

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Penerangan Jalan Umum

Penerangan jalan umum adalah suatu penerangan buatan yang menerangi suatu kawasan tertentu pada luas bidang tertentu. Penerangan jalan umum fasilitas vital yang sangat dibutuhkan oleh masyarakat. Penerangan jalan umum di perlukan untuk meningkatkan keamanan lalu lintas, keamanan berkendara terutama pada saat malam hari dengan adanya PJU (Penerangan Jalan Umum) dapat membuat pengguna jalan lebih berhati-hati dan merasa aman dalam perjalanannya sehingga dapat terhindar dari aksi kriminal. Ronald V.clark mengatakan bahwa *better lighting Will deter offenders who benefit from the cover of darkness* atau dalam bahasa Indonesia, penerangan yang baik akan mencegah pelaku yang mengambil manfaat kegelapan malam (Hidayat et al., 2020).

#### 2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah peralatan pembangkit listrik yang mengubah energi matahari menjadi listrik. PLTS juga sering disebut *Solar Cell*, atau *Solar Photovoltaic*, atau *Solar Energy*. PLTS menggunakan sinar matahari untuk menghasilkan listrik. DC (arus searah), yang dapat diubah menjadi listrik AC (arus bolak-balik) jika diperlukan. Karena itu, meski mendung, selama ada cahaya, PLTS bisa menghasilkan listrik (A.N, 2021). Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) fotovoltaik adalah sistem pembangkit listrik yang bersumber dari radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaik. Semakin tinggi intensitas

radiasi matahari, maka semakin besar daya listrik yang dihasilkannya (Kementerian Sumber Daya Mineral, 2020).

### **2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)**

PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu/Angin) yang dapat terdiri dari satu atau lebih turbin angin merupakan suatu sistem pembangkit listrik energi terbarukan yang saat ini banyak dikembangkan di Indonesia dalam rangka mendukung program pemerintah untuk penyediaan listrik. Mengacu pada Peraturan Presiden Nomor 22 tahun 2007 tentang Rencana Umum Energi Nasional termasuk Energi Baru dan Terbarukan (EBT). diperkirakan bahwa Indonesia memiliki potensi energi angin yang besar yakni 60.647 MW dan belum dimanfaatkan secara maksimal. Kapasitas terpasang PLTB di Indonesia sekarang ini baru mencapai 7,1 MW (Kesdm et al., 2019).

Berdasarkan SNI 8398:2017 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah sebuah sistem pembangkit listrik yang terdiri dari turbin angin yang dilengkapi dengan sistem transmisi, distribusi dan fasilitas pendukung lainnya (Kesdm et al., 2019).

### **2.4 Fungsi Penerangan Jalan**

Penerangan jalan di kawasan perkotaan mempunyai fungsi antara lain (BSN, 2008):

1. Menghasilkan kontras antara obyek dan permukaan jalan.
2. Sebagai alat bantu navigasi pengguna jalan.
3. Meningkatkan keselamatan dan kenyamanan pengguna jalan, khususnya pada malam hari.

4. Mendukung keamanan lingkungan.
5. Memberikan keindahan lingkungan jalan.

Penerangan jalan umum berbasis tenaga surya adalah sebuah alternatif yang hemat dan murah yang digunakan sebagai sumber listrik penerangan karena menggunakan sumber energi yang tak terbatas dan gratis dari bumi yaitu energi matahari. Menggunakan Panel Surya yang berfungsi untuk menerima cahaya / sinar matahari dan kemudian diubah menjadi energi listrik melalui proses *photovoltaic*, lalu disimpan di baterai sehingga tidak perlu disuplai dari PLN. Secara otomatis akan menyala pada sore hari dan padam pada pagi hari yang efisien dengan perawatan dan yang sangat mudah. Lampu penerangan jalan ini dirancang sebagai penyedia cahaya penerangan umum melalui sumber energi terbarukan, berumur ekonomis lama dan bebas biaya perawatan (Hidayat et al., 2020).

Lampu jalan bertenaga surya cocok untuk tempat yang tidak ada listrik dari perusahaan listrik utama. Dapat digunakan di jalan yang tidak terdapat lampu jalan atau di desa yang tidak terdapat listrik. Saat ini, mereka juga digunakan di kota-kota di pemukiman dan jalan utama. Penerangan Jalan Umum berbasis Surya / Solar Cell (PJUBS) menggunakan LED efisien dan memiliki daya yang lebih sedikit. Lampu LED ini jenis *high power* sangat terang, tahan lama dan hemat energi. Masa penggunaan Lampu LED ini bisa mencapai 50.000 jam dengan sumber daya DC. Baterai yang dipakai yaitu baterai bebas perawatan (*maintenance free*) jenis VRLA. Dengan menggunakan alat ini, sudah mempunyai sumber energi sendiri tanpa bergantung dengan pihak lain, ramah lingkungan dan hemat BBM (Bahan Bakar Minyak) (Hidayat et al., 2020).

## 2.5 Jenis/Klasifikasi Jalan

Menurut Direktorat Pembinaan Jalan Kota (1992), fasilitas jalan yang menggunakan penerangan lampu jalan dapat diklasifikasikan dalam beberapa kelas (Nurdiana, 2017):

### 1. Jalan Arteri Primer

Merupakan jalur jalan penampung kegiatan lokal dan regional, lalu lintas sangat padat jalan ini, sehingga perlu penerangan jalan yang optimal. Tingkat iluminasi rata-rata (lux) 50 Lux.

