggunaannya turbin angin ini memerlukan penyesuaian dengan arah angin untuk bisa mendapatkan kecepatan angin yang paling tinggi.

2. Bilah Kipas (*blades*)

Kebanyakan turbin mempunyai 2 atau 3 lebih bilah kipas, angin yang menghebus bilah kipas tersebut akan menyebabkan turbin tersebut berputar.

3. Sistem Pengereman

Sistem pengereman ini digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah *gearbox* agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya, kehadiran angin diluar batas kemampuan akan menyebabkan kersakan pada generator.

4. Alat Pengontrol

Alat pengontrol ini mulai menyalakan turbin pada kecepatan angin dari 8-25 km/jam, dan mematikannya pada kecepatan 90 km/jam. Turbin tidak akan beroperasi pada kecepatan lebih dari 90km/jam, karena angin terlalu kencang menyebabkan putaran poros turbin semakin cepat dan akan menyebabkan kerusakan pada generator.

2.1.2 Jenis-jenis Turbin Angin

Turbin angin dibagi menjadi dua kelompok utama berdasarkan arah sumbu:

1. Turbin Horizontal

Turbin angin dengan sumbu horizontal mempunyai sudu yang berputar dalam bidang vertikal seperti halnya *propeller* pesawat terbang.



Gambar 2.1 Turbin Angin Vertikal dan Turbin Angin Horizontal (Hau,E et al.,

2006)

Pada gambar 2.1 memperlihatkan jenis turbin angin horizontal dan vertikal. Turbin angin biasanya mempunyai sudu dengan bentuk irisan melintang khusus dimana aliran udara pada salah satu sisinya dapat bergerak lebih cepat aliran dari aliran udara di sisi yang lain ketika angin melewatinya perbedaan tekanan ini membentuk gaya yang menyebabkan sudu berputar. Kelebihan turbin sumbu horizontal:

- a. Turbin angin yang menggunakan menara yang tinggi maka peluang untuk mendapatkan angin dengan kekuatan yang lebih besar.
- b. Efisiensi lebih tinggi, karena *blades* selalu bergerak tegak lurus terhadap arah mata angin dan menerima daya sepanjang putaran.

Kekurangan turbin sumbu horizontal:

- a. Menara yang tinggi untuk mengejar angin memerlukan derek karena sulitnya pemasangan pada bilah dan generator.
- b. Memerlukan mekanisme yaw kontrol tambahan untuk membelokkan kincir agar searah dengan arah mata angin.

2. Turbin Vertikal

Turbin angin dengan sumbu vertikal bekerja dengan prinsip yang sama seperti halnya horizontal. Dengan sumbu yang vertikal, generator dan gearbox dapat ditempatkan di dekat tanah. Karena diletakan di ketinggian rendah maka kecepatan angin yang didapkatana akan lebih sedidikt dan lebih pelan, dengan menggunakan aliran angin di dekat tanah dan object lain akan menciptakan aliran yang bergejolok yang dapat menyebabkan kebisingan. Kelebihan pada turbin sumbu vertikal:

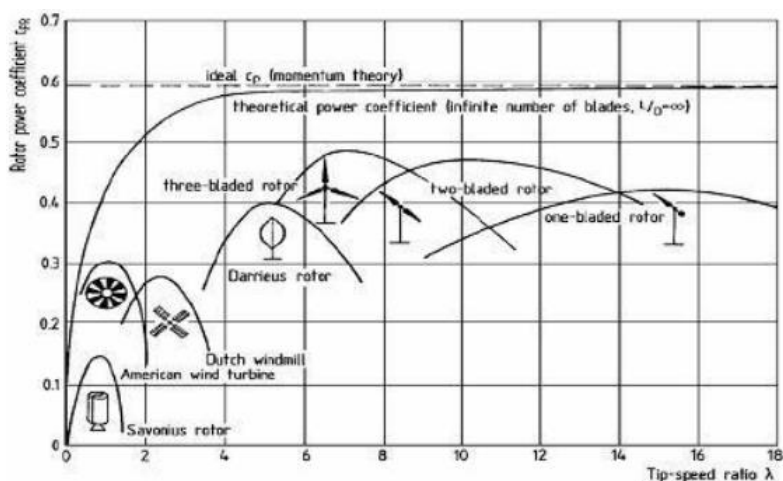
- a. Tidak memerlukan struktur menara yang tinggi.

- b. Bilahnya vertikal jadi tidak memerlukan mekanisme yaw.
- c. Biasanya memiliki *tip speed ratio* atau perbandingan antara kecepatan putaran dari ujung sebuah bilah dengan laju sebenarnya yang lebih rendah sehingga lebih kecil kemungkinannya rusak saat angin berhembus kencang.

Kekurangan pada turbin sumbu vertikal:

- a. Mempunyai torsi awal yang rendah sehingga membutuhkan energi angin yang sangat besar
- b. Tidak mengambil keuntungannya dari angin yang melaju lebih kencang di elevasi yang lebih tinggi.

Setiap jenis turbin angin memiliki ukuran dan efisiensi yang berbeda.



Gambar 2.2 koefisien daya dari berbagai jenis turbin angin (Firman A et al,2013)

Pada gambar 2.2 menunjukkan grafik variasi nilai tip speed ratio dan koefisien daya untuk berbagai macam turbin angin. Efisiensi turbin angin menurut Betz umumnya daya efektif maksimum dalam perancangan turbin angin tidak lebih dari 59% energi yang dibawa oleh angin dan diserap oleh turbin. Turbin angin sumbu Horizontal sekitar 30-40% efisiensinya dan turbin angin sumbu Vertikal 10-40%. Turbin angin yang mempunyai jumlah sudu banyak akan mempunyai torsi yang besar dan dapat berputar dengan kecepatan angin yang kecil. Turbin jenis ini

banyak digunakan untuk keperluan mekanikal dan juga sebagai keperluan kebangkitan listrik (Dimas Priyambodo & Agung, 2019). Pada koefisien daya turbin angin dipengaruhi oleh kecepatan angin dan jumlah sudu pada bilah turbin angin, turbin yang menghasilkan energi listrik harus berkecepatan tinggi karena itu tidak terlalu membutuhkan torsi, pada umumnya turbin angin memiliki sudu 3 bilah, sudu 3 bilah tarikannya akan berkurang bisa dilihat pada gambar 2.2. Paling efisien menggunakan turbin angin sudu 1 bilah, akan tetapi menyebabkan ketidakseimbangan. Pengaruh memiliki lebih dari satu sudu bilah pada turbin angin telah diperiksa dengan menggunakan biaya perspektif manfaat (Adeyeye et al., 2021). Saat ini, desain sudu tiga bilah digunakan untuk turbin angin sumbu horizontal karena itu memberikan kompromi ideal antara hasil energi tinggi, stabilitas lebih besar, bobot rendah, dan daya tahan.

Tabel 2.1 pengujian PLTB sumbu horizontal (Indriani et al., 2019)

Kecepatan angin	Kondisi turbin	Kecepatan turbin	Tegangan	Arus
3	Belum berputar	-	-	-
3,5	Berputar	150	12	1,46
4	Berputar	172	16	2,4
4,5	Berputar	184	17,4	2,52
5	Berputar	195	18,5	2,59
5,5	Berputar	210	20	2,63
6	Berputar	228	21	2,7
6,5	Berputar	236	21,7	2,73
7	Berputar	243	21,9	2,79
7,5	Berputar	250	22	2,8
8	Berputar	258	22,9	3,45
8,5	Berputar	265	23,4	3,5
9	Berputar	281	23,8	3,6
9,5	Berputar	294	24,3	3,7

Tabel 2.2 pengujian PLTB sumbu vertikal (Indriani et al., 2019)

Kecepatan angin	Kondisi turbin	Kecepatan turbin	Tegangan	Arus
6	Belum Berputar	-	-	-
6,5	Berputar	133	9	1,15
7	Berputar	144	11,8	1,41
7,5	Berputar	154	13,5	1,82
8	Berputar	176	15,2	2,26
8,5	Berputar	182	16,84	2,33
9	Berputar	190	18,3	2,54
9,5	Berputar	209	19,52	2,67
10	Berputar	254	22,3	3,2

Pada Tabel 2.1 dan 2.2 bisa dilihat perbedaan dari kedua turbin dengan sumbu yang berbeda dimana pada sumbu horizontal lebih cepat berputar dibandingkan dengan sumbu vertikal. Pada kedua perbandingan ini dapat disimpulkan bahwa turbin dengan menggunakan sumbu horizontal lebih banyak digunakan dibandingkan dengan turbin menggunakan sumbu vertikal. Performance turbin angin dipengaruhi oleh posisi sumbu gerak turbin dan angin, dimana semakin besar putaran angin maka kecepatan putar turbin dan tegangan beserta arus akan semakin besar. (Indriani et al., 2019).