### 2. Arteri Sekunder

Merupakan penampung jalur jalan kegiatan local dan regional sebagai pendukung jalan arteri primer, dimana kondisi lalu lintas pada jalur ini padat sehingga memerlukan lampu yang sama dengan arteri primer. Tingkat iluminasi rata – rata (lux) 50 Lux.

### 3. Kolektor Primer

Merupakan jalur pengumpul dari jalan – jalan lingkungan sekitarnya yang akan bermuara pada jalan arteri primer dan arteri sekunder. Jenis lampu yang akan digunakan lebih rendah dari pada jalan arteri. Tingkat iluminasi rata – rata (lux) 30 Lux.

### 4. Jalan Lingkungan

Merupakan jalur jalan lingkungan perumahan, pedesaan atau perkampungan Tingkat iluminasi rata – rata 15 – 20 lux.

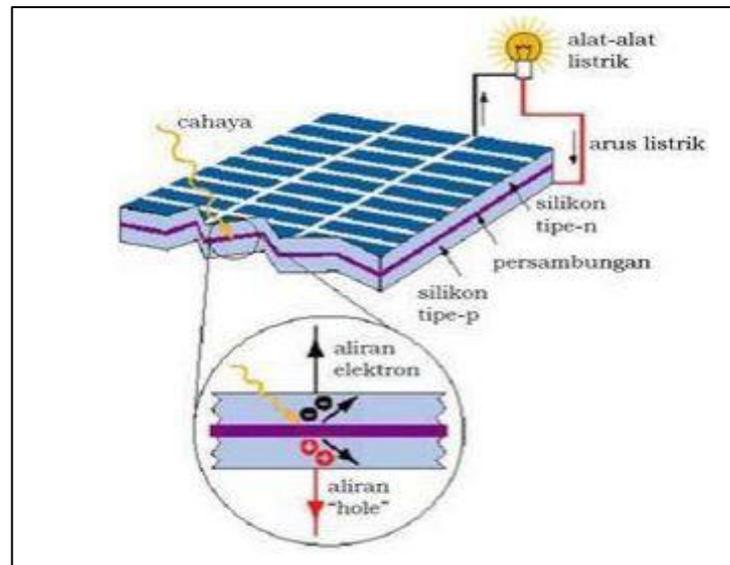
## 2.6 Prinsip Kerja Penerangan Jalan Umum Dengan Panel Surya

*Solar cell* terdiri minimal dua lapisan semikonduktor. Lapisan yang satu mengandung muatan positif dan yang lainnya mengandung muatan negatif. Dimana

semikonduktor inilah yang nantinya akan berperan untuk menghasilkan 7 muatan-muatan listrik. Cahaya matahari terdiri dari partikel sangat kecil yang disebut dengan foton. Partikel cahaya matahari tersebut menghantam atom semikonduktor solar cell sehingga menimbulkan energi yang cukup besar untuk memisahkan elektron dari struktur atomnya (Rifa'i, 2022).

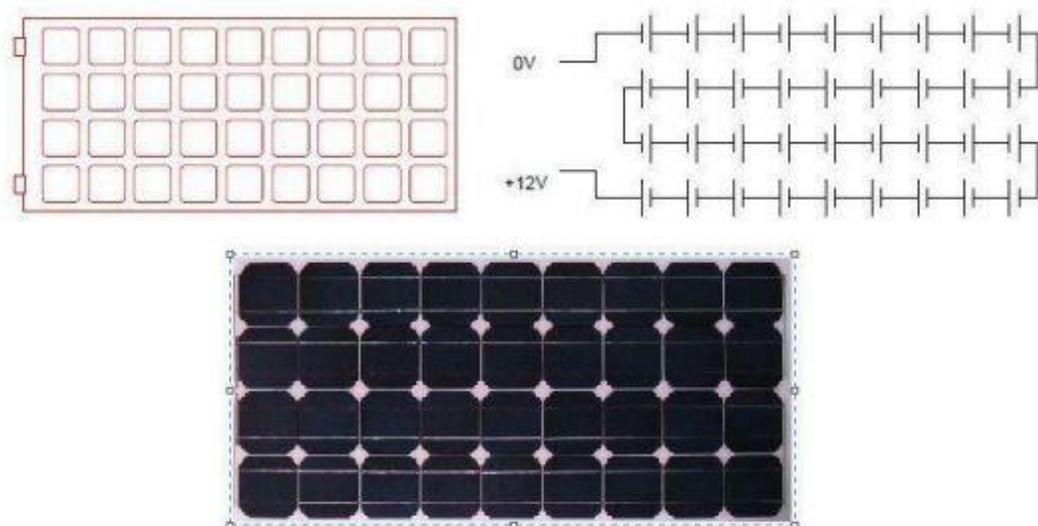
Elektron yang terpisah dari struktur atomnya muatannya menjadi negatif dan elektron tersebut akan bergerak bebas pada daerah pita konduksi dari material semikonduktor solar cell. Atom yang kehilangan elektron tersebut akan terjadi kekosongan atau hole pada strukturnya. Kehilangan elektron mengakibatkan atom bermuatan positif. Peristiwa foton yang menghantam atom semikonduktor mengakibatkan elektron bergerak bebas dan berpindah ke daerah yang bermuatan positif inilah yang menimbulkan energi listrik dari solar cell. Daerah semikonduktor dengan elektron bebas ini bersifat negatif dan bertindak sebagai pendonor elektron, daerah semikonduktor ini disebut dengan semikonduktor tipe N. Dan daerah semikonduktor yang memiliki hole atau kekosongan elektron bermuatan positif. Daerah semikonduktor ini bersifat sebagai penerima elektron. Daerah ini disebut dengan semikonduktor tipe P. Dibatasi daerah

semikonduktor positif dan negatif (PN Junction) akan menimbulkan energi yang mendorong elektron (-) (Rifa'i, 2022).



Gambar 2. 1 Cara Kerja PJUTS (Rifa'i, 2022)

Ketika disinari cahaya matahari, biasanya satu cell dari panel surya hanya menghasilkan tegangan dc sebesar 0,5 volt sampai dengan 1 volt, dan arus short 8 circuitnya dalam skala miliampere per  $\text{cm}^2$ . Besarnya tegangan dan arus yang dihasilkan setiap cell tidak akan cukup untuk mensuplai berbagai aplikasi. Sehingga *solar cell* biasanya tersusun oleh beberapa cell secara seri membentuk suatu panel. Satu panel *solar cell* biasanya terdiri dari 28 sampai 36 cell dan total menghasilkan tegangan dc sebesar 12 V dalam kondisi mendapatkan cahaya standart. Suatu modul *solar cell* bisa digabungkan secara seri maupun pararel untuk mendapatkan tegangan atau arus yang sesuai kebutuhan (Rifa'i, 2022).



Gambar 2. 2 Susunan cell pada solar panel (Rifa'i, 2022)

## 2.7 Proses Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Pembangkit listrik energi angin (PLTB) adalah hasil dari gabungan berbagai macam turbin angin yang bisa menghasilkan listrik. Proses kerja angin memutar turbin angin, kemudian turbin angin bekerja berkebalikan dari kipas angin (bukan menggunakan listrik untuk menghasilkan listrik, tetapi menggunakan angin untuk menghasilkan listrik). Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan disalurkan melalui kabel listrik untuk dimanfaatkan masyarakat. Contoh tegangan arus listrik yang dihasilkan adalah *alternating current* berbentuk gelombang. Energi listrik ini akan disimpan dalam baterai jika belum digunakan (Lubis et al., 2019).

## 2.8 Komponen Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya

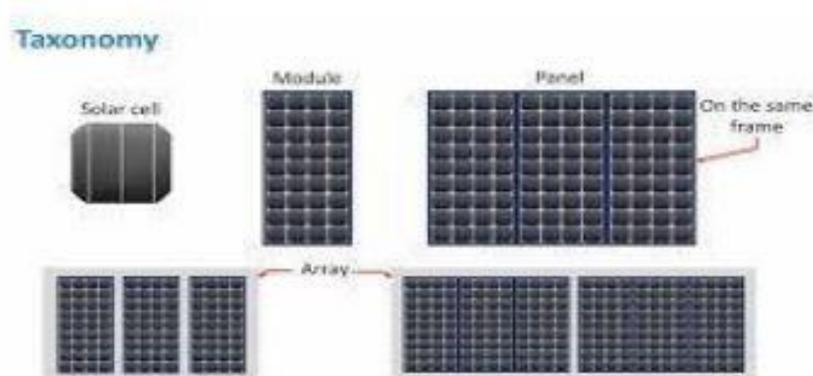
PJUTS adalah aplikasi penerangan lampu tenaga surya (PJUTS) yang menggunakan tenaga surya (matahari) sebagai sumber energi mandiri. Bagian atau kelengkapan pembangkit berupa panel surya (*solar panel/pv module/pv*

*panel/solar module*), *solar charger controller (battery control unit/battery control regulators)* dan baterai. Bagian atau peralatan beban berupa lampu LED.

Sedangkan bagian pendukung terdiri dari tiang, SCC (*Solar Charge Controller*), baterai, *panel box* dan aksesoris lainnya. Bagian pembangkit ini akan membentuk PJU-TS (Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya) untuk mensuplai listrik ke komponen beban (A.N, 2021).

### 2.8.1 Panel Surya

Panel surya merupakan komponen yang berfungsi untuk mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Panel ini tersusun dari beberapa sel surya yang dihubungkan secara seri maupun secara paralel. Sebuah panel surya umumnya terdiri dari 32-40 sel surya, tergantung dari ukuran panel, gabungan dari panel-panel ini akan membentuk suatu array (Yasa & Sarief, 2021).



Gambar 2. 3 Sel Surya, Modul Surya, dan Array (Yasa & Sarief, 2021)

Sel surya tersusun dari dua lapisan semikonduktor dengan muatan yang berbeda. Lapisan atas sel surya bermuatan negatif sedangkan lapisan bawahnya bermuatan positif. Silicon adalah bahan semikonduktor yang paling umum digunakan untuk sel surya. Dengan menggunakan pengaruh sinar surya dari bahan

semikonduktor, sel surya dapat langsung mengkonversi energi dari sinar matahari menjadi listrik arus searah (dc) (Yasa & Sarief, 2021). Dibawah ini ada beberapa jenis-jenis panel surya :

#### **2.8.1.1 Polycrystalline**

Merupakan panel surya yang memiliki susunan kristal acak tipe *polycrystalline* memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan *monocrystalline* untuk menghasilkan daya yang sama akan tetapi dapat menghasilkan pada saat mendung (A.N, 2021).

#### **2.8.1.2 Monocrystalline**

Merupakan panel surya yang paling efisiensi menghasilkan daya listrik 24%. Kelemahan dari panel ini adalah tidak akan berfungsi baik ditempat cahaya matahari kurang (mendung) (A.N, 2021).