Energi angin untuk menggerakan turbin dapat dihitung dengan Persamaan :

a) Energi angin

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

E = Energi Kinetik (*joule*)
m = Massa benda bergerak (kg)
v = kecepatan angin (m/s)

b) Daya Angin

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.2)$$

P = Energi angin (*watt*)
 ρ = massa jenis udara (1,225 kg/m³)
 A = Area penangkapan angin (m²)

c) Daya Turbin Angin

$$P_{mt} = \varphi_t \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.3)$$

P_{mt} = Daya mekanik turbin

φ_t = Efisiensi turbin angin

d) Daya mekanik *gearbox*

$$P_g = \varphi_{tr} \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.4)$$

P_g = Daya mekanik *gearbox*

φ_{tr} = Efisiensi *gearbox*

e) Daya listrik

$$P_e = \varphi_{gen} \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.5)$$

P_e = Daya Listrik

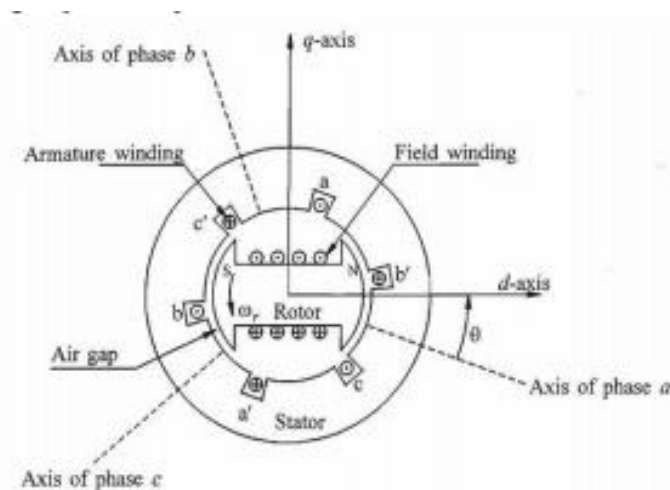
φ_{gen} = Efisiensi generator

(NPower, 1995)

2.1.3 Generator

Generator adalah suatu mesin yang mengubah tenaga mekanik menjadi tenaga listrik. Tenaga mekanik digunakan untuk memutar kumparan kawat penghantar dalam medan magnet ataupun sebaliknya memutar magnet diantara kumparan kawat penghantar. Tenaga mekanik dapat berasal dari tenaga panas, potensial air dan mesin bermotor. Generator terdapat dua bagian utama, yaitu : stator dan rotor. Stator adalah bagian yang diam yang mengeluarkan tegangan dan

rotor adalah bagian yang bergerak yang menghasilkan medan magnet yang menginduksikan kepada stator.



Gambar 2. 3 Skema generator tiga fasa (kundur prabha et al., 1993)

Pada gambar 2.3 menunjukkan bahwa rotor yang bergerak akan mengeluarkan medan magnet yang akan menginduksi pada stator sehingga menghasilkan tegangan yang akan digunakan kepada beban. Pada generator sinkron, arus DC diterapkan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet, sehingga ketika diputar rotor yang mendapatkan medan magnet yang kuat dari arus DC akan menghasilkan elektromagnet yang besar. Pada stator adalah bagian generator yang menerima induksi magnet dari rotor. Tegangan yang keluar dari stator dihubungkan kepada beban sehingga akan mengeluarkan arus AC. Jenis-jenis generator:

1. Generator sinkron

Generator sinkron adalah mesin listrik arus bolak-balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik yang bekerja dengan cara merubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan

kuparan generator. Pergerakan relatif adalah terjadinya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar.

2. Generator asinkron

Generator asinkron adalah merupakan generator tidak serempak atau generator tidak sinkron karena putaran rotornya tidak sama dengan putaran medan magnet pada stator. Generator asinkron juga disebut generator induksi. Pada konstruksi generator asinkron tidak berbeda jauh dengan konstruksi generator sinkron, dimana memiliki dua bagian utama yaitu rotor dan stator. Prinsip kerja generator induksi atau generator asinkron kebalikan saat motor induksi bekerja. Ketika mesin bekerja sebagai motor, kumparan stator diberi tegangan tiga fasa sehingga menimbulkan medan putar dengan kecepatan sinkron, namun jika motor berfungsi sebagai generator, pada putaran rotor motor diputar oleh sumber penggerak dengan kecepatan lebih besar daripada sinkronnya. Rotor merupakan bagian yang bergerak pada generator. Ada dua jenis rotor yang biasa digunakan yaitu rotor sangkar (*squirrel cage rotor*) dan rotor belitan (*wound rotor*). Rotor sangkar tupai (*squirrel cage rotor*) adalah generator induksi dengan rotor sangkar adalah konstruksi dari inti berlapis dengan konduktor dipasang paralel dengan poros dan mengelilingi permukaan inti. Rotor belitan (*wound rotor*) atau disebut rotor cincin geser terdapat juga alur-alur yang bentuknya lebih dalam daripada alur-alur pada rotor sangkar tupai. Dalam alur-alur terdapat kawat yang dibelitkan pada sebuah rotor dengan hubungan bintang atau hubungan segitiga seperti belitan kawat pada stator (Mahaganti et al., 2014).

Pada kecepatan perputaran generator sinkron akan mempengaruhi frekuensi listrik yang dihasilkan oleh generator. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada rotor dengan frekuensi listrik pada stator adalah

$$f_e = \frac{N_r \cdot p}{120} \quad (2.6)$$

f_e = frekuensi listrik (Hz)

N_r = kecepatan putaran rotor (rpm)

p = jumlah kutub magnet pada rotor

Rumus diatas terlihat bahwa frekuensi yang dihasilkan generator sinkron sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran rotor dan jumlah kutub magnet pada generator. Apabila beban generator berubah, maka akan mempengaruhi kecepatan rotor generator. Perubahan ini akan mempengaruhi frekuensi yang dihasilkan generator.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit listrik tenaga surya atau biasa disingkat PLTS adalah sebuah system pembangkit listrik yang menggunakan konversi energi dari energi surya menjadi energi listrik. Pemanfaatan PLTS juga sudah mulai dilakukam untuk bidang pertanian sebagai penyalur energi listrik untuk pompa irigasi. Secara umum kinerja pompa air tenaga surya dapat berjalan baik apabila mendapatkan radiasi yang cukup (Sanjaya et al., 2019).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mempunyai beberapa keuntungan yaitu: Sumber energi yang digunakan sangat melimpah dan Cuma-Cuma, system yang dikembangkan bersifat modular sehingga dapat dengan mudah diinstalasi dan

diperbesar kapasitasnya, perawatannya mudah, tidak menimbulkan polusi, dirancang bekerja secara otomatis sehingga dapat diterapkan ditempat terpencil, relative aman, keandalannya semakin baik, adanya aspek masyarakat pemakai yang mengendalikan system itu sendiri, mudah untuk diinstalasi, radiasi matahari sebagai sumber energi tak terbatas, tidak menghasilkan CO₂ serta emisi gas buang lainnya (Erlina & Azzahra, 2020).

2.2.1 Konfigurasi pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya merupakan salah satu pembangkit yang mudah untuk diaplikasikan dalam memenuhi kebutuhan listrik sehari-hari terutama di Indonesia yang memiliki intensitas matahari yang banyak. Selain itu juga system pembangkit listrik tenaga surya dapat digunakan dengan 2 cara yakni (Musfita et al., 2020) :

1. Penggunaan langsung, dimana daya listrik panel surya dimanfaatkan langsung oleh beban, baik untuk peralatan DC, seperti lampu dan pompa air, ataupun peralatan AC seperti lemari pendingin ataupun televisi.
2. Penggunaan dengan bank penyimpanan, yaitu berupa baterai. Dalam hal ini, energi yang dihasilkan terlebih dahulu disimpan, agar dapat digunakan sewaktu-waktu bahkan dalam kondisi tidak ada matahari sekalipun.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya sudah banyak digunakan di Indonesia, kemudahan dalam pemasangannya menjadi salah satu solusi alternatif yang dapat digunakan di daerah terpencil. Pengaplikasian system PLTS juga dapat dibagi menjadi 2 cara yaitu :

1. Sistem PLTS On-Grid

Sistem ini akan tetap berhubungan dengan jaringan PLN dengan mengoptimalkan pemanfaatan energi fotovoltaik untuk menghasilkan energi listrik semaksimal mungkin. Didesain untuk interkoneksi dengan jaringan tenaga listrik yang ada dengan jumlah kapasitas yang jauh lebih kecil dibandingkan beban system secara keseluruhan. Oleh karena itu berapapun daya yang dihasilkan akan langsung dimasukkan ke system kelistrikan sehingga umumnya PLTS On-Grid didesain tanpa baterai dan hanya menyuplai daya di siang hari.

Komponen utama dalam system PLTS On-grid adalah inverter yang terintegrasi dengan Power Conditioning Unit (PCU). Inverter berfungsi untuk mengubah listrik DC yang dibangkitkan oleh Array PV kedalam bentuk listrik AC sesuai dengan tegangan dan power quality yang disyaratkan oleh Jaringan. Sistem ini otomatis berhenti menyuplai daya ke jaringan ketika fasilitas jaringan tenaga listrik tidak beroperasi (Musfita et al., 2020)

2. Sistem PLTS Off-Grid

Sistem PLTS Off-grid merupakan system pembangkit listrik yang tidak perlu terkoneksi dengan PLN dan diterapkan di daerah-daerah terpencil/pedesaan yang tidak terjangkau oleh jaringan PLN seperti PLTS Sistem terpusat. Sistem terpusat ini juga merupakan system pembangkit yang hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu satunya energi utama dengan menggunakan rangkaian fotovoltaik untuk menghasilkan energi listrik sesuai dengan kebutuhan.

Dalam penerapannya komponen yang digunakan pada PLTS Off-grid biasanya : Modul Surya, Solar Charger Controller (SCC), Baterai, dan Inverter yang digunakan untuk system PLTS Off-grid (Musfita *et al.*, 2020).

2.3 Kapasitas Panel Surya

Jumlah panel surya yang akan digunakan tergantung pada daya (*Wattpeak*) yang dibangkitkan PLTS untuk memenuhi kebutuhan energi diperhitungkan dengan Persamaan-Persamaan sebagai berikut (Roza & Mujirudin, 2019).