#### **2.8.2 Baterai**

##### **a) Baterai Jenis VRLA**

Jenis ini sering juga disebut *Sealed Lead Acid battery* atau *Sealed Maintenance Free battery*. Secara fisik aki jenis ini terlindung / tertutup rapat, yang nampak dari luar hanya terminal (+) positif dan (-) negatif. Didesain agar cairan elektrolit tidak berkurang karena bocor atau penguapan. Aki jenis ini memiliki katup ventilasi yang hanya terbuka pada tekanan yang ekstrem untuk pembuangan gas hasil reaksi kimianya. Tidak ada katup untuk isi ulang cairan elektrolitnya, karenanya dikenal dengan aki bebas perawatan (*Maintenance Free Battery*) (A.N, 2021).

b) Jenis Lead-Acid

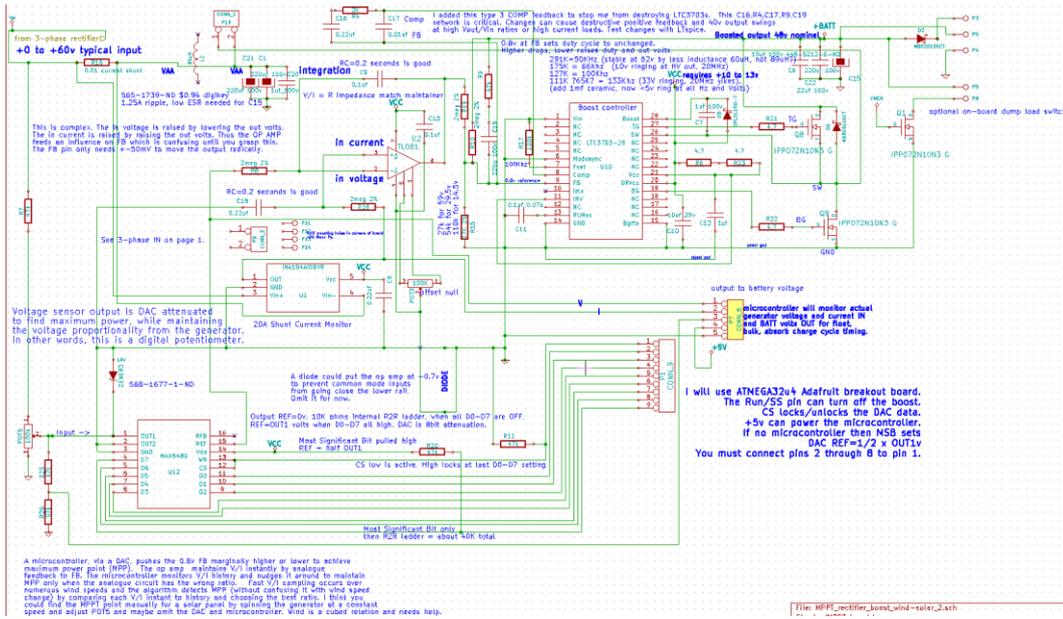
Baterai lead acid merupakan salah satu media penyimpanan energi yang banyak digunakan karena biaya bahan baku yang relatif rendah, ketangguhan baterai, efisiensi yang tinggi yaitu 75-80%, dan dapat didaur ulang. Baterai lead acid sering digunakan untuk penyimpanan daya skala kecil, menengah dan besar dan dapat dikombinasikan dengan sumber energi terbarukan seperti sistem fotovoltaik. Pengisian daya yang berlebihan dapat mengurangi masa pakai baterai dan menyebabkan kerusakan baterai yang parah. Salah satu cara untuk menghindari kerusakan baterai adalah dengan membuat sistem pengisian baterai terkontrol yang dilengkapi dengan estimasi *State of Charge* (SOC) untuk menentukan energi/kapasitas yang tersisa dalam baterai (Yanaratri et al., 2023).

### **2.8.3 Solar Charger Controller**

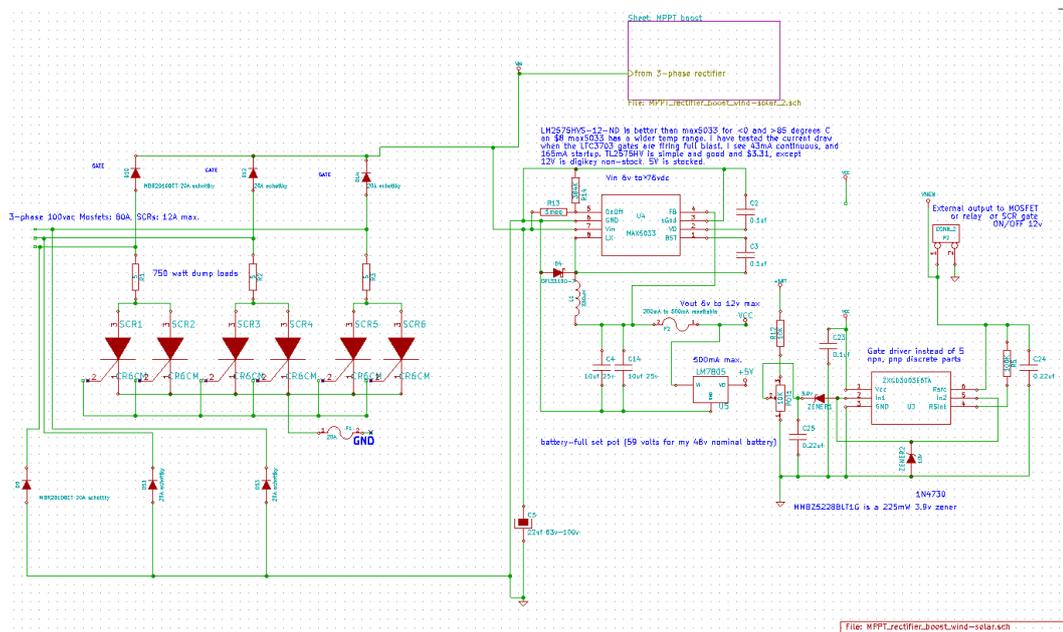
*Solar Charger Controller* merupakan elektronik yang digunakan untuk mengatur arus searah yang diisi ke baterai dan diambil dari baterai ke beban. *Solar charger controller* mengatur kelebihan pengisian karena sudah penuh dan kelebihan voltase dari tegangan listrik dari panel surya/*solar cell* Ada 2 jenis dari *solar charger controller* yaitu (A.N, 2021):

#### **2.8.3.1 MPPT (Maximum Power Point Tracking)**

MPPT dapat mengatasi tegangan keluar (*output*) atau arus berlebih dan dapat memasang panel surya sebesar yang diinginkan (A.N, 2021).