1. Menghitung Area Array (PV Area)

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

$$PV\ area = \frac{E_L}{G_{av} \times \eta_{PV} \times TCF \times \eta_{out}} \quad (2.7)$$

- EL = pemakaian energi (kWh/hari)
- G_{av} = isolasi harian matahari rata-rata (kWh/m²/hari)
- η_{PV} = efisiensi panel surya
- η_{out} = efisiensi inverter

2. Menghitung Daya yang Dibangkitkan (*Wattpeak*)

Dari perhitungan area array, maka besar daya yang dibangkitkan (*Wattpeak*) dapat diperhitungkan :

$$P_{wattpeak} = Area\ array \times PSI \times \eta_{PV} \quad (2.8)$$

PSI (*Peak Solar Insolation*) = 1000 W/m²

η_{PV} = efisiensi panel surya

Selanjutnya berdasarkan daya yang akan dibangkitkan (*Wattpeak*), maka jumlah panel surya yang diperlukan, diperhitungkan dengan rumus :

$$jumlah\ panel\ surya = \frac{P_{wattpeak}}{P_{MPP}} \quad (2.9)$$

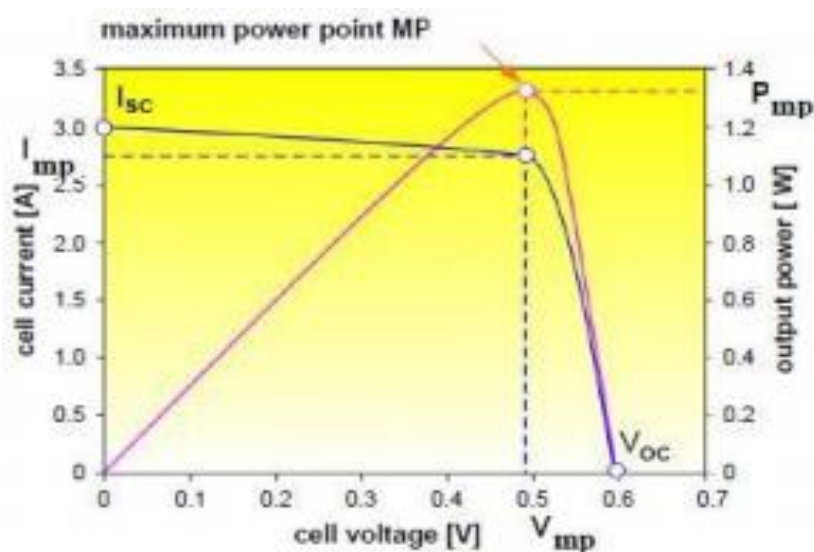
- P_{Wattpeak} = daya yang dibangkitkan
- P_{MPP} = daya maksimum keluaran panel surya (W)

Untuk memperoleh besar tegangan, arus dan daya yang sesuai dengan kebutuhan, maka panel surya tersebut harus dikombinasikan secara seri dan parallel dengan aturan sebagai berikut :

1. Untuk memperoleh tegangan keluaran yang lebih besar dari tegangan keluaran panel surya, maka dua buah atau lebih panel surya harus dihubungkan secara seri.
2. Untuk memperoleh arus keluaran yang lebih besar dari arus keluaran panel surya, maka dua buah atau lebih panel surya harus dihubungkan secara parallel.
3. Untuk memperoleh daya keluaran yang lebih besar dari daya keluaran panel surya, dengan tegangan yang konstan maka panel surya harus dihubungkan secara seri dan parallel.

2.3.1 Karakteristik fotovoltaik

Sel surya memiliki kurva yang menunjukkan hubungan antara arus dengan tegangan keluaran dan daya dengan tegangan keluaran sel surya. Pada saat berada pada titik kerja maksimal, maka daya keluaran yang dihasilkan akan maksimal.



Gambar 2.4 kurva karakteristik I-V fotovoltaik (Roza & Mujirudin, 2019)

Pada gambar 2.4 menunjukkan kurva tegangan dan arus keluaran yang didapat dari fotovoltaik ketika tidak dibebani secara langsung. Ketika sel dalam kondisi *short circuit*, arus maksimum (I_{sc}) dihasilkan, sedangkan pada kondisi *open circuit* tidak ada arus yang dapat mengalir sehingga tegangan maksimum (V_{oc}). Titik pada kurva I-V yang menghasilkan arus dan tegangan maksimum disebut *maximum power point* (MPP). Karakter penting lainnya dari sel surya yaitu *fill factor* (FF), dengan Persamaan:

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (2.10)$$

Dengan menggunakan *fill factor* maka maksimum daya dari sel surya bisa didapat dengan Persamaan:

$$P_{Max} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (2.11)$$

Sehingga untuk mendapatkan efisiensi sel surya yang didefinisikan sebagai daya yang dihasilkan dari sel ($P_{elektrik}$) dibagi dengan daya dari cahaya matahari (P_{cahaya}):

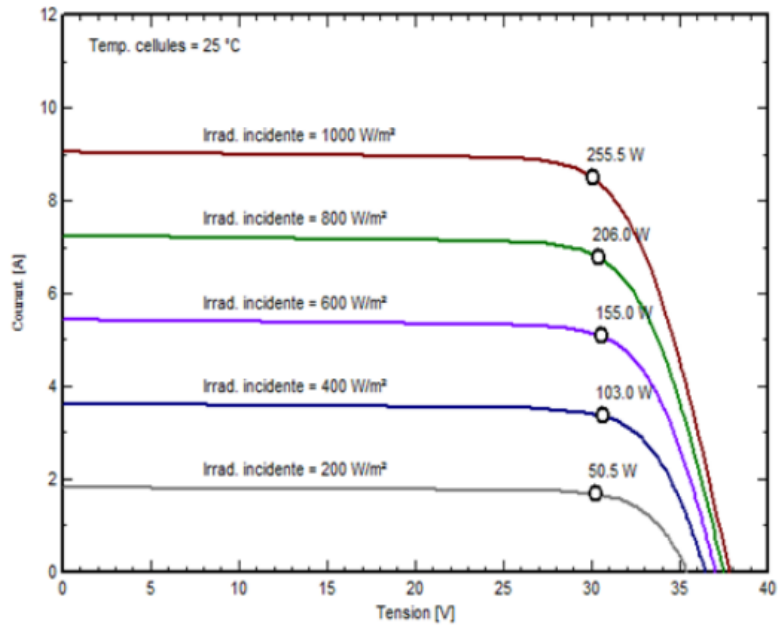
$$\eta = \frac{P_{elektrik}}{P_{cahaya}} \quad (2.12)$$

Atau

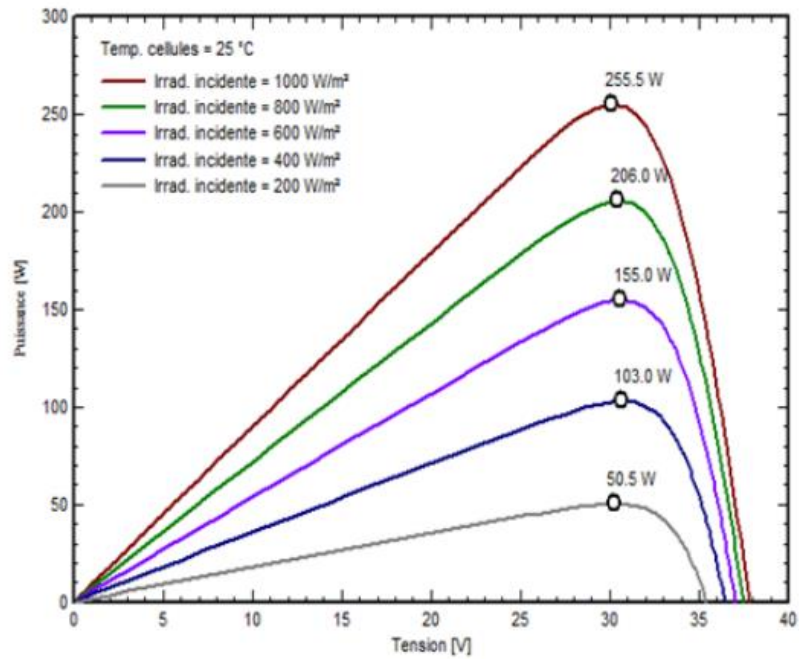
$$\eta = \frac{V \cdot I}{A \cdot S_T} \quad (2.13)$$

Dimana A pada satuan diatas adalah luas penampang fotovoltaik (m^2) dan S_T adalah radiasi matahari (W/m^2).

Karakteristik keluaran Daya, Tegangan dan Arus pada modul surya jenis *Monocrystalline* dengan modul PV SolarWord, Sunmodule SW 255 mono ditunjukkan pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6.

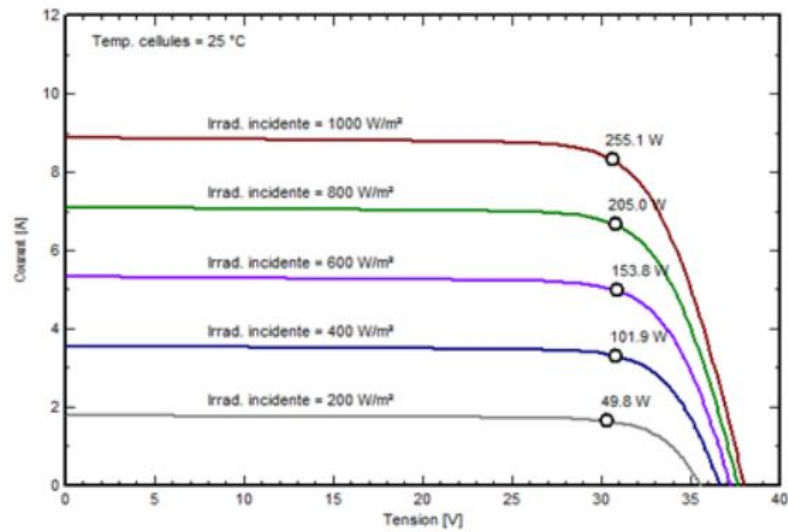


Gambar 2.5 Karakteristik I-V Modul Monocrystalline (Elamim et al., 2017)

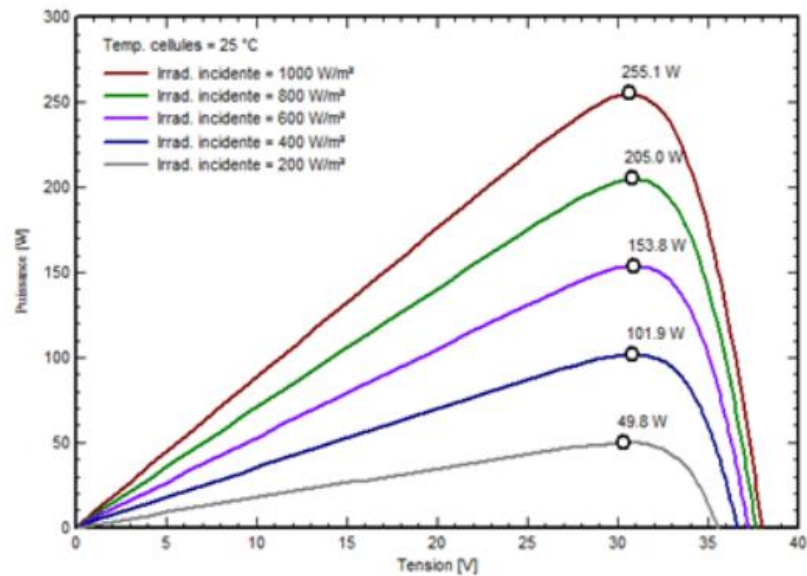


Gambar 2.6 Karakteristik P-V Modul Monocrystalline (Elamim et al., 2017)

Karakteristik keluaran Daya, Tegangan dan Arus pada modul surya jenis *Polycrystalline* dengan modul PV SolarWord, Sunmodule SW 255 poly ditunjukkan pada Gambar 2.7 dan Gambar 2.8.

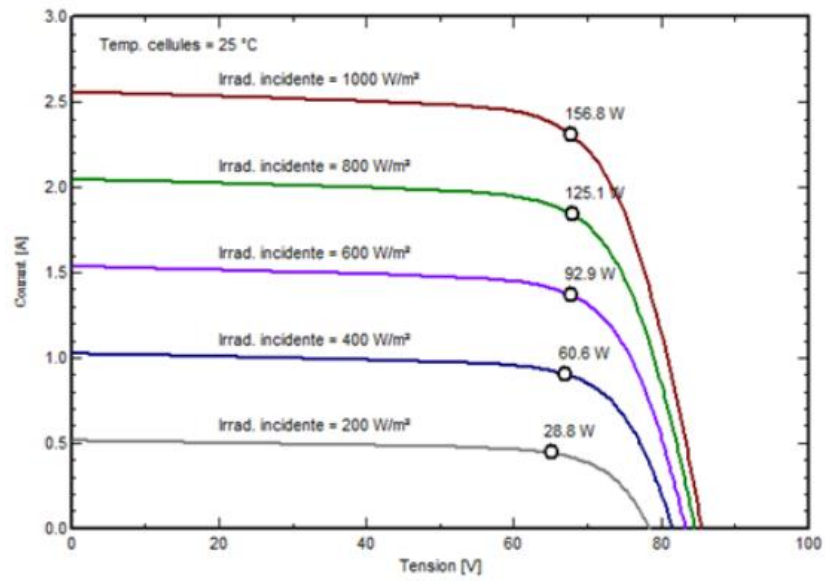


Gambar 2.7 Karakteristik I-V Modul Polycrystalline (Elamim et al., 2017)

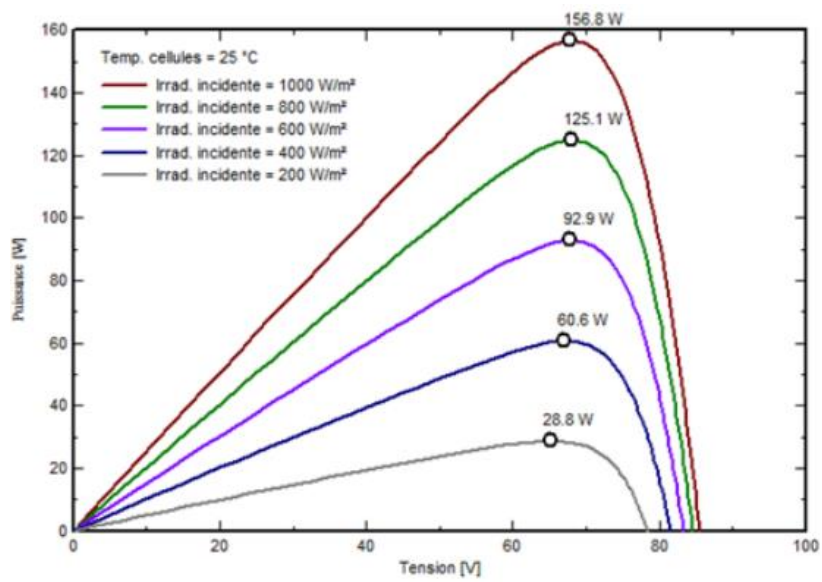


Gambar 2.8 Karakteristik P-V Modul Polycrystalline (Elamim et al., 2017)

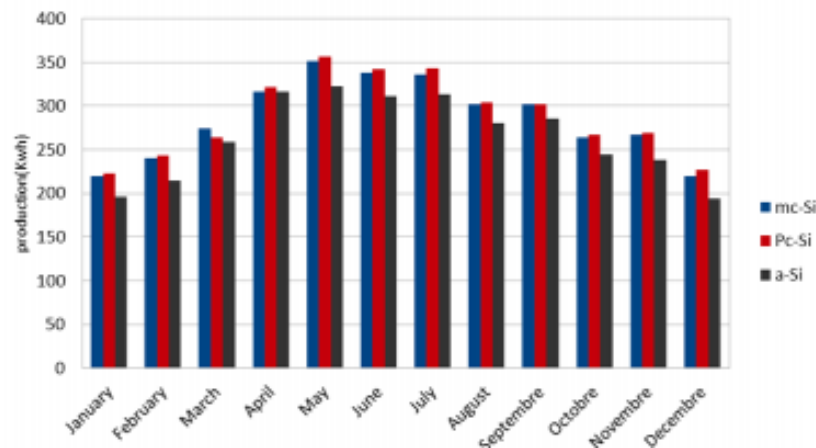
Karakteristik keluaran Daya, Tegangan dan Arus pada modul surya jenis Amorphous dengan modul PV NexPower, NT-155AF ditunjukkan pada Gambar 2.9 dan Gambar 2.10.



Gambar 2.9 Karakteristik I-V Modul Amorphous (Elamim et al., 2017)



Gambar 2.10 Karakteristik P-V Modul Amorphous (Elamim et al., 2017)

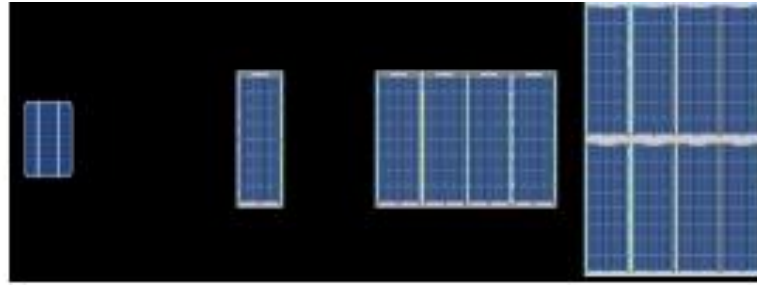


Gambar 2.11 Energi yang dihasilkan dari tiga modul PV berbeda (Elamim et al., 2017)

Pada Gambar 2.11 dapat dilihat perbedaan keluaran antara berbagai teknologi modul PV yang digunakan dalam instalasi. Iradiasi rendah dan suhu rendah (musim gugur, musim dingin) modul (poli-kristal) tampak paling reseptif, sedangkan pada iradiasi tinggi dan suhu tinggi (musim semi, musim panas) modul mono-kristal dan polikristalin hampir identik sedangkan teknologi amorf tampak lebih lemah. Namun, kami dapat menyimpulkan bahwa perbedaan yang dirasakan antara teknologi pemasangan menyiratkan bahwa modul polikristalin memiliki kinerja terbaik di kota Mohammedia. (Elamim et al., 2017)

2.3.2 Panel Surya

Panel surya berisi serangkaian sel surya yang ada pada Photo-diode yang besar dan dapat menghasilkan daya listrik. *Photovoltaic* atau Panel Surya terdiri dari dua jenis bahan semikonduktor yang berbeda yang disambungkan melalui suatu junction, kemudian apabila terkena sinar matahari pada permukaannya maka, akan terjadi konversi energi matahari menjadi energi listrik. Untuk mendapatkan daya yang besar untuk mencukupi beban listrik, maka sel surya tersebut disusun menjadi panel yang dinamakan Panel Surya.



Gambar 2.12 Formasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Roza & Mujirudin, 2019)

Pada Gambar 2.12 dapat kita lihat mulai dari paling kiri yang disebut sebagai sel dalam panel surya yang memiliki tegangan output 0,5 Volt DC, kemudian dari sel dirangkai dengan seri menjadi sebuah modul atau panel surya yang memiliki keluaran yang beragam, setelah itu panel yang sudah disusun secara lurus dengan rangkaian seri disebut menjadi String atau baris yang dipasang tergantung dengan besaran Solar Charge Controller (SCC) atau Inverter Jaringan yang digunakan, yang terakhir merupakan Array yang biasa disebut sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang dirangkai secara paralel.

Panel surya memiliki tiga jenis berdasarkan bahan dan teknologi yang digunakan yaitu :

1. Monocrystalline

Panel surya jenis *monocrystalline* berasal dari *single silicone crystall* murni yang dibuat dengan proses *Czochralski*. Ingot yang dihasilkan proses *Czochralski* dipotong tipis untuk menghasilkan sebuah sel surya. Panel ini dinamakan “mono” karena tersusun dari kristal silicon tunggal dimana yang kakan membuat elektron lebih banyak bergerak sehingga aliran listrik lebih banyak. Selain itu tipe monocrystalline ini juga bisa beroperasi lebih baik pada lingkungan yang panas dan intensitas cahaya yang rendah dari pada tipe polycrystalline. Proses ini ditemukan oleh ilmuwan polandia yang bernama Jan Czochralski pada tahun 1915 saat

menyelidiki tingkat kristalisasi logam. Contoh proses ini adalah pemurnian silikon yang nantinya akan dibuat wafer untuk *integrated circuit*. Untuk efisiensinya sendiri panel surya jenis *Monocrystalline* berkisar antara 17-18%.