Gambar 2. 4 Skematik MPPT Solar Wind Controller (Definitionofis, 2021)



Gambar 2. 5 Skematik MPPT Solar Wind Controller (Definitionofis, 2021)

2.8.3.2 PWM (Pulse Width Modulation)

PWM tidak dapat membatasi tegangan keluar arus tegangan PWM bergantung pada banyak berapa panel surya yang digunakan (A.N, 2021).

#### 2.8.4 Inverter

Inverter memiliki peranan penting dalam keseluruhan rangkaian pemasangan panel surya. Hal ini karena fungsi inverter yang dapat mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak balik (AC). Seperti diketahui panel surya dapat mengubah cahaya menjadi energi listrik DC melalui proses *photovoltaic*, tetapi kebanyakan peralatan elektroknika yang ada di rumahan menggunakan arus AC oleh karena itu inverter memiliki peran yang signifikan disini.

Pada dasarnya semua alat dibuat sesuai dengan spesifikasi penggunaannya, begitu juga dengan inverter. Sesungguhnya apapun jenis inverter pasti tujuan utamanya yaitu mengubah arus DC menjadi arus AC. Sehingga inverter ini membutuhkan baterai sebagai sumber energi listriknya.

### 2.9 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

#### 1. Turbin Angin

Turbin angin dibagi menjadi dua jenis berdasarkan tipe porosnya yaitu (Mahmuddin et al., 2018) :

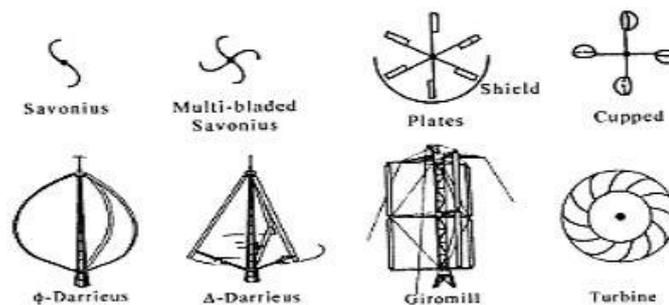
##### a. Turbin Angin Tipe Horizontal (*Horizontal-Axis Wind Turbine/HAWT*)

HAWT merupakan turbin yang poros utamanya berputar menyesuaikan arah angin. Agar rotor dapat berputar dengan baik, arah angin harus sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap arah putaran rotor. Biasanya turbin jenis ini memiliki *blade* berbentuk *airfoil* seperti bentuk sayap pada pesawat. Secara umum semakin banyak jumlah *blade*, semakin tinggi putaran turbin. Setiap desain *rotor* mempunyai kelebihan dan kekurangan. Kelebihan turbin jenis ini, yaitu memiliki efisiensi yang tinggi, dan *cut-in wind speed* rendah. Kekurangannya, yaitu turbin

jenis ini memiliki desain yang lebih rumit karena *rotor* hanya dapat menangkap angin dari satu arah sehingga dibutuhkan pengarah angin.

b. Turbin Angin Tipe Vertikal (*Vertical-Axis Wind Turbine/VAWT*)

VAWT merupakan turbin angin sumbu tegak yang gerakan poros dan rotor sejajar dengan arah angin, sehingga rotor dapat berputar pada semua arah angin. VAWT juga mempunyai beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihannya, yaitu memiliki torsi tinggi sehingga dapat berputar pada kecepatan angin rendah, generator dapat ditempatkan di bagian bawah turbin sehingga mempermudah perawatan dan kerja turbin tidak dipengaruhi arah angin. Kekurangannya yaitu kecepatan angin di bagian bawah sangat rendah sehingga apabila tidak memakai tower akan menghasilkan putaran yang rendah, dan efisiensi lebih rendah dibandingkan HAWT. Ada tiga model rotor pada turbin angin jenis ini, yaitu: Savonius, Darrieus, dan H rotor. Turbin Savonius memanfaatkan gaya drag sedangkan Darrieus dan H rotor memanfaatkan gaya lift.



Gambar 2. 6 Macam-Macam Desain Turbin Angin VAWT (Mahmuddin et al., 2018)

Adapun, karakteristik VAWT mempunyai berbagai keunggulan yaitu (Martinus et al., 2011):

1. Mempunyai desain dasar blade yang lebih sederhana dibandingkan tipe VAWT lainnya.

2. Mampu mendayagunakan aliran angin dari segala arah sehingga tidak dibutuhkan *yaw mechanism* seperti yang terdapat pada HAWT.
3. Konstruksi lebih sederhana dan biaya manufaktur juga lebih terjangkau dibandingkan HAWT karena VAWT tidak memerlukan *yaw mechanism*. Di samping itu, generator, *gearbox*, komponen-komponen mekanik maupun elektronik dapat diletakkan di atas permukaan tanah dan tidak harus diletakkan di atas menara (tower).
4. Proses perawatan lebih mudah karena konstruksi yang sederhana dan sejumlah komponen yang berada di atas permukaan tanah.
5. Mampu melakukan self start pada kecepatan angin yang relatif rendah.
6. Mampu menghasilkan torsi yang lebih tinggi dari kisaran kecepatan angin yang rendah hingga kecepatan angin yang tinggi.