2. Polycrystalline

Panel surya jenis *Polycrystalline* atau silikon polikristalin, panel surya jenis ini biasanya terdiri dari banyak kristal yang berbeda yang digabungkan satu sama lain dalam satu sel. Teknologi untuk memproses sel surya polikristalin yang lebih mudah diproduksi melalui proses metalurgi tingkat silikon dengan pemurnian kimia. Kemudian silikon mentah dicairkan, setelah itu dituang ke dalam cetakan persegi, didinginkan dan dipotong menjadi wafer persegi. Panel surya jenis ini merupakan panel yang paling banyak digunakan selain karena biaya produksi yang lebih murah tingkat efisiensinya juga berkisar 12-14%.

3. Thin Film Solar Cell

Panel surya jenis *Thin Film*, Kebanyakan sel suryafilm tipis dan amorfous adalah sel surya generasi kedua, dan lebih ekonomis daripada sel surya wafer silikon generasi pertama. Lapisan penyerapan cahaya maksimum sel wafer silikon adalah 350 μm , sedangkan lapisan penyerapan cahaya sel surya film tipis sangat tipis, biasanya 1 μm . Inovasi terbaru dari film tipis adalah film tipis PV tiga node, yang memiliki efisiensi lebih tinggi ketika listrik yang dihasilkan oleh udara mendung 45% lebih tinggi daripada panel lain dengan daya yang sama. Berdasarkan bahan tersebut, sel surya film tipis dapat dibagi menjadi tiga kategori, yaitu silikon amorf (a-Si), kadmium telurida (CdTe) dan tembaga indium gallium selenium (CIGS) (Gautama et al., 2021).

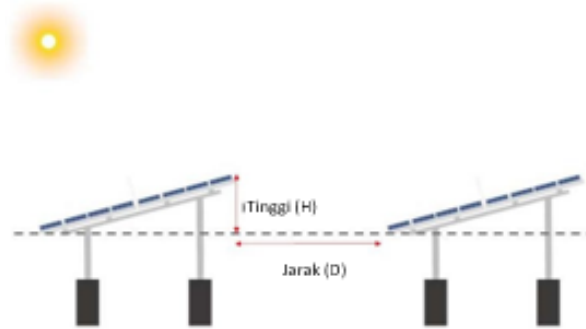
2.4 Faktor Eksternal Pembangkit Listrik Tenaga Angin dan Tenaga Matahari

2.4.1 Bayangan

Bayangan adalah masalah yang sangat penting pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya karena dapat secara signifikan mengurangi kinerja system PLTS. Terkena bayangan Sebagian maupun secara penuh tidak hanya mengurangi produksi energi, namun juga beresiko mempengaruhi kondisi panel surya. Ketika terkena bayangan Sebagian, pelepasan panas pada sel yang terkena bayangan cenderung akan meningkat biasanya disebut *Hot Spot* dan dapat mengurangi umur panel surya.

Untuk menghindari bayangan atau shading perlu adanya identifikasi lokasi dengan benar selama studi kelayakan untuk memastikan bahwa panel surya akan bebas dari bayangan di sepanjang hari dan di sepanjang musim dalam setahun. Setelah identifikasi lokasi dilakukan maka perlu dibuat desain untuk tata letak tiap lokasi PLTS. Rangkaian panel surya harus memiliki jarak yang cukup satu sama lain untuk menghindari bayangan dari rangkaian panel surya yang berdekatan atau bangunan yang lebih tinggi disekitarnya.

Penting untuk menghitung secara akurat jarak antar rangkaian panel surya, terutama jika rangkaian tidak dipasang pada ketinggian yang sama. Jarak yang berdekatan dapat menyebabkan bayangan, sementara jarak antar rangkaian yang sangat jauh dapat menyebabkan penggunaan lahan secara berlebihan.



Gambar 2.13 Jarak antara panel surya (ESDM KEBTKE)

Pada Gambar 2.13 dijelaskan mengenai jarak pemasangan panel surya pada 2 *String* atau lebih. Jarak minimum antar rangkaian panel surya yang diperlukan (D) sangat tergantung pada titik lintang lokasi, ketinggian permukaan rangkain panel surya (H), dan waktu. Terutama di tempat dimana lintasan matahari berubah secara signifikan sepanjang tahun dalam hal lokasi dekat dengan daerah khatulistiwa, ketentuan praktisnya adalah jarak tersebut setidaknya dua kali lipat ketinggian dari permukaan panel surya untuk menghitungnya sendiri dapat kita hitung dengan rumus berikut :

$$\frac{\text{Jarak [m]}}{\text{Tinggi dari permukaan panel surya[m]}} \geq 2 \quad (2.14)$$

2.4.2 Arah pemasangan PLTS

Dalam pemasangan panel surya arah hadap menentukan jumlah keluaran yang cukup dari pembangkit listrik tenaga surya. Idealnya, panel surya harus diatur secara tegak lurus dengan sinar matahari untuk menerima radiasi secara langsung. Arah hadap ditentukan dalam tahap desain dan konstruksi oleh karena panel surya secara langsung dipengaruhi oleh arah hadap pondasi dan struktur. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan arah hadap panel surya diantaranya:

a. Sudut Kemiringan

Sudut kemiringan atau sudut inklinasi ditentukan oleh garis lintang lokasi. Di tempat yang terletak di dekat khatulistiwa seperti Indonesia, datangnya sudut sinar matahari hamper tegak liris. Oleh karena itu, sudut kemiringan 0° adalah sudut yang paling optimal untuk mengakap radiasi matahari secara langsung. Namun demikian, sudut 0° atau sudut yang relative datar dapat menyebabkan genangan air atau penumpukan debu di permukaan panel. Sudut kemiringan panel surya untuk setiap bulanya bervariasi antara 1° sampai 34° , sudut kemiringan yang tepat untuk musim hujan di pulau jawa sebesar 1° dan untuk musim kemarau sebesar 24° kemiringan panel surya untuk mendapatkan mekanisme pembersihan diri, terutama disaat hari hujan. Akan tetapi di tempat dimana ketinggian matahari bervariasi sepanjang tahun, sudut optimal untuk mempertahankan kinerja tinggi ditentukan berdasarkan rata-rata ketinggian matahari di musim yang berbeda. (Pangestuningtyas et al., 2014)

b. Sudut Azimuth

Sudut *azimuth* juga dikenal sebagai arah datangnya sinar matahari. Panel surya harus diatur arah hadapnya untuk menghadap khatulistiwa agar mendapatkan hasil energi yang optimal. Karena *azimuth* berbeda-beda menurut garis lintang dan waktu, di belahan bumi utara dimana garis lintang diatas 0° , arah hadap optimal panel surya adalah 180° atau menghadap ke selatan. Di belahan bumi selatan atau dibawah garis khatulistiwa, panel surya harus menghadap ke utara atau 0° . Arah hadap boleh menyimpang hingga 45° ke timur atau barat tanpa secara signifikan mengurangi energi yang dihasilkan. Koordinat lokasi dapat ditentukan dengan

menggunakan GPS (*General/Global Positioning System*) setelah garis lintang diketahui, arah hadap rangkaian panel surya dapat ditentukan.

2.4.3 Temperatur

Panel surya pada umumnya di desain untuk bekerja secara optimal pada suhu 25°C apabila terjadi kenaikan suhu dapat mengakibatkan kerusakan pada panel surya dan menurunkan performa efisiensi penyerapan panel surya. Untuk mengetahui berapa besaran penurunan panel surya dengan rumus dibawah ini :

$$P_{\text{saat naik } ^\circ\text{C}} = \frac{0,5\%}{^\circ\text{C} \times P_{MPP} \times \text{Kenaikan Temperatur } ^\circ\text{C}} \quad (2.15)$$

$P_{\text{saat } t \text{ naik } ^\circ\text{C}}$: Daya saat temperature naik °C dari temperature standar

P_{MPP} : Daya keluaran maksimum panel surya.

Daya keluaran maksimum panel surya pada saat temperaturnya naik menjadi t°C dari temperature standarnya diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut:

$$P_{MPP \text{ saat naik menjadi } t^\circ\text{C}} = P_{MPP} - P_{\text{saat } t \text{ naik } ^\circ\text{C}}$$

Keterangan :

$P_{MPP \text{ saat naik menjadi } t^\circ\text{C}}$: Daya keluaran maksimum panel surya pada saat temperatur disekitar panel surya naik menjadi t°C dari temperature standarnya.

Faktor koreksi temperature (*Temperature Correction Factor*) diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{TCF} = \frac{P_{MPP \text{ saat naik menjadi } t^\circ\text{C}}}{P_{MPP}} \quad (2.16)$$

(Roza & Mujirudin, 2019).

2.5 Baterai

Baterai adalah sebuah alat yang dapat menyimpan energi listrik yang terdiri dari dua atau lebih sel elektrokimia yang dapat mengubah energi kimia yang tersimpan menjadi energi listrik. Setiap sel memiliki kutub positif (katoda) dan kutub negatif (anoda). Kutub yang bertanda positif memiliki energi potensial yang lebih tinggi daripada kutub yang bertanda negatif. Untuk kapasitas baterai tersendiri tergantung pada tipe, umur, temperatur, dan *rate of discharge*. Dianjurkan juga menggunakan tipe baterai dengan kapasitas yang mampu memberikan DOD (*depth of discharge*) regular sebesar 40% dan dapat memberikan energi selama 3-4 hari (*autonomi day*) pada saat tidak ada matahari atau tidak ada *charging* pada baterai dengan DOD maksimum 80%.