Kelemahan yang ditemukan pada VAWT:

1. Pada skala yang sama, rata-rata VAWT hanya mampu menghasilkan 50% dari total efisiensi HAWT. Khususnya turbin angin Savonius, efisiensi yang mampu dihasilkan sekitar 15-25% dari total energi angin yang diterima.
2. *Tip speed ratio* atau  $\lambda$  yang dihasilkan rendah sehingga efisiensi yang dihasilkan akan rendah.

## 2. Generator Listrik

Generator listrik merupakan perangkat yang mengubah energi gerak menjadi energi listrik bolak balik dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Proses ini dikenal sebagai pembangkit listrik. Umumnya turbin angin skala kecil menggunakan generator magnet permanen atau generator sinkron yang

menghasilkan arus bolak balik dengan frekuensi yang berubah-ubah. Oleh konverter, arus bolak balik tersebut diserahkan dan disimpan kedalam baterai atau diubah kembali menjadi arus bolak balik oleh inverter dengan frekuensi 50Hz yang siap dikonsumsi oleh beban. Untuk PLTB skala kecil modus *off-grid*, generator yang umum digunakan adalah (Kesdm et al., 2019) :

1. Generator magnet permanen yang menghasilkan tegangan ac yang dalam sistem kontrol diserahkan menjadi dc dan untuk menghasilkan listrik ac dapat menggunakan inverter; atau
2. Generator sinkron yang menghasilkan tegangan listrik ac 3 fasa dan dilengkapi dengan rangkaian penyearah untuk menghasilkan tegangan dc, umumnya 12 Vdc atau 24 Vdc dan biasanya digunakan untuk memasok daya ke pengguna yang dilengkapi dengan baterai penyimpanan. Selanjutnya, tegangan ac dapat diperoleh dengan melengkapi dengan inverter yakni untuk mengubah tegangan dc menjadi tegangan ac, 50 Hz sesuai dengan kebutuhan pelanggan. Untuk turbin angin yang menggunakan generator sinkron ac dan dihubungkan ke grid (On-grid) diperlukan sinkronisasi antara output PLTB (tegangan dan frekuensi) dan tegangan dan frekuensi jaringan.

### 3. *Charge Controller* dan *Inverter*

*Charge controller* berfungsi mengoptimalkan arus pengisian ke baterai dan mengatur/membatasi arus pemakaian beban serta membuang arus keluaran turbin angin ke *dump load* saat baterai dalam kondisi penuh.

Inverter berfungsi untuk mengubah arus listrik searah menjadi arus listrik bolak-balik 240VAC/50Hz. Subsistem kontrol berfungsi untuk mengontrol daya

listrik ke pemakai/pengguna/konsumen dengan kondisi operasi tertentu yakni tegangan, arus, dan frekuensi serta pasokan energi yang telah ditetapkan.

Subsistem kontrol yang dilengkapi pada panel kontrol pada umumnya adalah kontrol elektronik untuk pengaturan tegangan dan frekuensi, dan penggunaan dum load berupa beban resistif untuk pengontrolan pasokan lebih ke pemakai. Fungsi sistem kontrol pada sistem *Off-grid* yang digunakan untuk mengisi baterai adalah mencegah pengisian-lebih pada baterai, dan sistem ini umumnya adalah dari jenis elektronik (Kesdm et al., 2019).

#### 4. Baterai

Sistem penyimpanan berupa baterai berfungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin dengan mempertimbangkan spesifikasi sebagai berikut:

- Jenis: *Flooded/Gel Lead-Acid* atau *Lithium Ion*.
- Tipe: *Deep cycle - Depth of Discharge (DOD): 80%*
- Umur pakai: *2000 cycle @80% DOD*
- Temperatur: Max. 50°C

## 2.10 Jenis Lampu Penerangan Jalan

Jenis lampu penerangan jalan secara umum menurut karakteristik dan penggunaannya:

Tabel 2. 1 Jenis Lampu penerangan jalan secara umum menurut karakteristik dan penggunaannya (Badan Standardisasi Nasional No.7391, 2008)

Jenis lampu	Efisiensi rata-rata (lumen/watt)	Umur rencana rata-rata (jam)	Daya (watt)	Pengaruh terhadap warna objek	Keterangan
Lampu tabung <i>fluorescent</i> tekanan rendah	60-70	8.000 - 10.000	18 – 20;36 - 40	Sedang	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Untuk jalan kolektor dan lokal;</li> <li>- Efisiensi cukup tinggi tetapi berumur pendek;</li> <li>- Jenis lampu ini masih dapat digunakan untuk hal-hal yang terbatas.</li> </ul>
Lampu gas merkuri tekanan tinggi (MBF/U)	50 – 55	16.000 – 24.000	125; 250; 400; 700	Sedang	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Untuk jalan kolektor, lokal dan persimpangan;</li> <li>- Efisiensi rendah, umur panjang dan ukuran lampu kecil;</li> <li>- Jenis lampu ini masih bisa digunakan secara terbatas.</li> </ul>
Lampu gas sodium bertekanan rendah (SOX)	100 – 200	8.000 – 10.000	90; 180	Sangat buruk	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Untuk jalan kolektor, lokal, persimpangan, penyebrangan, terowongan, tempat peristirahatan(<i>rest area</i>);</li> <li>- Efisiensi sangat tinggi, umur cukup panjang,</li> </ul>