Untuk mengetahui waktu dalam proses pengisian baterai, dapat menggunakan rumus:

$$T_a = \frac{Ah}{A} \quad (2.17)$$

T_a = lamanya pengisian arus (jam)
 Ah = besarnya kapasitas baterai (*ampere hours*)
 A = besarnya arus pengisian ke baterai (*ampere*)

Untuk mengetahui berapa lama pemakaian baterai, dapat menggunakan rumus:

$$T = \frac{Ah}{A} - \text{factor dieffisiensi} \quad (2.18)$$

T = waktu (jam)
 Ah = kapasitas baterai
 A = besar arus pemakaian
Factor dieffisiensi = dieffisiensi baterai $\pm 20\%$

2.6 Combiner Box



Gambar 2.14 Combiner Box

Pada Gambar 2.14 menjelaskan mengenai isi *Combiner Box* dari Pembangkit Listrik Tenaga Angin dan Tenaga Matahari yang merupakan sistem proteksi dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan Pembangkit Listrik Tenaga Agin meliputi beberapa komponen antara lain:

- a. Perangkat proteksi string panel surya digunakan untuk melindungi individual *string* modul surya terhadap arus berlebih. Untuk tujuan ini biasanya digunakan sekering atau MCB
- b. Sakelar pemutus memungkinkan kotak penggabung terputus secara aman dari *Solar Charge Controller* atau MPPT Kontroler saat pemeliharaan dilakukan.
- c. Perangkat proteksi SPD (*Surge Protection Device*) digunakan sebagai pengaman terhadap tegangan surja akibat sambaran petir. Perangkat ini dihubungkan ke kutub positif bus DC, kutub negative bus DC dan pembumian

- d. Batang pembumian (*Grounding Bar*) memberi sambungan pembumian untuk selengkap pelindung (jika kotak logam digunakan) dan untuk menyalurkan surja ke pembumian dengan menggunakan perangkat proteksi tegangan surja.
- e. Penyearah (*Rectifier*) adalah bagian dari catu daya yang berfungsi untuk mengubah gelombang tegangan AC (*Alternating Current*) menjadi tegangan searah DC (*Dirrect Current*). Penyearah disini berfungsi untuk mengubah tegangan AC yang keluar dari pembangkit listrik tenaga angin menjadi tegangan DC agar dapat disimpan ke dalam baterai.

2.7 Inverter

Inverter adalah sebuah rangkaian yang dapat mengubah tegangan DC menjadi tegangan bergelombang AC. Inverter memiliki 3 jenis yaitu inverter *off-grid*, *on-grid* dan *hybrid*. Pada inverter *off-grid* hanya mengandalkan sumber tegangan dari panel surya, turbin angin, baterai dan pembangkit lainnya yang tidak terkoneksi dengan jaringan listrik distribusi. Sedangkan, sistem *on-grid* dapat dihubungkan dengan jaringan distribusi dan hanya dapat menyerap energi listrik jaringan distribusi. Berdasarkan gelombang keluaran yang dihasilkan oleh inverter terdapat 3 macam yaitu *square wave*, *modified sine wave*, dan *pure sine wave*.

1. *Square wave*

Inverter dengan keluaran gelombang *square wave* adalah yang paling sederhana. Walaupun jenis ini dapat mengeluarkan tegangan AC dengan frekuensi 50Hz namun kualitas pada inverter ini sangat buruk. Sehingga dapat digunakan pada beberapa alat elektronik saja. Hal ini disebabkan karena karakteristik gelombang inverter memiliki level THD (*total harmonic distortion*) yang tinggi.

2. *Modified sine wave*

Inverter *modified sine wave* atau *modified square wave* gelombangnya hampir sama dengan *square wave*, namun pada gelombang jenis ini outputnya menyentuh titik 0 untuk beberapa saat sebelum gelombangnya pindah ke positif atau negatif. Dikarenakan gelombang jenis ini mempunyai *harmonic distortion* yang lebih sedikit dibandingkan dengan *square wave*.

3. *Pure wave*

Inverter *pure sine wave* merupakan gelombang yang hampir menyerupai gelombang sinusoida sempurna dengan THD <3%. Sehingga cocok untuk semua alat elektronika. Teknologi yang digunakan inverter jenis ini umumnya disebut PWM (*pulse width modulation*) yang dapat mengubah tegangan DC menjadi AC dengan bentuk gelombang yang hampir sama dengan gelombang sinusoida.

Dalam kelengkapan suatu inverter terdapat rangkaian MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) adalah sebuah rangkaian untuk menyesuaikan arus dan tegangan yang akan di salurkan ke baterai. MPPT ini biasa terdapat didalam rangkaian SCC (*solar charge control*) yang berfungsi untuk mengoptimalkan pengisian baterai, dikarenakan arus yang dihasilkan dari panel surya selalu berubah-ubah, baik dalam hitungan jam bahkan menit.

Salah satu metode mudah yang dapat diterapkan pada sistem MPPT adalah dengan menaikkan atau menurunkan tegangan sampai ditemukannya titikdaya maksimal turbin angin dan panel surya. Mengingat perubahan level angin dan iluminasi sun power berubah-ubah setiap waktu, diharap sistem MPPT dapat bekerja dinamis dalam mencari titik daya maksimum(Winarno & Natasari, 2017).

Pengukuran kualitas sistem MPPT juga berguna untuk proses pengembangan sistem MPPT. Terdapat tiga parameter yang dapat menentukan kualitas sistem MPPT, yaitu:

- a) Parameter dinamis. (t =waktu) merupakan waktu yang dibutuhkan oleh sistem MPPT untuk mencari titik daya maksimal ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan (suhu sel atau radiasi matahari berubah). Semakin cepat waktu yang dibutuhkan, semakin baik sistem MPPT tersebut.
- b) Parameter statis. (ΔP) merupakan fluktuasi nilai keluaran ketika titik daya maksimum sudah tercapai dan tidak terjadi perubahan kondisi lingkungan (suhu sel atau radiasi matahari tidak berubah). Semakin kecil fluktuasi yang terjadi, maka semakin baik MPPT tersebut.
- c) Parameter daya aktual dan daya ideal. Merupakan perbandingan daya keluaran yang aktual dalam satu periode waktu dengan daya maksimum yang diukur pada kondisi kerja sel surya tersebut. Nilai parameter ini akan berkisar antara 0 sampai 100%. Rasio daya dapat diperoleh berdasarkan Persamaan:

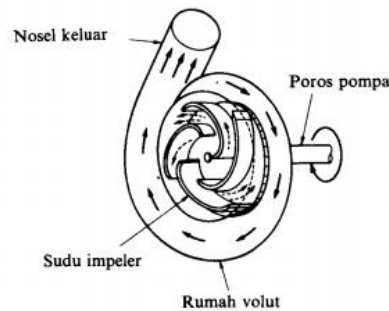
$$\text{Rasio daya output adalah: } \frac{\text{Daya Aktual}}{\text{Daya Maksimum rating}} \times 100\% = \text{semakin besar nilai}$$

rasio ini, maka algoritma MPPT tersebut semakin baik.

2.8 Pompa Air Listrik

Pompa adalah sebuah alat untuk memindahkan fluida dari satu tempat ke tempat lainnya yang bekerja atas dasar mengkonversikan energi mekanik menjadi kinetik. Energi mekanik yang diberikan alat tersebut digunakan untuk meningkatkan kecepatan, tekanan atau elevasi (ketinggian). Pada umumnya pompa digerakan menggunakan motor, mesin atau sejenisnya.

Pompa yang akan digunakan penulis adalah pompa jenis Sentrifugal pompa ini termasuk pompa sentrifugal jenis sumur dalam dengan letak permukaan air diluar kekuatan hisap pompa biasa. Pompa dengan sumbu vertikal dan motor penggeraknya adan dalam satu unit. Dengan motor yang berada disamping pompa.



Gambar 2.15 Pompa sentrifugal (ir.sularso, 2000)

Pada Gambar 2.15 menjelaskan mengenai struktur dan komponen yang terdapat di dalam pompa sentrifugal. Pompa sentrifugal adalah mengubah energi mekanik menjadi energi hidrolis dengan cara memberikan gaya sentrifugal pada cairan yang akan dipindahkan. Pompa sentrifugal menggunakan motor listrik sebagai penggerak. Fluida yang masuk melalui saringan antara motor penggerak dengan pompa dan oleh sudu-sudu *impeller* yang berputar bersamaan dan searah dengan poros pompa yang akan mempercepat aliran fluida secara *axcial*. Kemudian oleh sudu-sudu *diffuser* yang posisinya diam dan fluida diarahkan keatas menuju impeller berikutnya. Didalam diffuser energi kecepatan berkurang dan diubah menjadi energi tekanan. Ada beberapa bagian utama pompa sentrifugal yaitu:

1. Motor listrik

Pompa sentrifugal menggunakan penggerak motor listrik karena untuk menghasilkan daya yang berfungsi sebagai pemutar poros pompa sehingga dapat menaikan fluida dengan cara mengubah energi listrik menjadi energi mekanik.

2. Poros pompa

Poros pompa merupakan komponen utama yang meneruskan energi mekanik dari motor listrik ke *impeller* pompa untuk menaikkan fluida dari dalam tanah.

3. *Impeller*

Impeller merupakan yang berputar bersamaan dengan poros yang dikunci dan berfungsi memberikan gaya sentrifugal sehingga fluida naik melalui pipa kolom.

4. *Difusser*

Diffuser merupakan komponen yang bersifat *static* dan menyatu dengan rumah pompa. Didalamnya terdapat sudu-sudu pengarah aliran fluida yang mengubah energi kecepatan menjadi energi tekanan sehingga fluida dapat mengalir ke permukaan tanah.

Pompa air sentrifugal menggunakan 2 jenis motor listrik sebagai penggeraknya yaitu motor listrik AC (*Alternating Current*) dan DC (*Direct Current*).

Perhitungan pompa menurut (ir.sularso, 2000), sebagai berikut:

a. Persamaan Kontinuitas

Persamaan ini dikembangkan dari hukum kekekalan energi. Aliran fluida yang mengalir di dalam pipa memiliki kecepatan yang diberikan menurut Persamaan kontinuitas untuk aliran stabil yang tidak tergantung oleh waktu:

$$m = \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 \quad (2.19)$$

Sedangkan

$$Q = v \cdot A$$

Sehingga

$$\rho_1 \cdot Q_1 = \rho_2 \cdot Q_2$$

Untuk fluida *incompressible*

$$\rho_1 = \rho_2$$

Maka

$$Q_1 = Q_2$$

Jadi Persamaan diatas dapat ditulis

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$$

m = Laju aliran massa (kg/s)

ρ = Massa jenis (kg/m³)

Q = Kapasitas aliran (m³/s)

v = Kecepatan aliran (m/s)

A = Luas penampang pipa (m²)

b. Aliran Pompa

Kecepatan fluida yang mengalir pada pipa menuju pompa, dapat dihitung

dengan Persamaan :

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.20)$$

v = Kecepatan aliran fluida dalam pipa (m/s)

Q = Kapasitas aliran (m³/s)

A = Luas penampang pipa (m²)

c. Kapasitas aliran pompa

Kapasitas pompa yang direncanakan harus ditentukan atas dasar kebutuhan maksimum. Namun untuk mengganti penyusutan air yang biasa, pompa harus dijalankan sedemikian hingga waktu kerja hariannya dipersingkat.

$$Q_f = \frac{Qk}{T} \quad (2.21)$$

Q_f = kapasitas pompa yang direncanakan (m³/jam)

Q = jumlah air keseluruhan (m³/hari)

k = koefisien kehilangan air di saluran (=1,1)

T = jumlah kerja aliran dalam kondisi kebutuhan puncak (=18-21 jam)

d. Head Total Pompa

Dalam merancang suatu sistem pompa, pertama-tama harus diketahui debit dan *head* yang diperlukan untuk mengalirkan fluida yang akan dipompakan. Dalam *head* pompa berbeda-beda tergantung dari massa jenis fluida yang akan dialirkan,

akan tetapi *standart* yang biasa digunakan produsen pompa untuk memberikan spesifikasi *head* pompa adalah *head* pompa dalam sumur atau kolam.

Cara menghitung *Total Dynamic Head* :

$$H = \Delta H_p + H_a + H_l + \frac{v_d^2}{2g} \quad (2.22)$$

$H = \text{Head}$ (m)

$\Delta H_p =$ Perbedaan head tekanan pada kedua permukaan $\Delta h_p = h_{p2} - h_{p1}$ (m)

$H_a = \text{Head statis}$ (m)

$H_L = \text{Head Losses}$ pipa, katup, belokan (m)

$\frac{v_d^2}{2g} =$ head kecepatan keluar(m)

Head total pompa salah satunya dipengaruhi oleh berbagai kerugian pada sistem perpipaan yaitu gesekan dalam pipa, katup, belokan, sambungan dan lain-lain. Untuk menentukan total dalam *head* pompa perlu menghitung terlebih dahulu kerugian-kerugian pada instalasi.

e. *Head* menggunakan Persamaan Hazen-William

Persamaan ini pada umumnya digunakan pada hitungan kerugian *head* dalam pipa yang relatif sangat panjang seperti jalur pipa penyalur air minum.

Head pipa terpasang dapat dinyatakan dengan rumus empiris:

$$H_f = \frac{10,666 \times Q^{1,85}}{C^{1,85} \times d^{4,85}} \times L \quad (2.23)$$

H_f = kerugian head (m)

Q = debit (m^3/s)

10,666 = konstanta atau ketetapan

C = koefisien untuk pipa (baja, plastic, tembaga)

d = diameter pipa

L = panjang pipa (m)

Atau dapat menggunakan rumus:

$$H_f = f \frac{v^2}{2g} \quad (2.24)$$

H_f = kerugian head (m)

v = kecepatan rata-rata didalam pipa (m^3/s)

- f = koefisien kerugian
g = percepatan gravitasi (9,8 m/s²)

Tabel 2.3 koefisien kerugian belokan pipa

Ø°		5	10	15	22,5	30	45	60	90
f	halus	0,004	0,034	0,042	0,066	0,130	0,236	0,471	1,129
	kasar	0,004	0,044	0,062	0,154	0,165	0,320	0,684	1,265

Pada Tabel 2.3 menunjukkan hubungan antara sudut dan koefisien kerugian dalam belokan pipa .

f. Daya Pada Sistem Pompa

Daya yang berhubungan pada sistem pompa ada tiga yaitu, daya air (*Water Horse Power*), daya poros (*brake Horse Power*), dan daya listrik untuk menjalankan sistem pompa. Besarnya daya dapat dihitung sebagai berikut :

a) Daya air (*Water Horse Power*)

Daya air dapat dihitung sebagai berikut :

$$WHP = 0,163 \times y \times Q \times H \quad (2.25)$$

WHP = *Water Horse Power* (kW)

Y = Berat air per satuan volume (kgf/l)

Q = Debit (m³/min)

H = *Head* total pompa (m)

b) Daya Poros (*Brake Horse Power*)

Daya poros diperlukan untuk menggerakkan pompa sama dengan daya hidrolis ditambah kerugian daya didalam pompa. Daya ini dapat dihitung sebagai berikut :

$$BHP = \frac{WHP}{\eta_{Pompa}} \quad (2.26)$$

BHP = *Brake Horse power* (kW)

WHP = *Water Horse Power* (kW)

η_{pompa} = Efisiensi pompa

c) Daya Motor

Daya penggerak adalah daya poros dikalikan dengan *service factor*. Dapat dihitung sebagai berikut :

$$P \text{ motor} = BHP \times K \quad (2.27)$$

P motor = Daya motor (kW)
 BHP = *Brake Horse Power* (kW)
 K = Faktor Koreksi/*Service Factor*

Pada daya motor dapat diambil dari hasil perhitungan diatas akan tetapi banyak yang mengatakan bahwa hitungan diatas belum memenuhi dikarenakan pada motor penggerak memiliki rugi-rugi atau efisiensi, jadi dapat dihitung sebagai berikut :

$$P = \frac{P \text{ motor}}{\eta \text{ Motor}} \quad (2.28)$$

P = Daya (kW)
 P motor = Daya motor (kW)
 η motor = Efisiensi motor

Bila dilihat dari motor 3 fasa, dapat dihitung menggunakan Persamaan sebagai berikut :

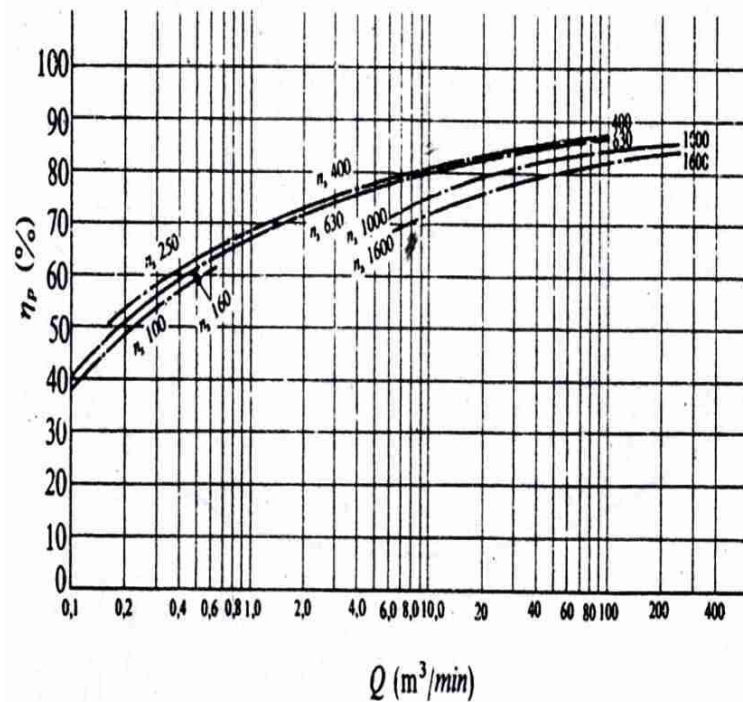
$$P_{in} = \sqrt{3} V \cdot A \cdot \cos\phi$$

Atau dapat menggunakan Persamaan berikut:

$$P_{in} = V \cdot A \cdot \cos\phi \quad (2.29)$$

P_{in} = Daya masuk (kW)
 V = Tegangan (Voltage)
 I = Arus (Ampere)
 $\cos\phi$ = Faktor daya

Pompa sentrifugal ada dua variabel penting untuk karakteristik hidrolis dan kinerja mekanik yaitu: *Efisiensi* (η), dan kapasitas pompa (Q). Gambar 2.15 menunjukkan kurva kinerja pompa air.



Gambar 2.16 kurva kinerja pompa Sentrifugal (ir.sularso, 2000)

Pada Gambar 2.16 menjelaskan kurva kinerja efisiensi dan kapasitas pompa masing-masing menghasilkan peningkatan dan penurunan yang monoton melawan laju aliran, sedangkan efisiensi berada dalam hubungan semi-kuadrat dengan kapasitas pompa. Titik efisiensi terbaik ditunjukkan pada kapasitas $100\text{m}^3/\text{min}$ dengan nilai $\pm 85\%$

Tabel 2.4 Peringkat Daya untuk *Driver Motor*

<i>Motor nameplate rating</i>		<i>Percentage of rated pump power</i>
kW	(hp)	%
<22	(<30)	125
22 to 55	(30 to 75)	115
>55	(>75)	110

Pada Tabel 2.4 motor listrik harus memiliki rating daya, termasuk *service factor*, sekurang-kurangnya sama dengan presentase daya pada kondisi pengenal popa yang diberikan pada Tabel 2.4 (API Standard 610/ISO 13709).

2.9 Sistem Proteksi Pembangkit Listrik Tenaga Angin dan Tenaga Matahari

2.9.1 Proteksi Arus dari Turbin Angin dan Panel Surya

Kebocoran arus pada *String* turbin angin dan panel surya akan muncul jika terjadi kesalahan pengkabelan atau terjadi hubungan arus pendek (*Short*) pada panel surya. Pada Kondisi normal, arus di setiap *string* dijumlahkan dan masuk ke *Solar Charge Controller*. Begitu terjadi gangguan pada *String*, tegangan *String* yang mengalami gangguan akan lebih rendah secara signifikan dibandingkan *String* yang tidak mengalami gangguan. Hal ini menyebabkan mengalirnya arus dari *string* yang sehat ke *string* yang mengalami gangguan.

Sejumlah besar arus dari *String* yang sehat dapat meningkatkan temperature modul panel surya yang mengalami gangguan. Hal ini juga mungkin dapat menyebabkan kebakaran jika tidak dilengkapi dengan proteksi arus lebih.