					<p>ukuran lampu besar sehingga sulit untuk mengontrol cahayanya dan cahaya lampu sangat buruk karena warna kuning;</p> <p>- Jenis lampu ini dianjurkan digunakan karena faktor efisiensi yang sangat tinggi.</p>
Lampu gas sodium tekanan tinggi (SON)	110	12.000 – 20.000	150; 250; 400	Buruk	<p>- Untuk jalan tol, arteri, kolektor, persimpangan besar/luas dan <i>interchange</i>;</p> <p>- Efisiensi tinggi, umur sangat panjang, ukuran lampu kecil, sehingga mudah pengontrolan cahayanya;</p> <p>- Jenis lampu ini sangat baik dan sangat dianjurkan untuk digunakan.</p>

### 2.11 Sistem Penempatan Lampu Penerangan Jalan

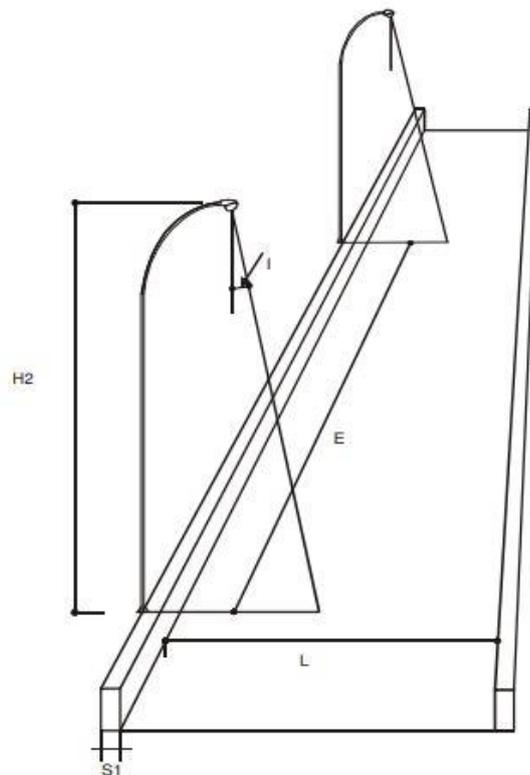
- 1) Penempatan lampu penerangan jalan harus direncanakan sedemikian rupa sehingga dapat memberikan :
  - a. Kemerataan pencahayaan;
  - b. Keselamatan dan keamanan bagi pengguna jalan;
  - c. Pencahayaan yang lebih tinggi di area tikungan atau persimpangan, dibanding pada bagian jalan yang lurus;
  - d. Arah dan petunjuk (guide) yang jelas bagi pengguna jalan dan pejalan kaki.

- 2) Sistem penempatan lampu penerangan jalan yang disarankan seperti pada tabel dibawah ini:

Tabel 2. 2 Penempatan Lampu Penerangan Jalan (Badan Standardisasi Nasional No.7391, 2008)

Jenis jalan / jembatan	Sistem penempatan lampu yang digunakan
Jalan arteri	sistem menerus dan parsial.
Jalan kolektor	sistem menerus dan parsial.
Jalan lokal	sistem menerus dan parsial.
Persimpangan, simpang susun, <i>ramp</i>	sistem menerus.
Jembatan	sistem menerus.
Terowongan	sistem menerus bergradasi pada ujung-ujung terowongan.

- 3) Pada sistem penempatan parsial, lampu penerangan jalan harus memberikan adaptasi yang baik bagi penglihatan pengendara, sehingga efek kesilauan dan ketidaknyamanan penglihatan dapat dikurangi.
- 4) Perencanaan dan penempatan lampu penerangan jalan dapat dilihat pada Gambar 2.7



Gambar 2. 7 Penempatan Lampu Penerangan (Badan Standardisasi Nasional No.7391, 2008)

Keterangan :

H = tinggi tiang lampu

L = lebar badan jalan, termasuk median jika ada

E = jarak interval antar tiang lampu

$S1 + S2$  = proyeksi kerucut cahaya lampu

$S1$  = jarak tiang lampu ke tepi kereb

$S2$  = jarak dari tepi kereb ke titik penyinaran terjauh

I = sudut inklinasi pencahayaan

- 5) Batasan penempatan lampu penerangan jalan tergantung dari tipe lampu, tinggi lampu, lebar jalan dan tingkat pemerataan pencahayaan dari lampu

yang akan digunakan. Jarak antar lampu penerangan secara umum dapat mengikuti batasan seperti pada Tabel 2.4 (A Manual of Road Lighting in Developing Countries). Dalam tabel tersebut dipisahkan antara dua tipe rumah lampu. Rumah lampu (lantern) tipe A mempunyai penyebaran sorotan cahaya/sinar lebih luas, tipe ini adalah jenis lampu gas sodium bertekanan rendah, sedangkan tipe B mempunyai sorotan cahaya lebih ringan/kecil, terutama yang langsung ke jalan, yaitu jenis lampu gas merkuri atau sodium bertekanan tinggi.