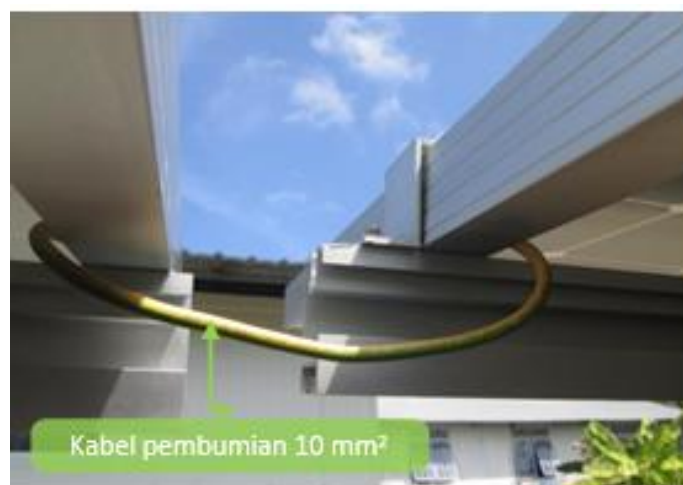
Gambar 2.17 MCB untuk Arus DC

Pada Gambar 2.17 menjelaskan mengenai *Miniature Circuit Breaker* (MCB) untuk tegangan *Direct Current* (DC) yang akan bekerja ketika terjadi *short* pada *String* panel surya, Setiap MCB dipasang pada kutub positif dan negatif dari panel surya karena menggunakan MCB DC yang cara kerjanya berbeda dengan MCB AC.

2.9.2 Pembumian pada Turbin Angin dan Panel Surya

Pembumian adalah suatu teknik untuk menyambungkan material yang bersifat konduktif secara elektrik ke bumi. Pembumian bertujuan untuk memastikan instalasi yang aman dari gangguan arus yang dapat membahayakan keselamatan pengguna. Pembumian menyambungkan konduktor yang sedang aktif dan juga konduktor lain yang tidak sedang dialiri arus seperti turbin angin, tiang penopang turbin, rangka modul fotovoltaik, struktur penopang, selungkup berbahan logam, dan peralatan konduktif lainnya. Selain itu juga pembumian memiliki fungsi antara lain:

- a. Melindungi instalasi dan peralatan kelistrikan dari gangguan arus dan sambaran petir.
- b. Menghindari perbedaan potensial pada komponen konduktif dengan cara menyatukan ikatan ekipotensial.
- c. Memastikan keamanan untuk manusia dan binatang dari sengatan listrik baik langsung (kontak langsung dengan konduktor aktif) maupun tidak langsung (menyentuh komponen konduktif yang teraliri listrik karena gangguan insulasi).
- d. Menyediakan jalur aman untuk menyalurkan gelombang petir ke tanah.



Gambar 2.18 Grounding pada Panel Surya

Pada Gambar 2.18 diperlihatkan mengenai contoh pembumian pada panel surya dapat terlihat ukuran kabel yang digunakan 10 mm². Pembumian ini diperlukan untuk memastikan bagian terbuka konduktif yang tidak aktif atau biasanya tidak dialiri arus di system PLTS *Off-Grid* berada pada level tegangan yang sama dan potensial nol relative terhadap bumi. Komponen yang tidak aktif mencakup bingkai panel surya, struktur penopang, conduit kabel berbahan logam, selungkup pada kotak penggabung dan panel distribusi.

2.10 Kebutuhan Air Tanaman Padi

Tanaman padi yang tumbuh di wilayah dengan cuaca panas, kering, dan angin yang banyak akan menguapkan lebih banyak air daripada tanaman yang tumbuh di lingkungan yang lebih sejuk, lembab, dan angin yang tidak begitu kuat. Oleh karena itu, pertumbuhan tanaman padi di daerah yang lebih panas dan kering memerlukan lebih banyak pasokan air. Jumlah air yang dibutuhkan oleh pertumbuhan padi dan lingkungannya dapat diukur melalui proses transpirasi dan evaporasi yang dikenal sebagai evapotranspirasi. (Jhon Hardy et al., 2011.)

Di Indonesia, terdapat dua jenis varietas padi yang sering ditanam, yaitu varietas lokal dan varietas unggul. Varietas lokal memiliki siklus pertumbuhan yang lebih lama dan memerlukan lebih banyak air daripada varietas unggul. Meskipun begitu, dari sudut pandang rasa, masyarakat cenderung menganggap varietas lokal lebih lezat daripada varietas unggul. Perbandingan kebutuhan air kedua jenis varietas ini dapat dilihat dalam Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Konsumsi air tanaman padi

Tahap pertumbuhan	Varietas Lokal			Varietas Unggul		
	mm/hari	l/det/ha	hari	mm/hari	l/det/ha	hari
Pengolahan tanah	12,7	1,5	-	12,7	1,5	
Pembibitan	3	0,4	20	3	0,4	20
Tanam s/d Primordial	7,5	0,9	40	6,4	0,75	35
Primordial s/d Bunga	8,8	1	25	7,7	0,9	20
Bunga 10% s/d Penuh	8,8	1	20	9	1	20
Bunga penuh s/d Pemasakan	8,4	1	20	7,8	0,9	20
Pemasakan s/d Panen	0	0	15	0	0	15

2.11 Penelitian terkait

Tabel 2.6 Penelitian Terkait

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1	Design of Micro Wind Turbine for Low Wind Speed Areas: A Review (Nongdhar & Goswami, 2018)	Deibanehbok Nongdhar	Department of Electrical and Electronics Engineering, School of Technology, Assam Don Bosco University Airport Road, Azara, Guwahati - 781017, Assam, INDIA	Makalah ini membahas tentang <i>review</i> eksklusif dari desain turbin angin untuk kecepatan angin yang rendah dengan perbandingan turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal.
2	Design and Modelling of a Large-Scale Solar Water Pumping System for Irrigation in Saudi Arabia (Alshamani	Abdulhamid Alshamani	Memorial University of Newfoundland Faculty of Engineering	Jurnal ini membahas menggambarkan studi komprehensif tentang penggunaan pompa air tenaga surya skala besar sistem di Riyadh, Arab Saudi. Studi ini menyediakan ukuran sistem terperinci dan pemodelan dinamis

	& Iqbal, 2017).			menggunakan perangkat lunak Homer
3	A Comparative Study of Photovoltaic Water Pumping System Driving Conventional AC Single-phase and Three-phase Motor Sentrifugal Pumps(Gunawan et al., 2022)	Yohanes Gunawan	Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral	Jurnal ini membahas tentang perbandingan pompa air <i>sentrifugal</i> 1 fasa dengan 3 fasa konvensional untuk mengetahui paling efektif bekerja dengan menggunakan inverter tanpa baterai
4	Design, simulation of different configurations and lifecycle cost analysis of solar photovoltaic–water-pumping system for agriculture applications: use cases and implementati on issues (Kumar et al., 2022)	Ashok Kumar	Department of Electrical and Electronics Engineering, PSG College of Technology, Coimbatore, India	Jurnal ini membahas desain untuk rencana memajukan pertanian di wilayah India dengan mengganti seluruh pompa air dari energi fosil menjadi energi baru terbarukan dengan proyek berkelanjutan oleh pemerintahannya sampai 2030
5	Kebutuhan air tanaman padi (<i>oryza savita</i>) sawah tadah hujan berdasarkan jadwal tanam hasil musyawarah tani dan katam di	Fitriyanti Hasnuri, Mahmud Achmad, Samsuar	Program studi Keteknikan Pertanian Universitas Hasanudin	Jurnal ini membahas tentang tanggal tanam yangsesuai dengan adanya air pada sawah tadah hujan untuk peningkatan hasil panen yang maksimal

	Kecamatan Maniangpajo Kabupaten Wajo (Hasnuri & Achmad, 2019)			
--	---	--	--	--

Berdasarkan Tabel 2.6 merupakan hasil dari beberapa penelitian terkait banyaknya pemodelan pompa air tenaga surya. Pada jurnal (Nongdhar & Goswami, 2018) menyajikan tentang *review* dari desain turbin angin mikro dengan kecepatan angin yang lebih rendah untuk di pedesaan maupun perkotaan dengan perbandingan antara turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal.

Pada jurnal (Alshamani & Iqbal, 2017) membahas tentang desain dan pemodelan sistem pompa air tenaga surya berskala besar untuk irigasi, hasil pembahasan jurnal ini mengatakan bahwa biaya air untuk irigasi lebih murah dibandingkan dengan menggunakan energi konvensional dengan biaya ekstraksi air dengan harga \$0,04 untuk setiap m³. Perbedaan dengan jurnal ini tidak menggunakan hitungan biaya investasi barang dan penjualan debit air per meter persegi.

Pada jurnal (Gunawan et al., 2022) membahas tentang penggunaan pompa air *sentrifugal* yang menggunakan fotovoltaik dengan perbandingan motor 1 fasa dan motor 3 fasa tanpa menggunakan baterai. Dengan ini mengetahui perbandingan untuk keluaran pompa dengan grafik keluaran air dan iradiasi matahari hampir sesuai naik turunnya.

Pada jurnal (Kumar et al., 2022) membahas desain, simulasi konfigurasi berbeda dan biaya siklus pompa air tenaga surya untuk pertanian di India pada kasus penggunaan dan masalah implementasi dalam jurnal ini merancang desain pompa

air tenaga surya. Pompa dengan menggunakan penampungan air pada sistem tetes dan sistem genang, pompa tanpa menggunakan penampungan air pada sistem tetes dan sistem genang. Dengan menggunakan keempat desain simulasi tersebut mendapatkan hasil untuk perbandingan biaya investasi jangka panjang. Perbedaan dengan jurnal ini yaitu tidak menggunakan sistem tetes.

Pada jurnal (Hasnuri & Achmad, 2019) membahas masa tanam padi pada lahan sawah tadah hujan untuk meningkatkan hasil panen, pada musim tanam gadu defisist air lebih sedikit ditanggal 15 Oktober dibandingkan dengan tanggal tanam 20 November-10 Desember yang merupakan rekomendasi katam.