#### 1. Rumah Lampu Tipe A

Tabel 2. 3 Rumah Lampu Tipe A (Badan Standardisasi Nasional No.7391, 2008)

Jenis lampu	Tinggi lampu (m)	Lebar jalan ( m )								Tingkat pencahayaan
		4	5	6	7	8	9	10	11	
35W SOX	4	32	32	32	-	-	-	-	-	3,5 LUX
	5	35	35	35	35	35	34	32	-	
	6	42	40	38	36	33	31	30	29	
55W SOX	6	42	40	38	36	33	32	30	28	6,0 LUX
90W SOX	8	60	60	58	55	52	50	48	46	
90W SOX	8	36	35	35	33	31	30	29	28	10,0 LUX
135W SOX	10	46	45	45	44	43	41	40	39	
135W SOX	10	-	-	25	24	23	22	21	20	20,0 LUX
180W SOX	10	-	-	37	36	35	33	32	31	
180W SOX	10	-	-	-	-	22	21	20	20	30,0 LUX

## 2. Rumah Lampu Tipe B

Tabel 2. 4 Rumah Lampu Tipe B (Badan Standardisasi Nasional No.7391, 2008)

Jenis lampu	Tinggi lampu (m)	Lebar jalan ( m )								Tingkat pencahayaan
		4	5	6	7	8	9	10	11	
50W SON atau 80W MBF/U	4	31	30	29	28	26	-	-	-	3,5 LUX
	5	33	32	32	31	30	29	28	27	
70W SON atau 125WMBF/U	6	48	47	46	44	43	41	39	37	
70W SON atau 125WMBF/U	6	34	33	32	31	30	28	26	24	6,0 LUX
100W SON	6	48	47	45	42	40	38	36	34	
150W SON atau 250W MBF/U	8	-	-	48	47	45	43	41	39	10 LUX
100W SON	6	-	-	28	26	23	-	-	-	
250W SON atau 400W MBF/U	10	-	-	-	-	55	53	50	47	
250W SON atau 400W MBF/U	10	-	-	36	35	33	32	30	28	20 LUX
400W SON	12	-	-	-	-	39	38	37	36	30 LUX

Keterangan :

- a. Jarak antar tiang lampu dalam meter.
- b. Rumah lampu (*lantern*) tipe A mempunyai penyebaran sorotan cahaya/sinar lebih luas.
- c. Rumah lampu (*lantern*) tipe B mempunyai penyebaran sorotan cahaya lebih ringan/ kecil, terutama yang langsung ke jalan. (BSN, 2008)

### 2.12 Penataan Letak Lampu Penerangan Jalan

Penataan/pengaturan letak lampu penerangan jalan diatur seperti pada Tabel 2.6. Di daerah-daerah atau kondisi dimana median sangat lebar (> 10 meter) atau pada jalan dimana jumlah lajur sangat banyak (> 4 lajur setiap arah) perlu dipertimbangkan dengan pemilihan penempatan lampu penerangan jalan kombinasi

dari cara-cara tersebut di atas dan pada kondisi seperti ini, pemilihan penempatan lampu penerangan jalan direncanakan sendiri-sendiri untuk setiap arah lalu-lintas.

Tabel 2. 5 Penataan letak lampu penerangan jalan (BSN, 2008)

<b>Tempat</b>	<b>Penataan / pengaturan letak</b>
Jalan satu arah	<ul style="list-style-type: none"> <li>- di kiri atau kanan jalan;</li> <li>- di kiri dan kanan jalan berselang-seling;</li> <li>- di kiri dan kanan jalan berhadapan;</li> <li>- di bagian tengah / separator jalan.</li> </ul>
Jalan dua arah	<ul style="list-style-type: none"> <li>- di bagian tengah / median jalan;</li> <li>- kombinasi antara di kiri dan kanan berhadapan dengan di bagian tengah / median jalan;</li> <li>- katenasi (di bagian tengah jalan dengan sistem digantung)</li> </ul>
Persimpangan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dapat dilakukan dengan menggunakan lampu menara dengan beberapa lampu, umumnya ditempatkan di pulau-pulau, di median jalan, diluar daerah persimpangan (dalam RUMIJA ataupun dalam RUWASJA)</li> </ul>

## 2.13 Metode Perhitungan Pencahayaan

### 2.13.1 Cahaya

Cahaya putih seperti jenis cahaya khusus yang dapat dipecah menjadi berbagai warna dengan menggunakan prisma kaca. Anda dapat melihat warna-warna ini pada pelangi ketika cahaya dibelokkan saat melewati tetesan air hujan. Cahaya hanya merupakan satu bagian dari berbagai jenis gelombang elektromagnetis yang terbang ke angkasa. Gelombang tersebut memiliki panjang dan frekuensi tertentu, yang nilainya dapat dibedakan dari energi cahaya lainnya dalam spektrum elektromagnetisnya. Cahaya dipancarkan dari suatu benda dengan fenomena sebagai berikut:

- a. Pijar padat dan cair memancarkan radiasi yang dapat dilihat bila dipanaskan sampai suhu 1000 K. Intensitas meningkat dan penampakan menjadi semakin putih jika suhu naik.
- b. Muatan Listrik: Jika arus listrik dilewatkan melalui gas maka atom dan molekul memancarkan radiasi dimana spektrumnya merupakan karakteristik dari elemen yang ada.
- c. Electro luminescence: Cahaya dihasilkan jika arus listrik dilewatkan melalui padatan tertentu seperti semikonduktor atau bahan yang mengandung fosfor.
- d. Photoluminescence: Radiasi pada salah satu panjang gelombang diserap, biasanya oleh suatu padatan, dan dipancarkan kembali pada berbagai panjang gelombang. Bila radiasi yang dipancarkan kembali tersebut merupakan fenomena yang dapat terlihat maka radiasi tersebut disebut fluorescence atau phosphorescence.

Cahaya nampak, seperti yang dapat dilihat pada spektrum elektromagnetik, diberikan dalam Gambar 3 menyatakan gelombang yang sempit diantara cahaya ultraviolet (UV) dan energi inframerah (panas). Gelombang cahaya tersebut mampu merangsang retina mata, yang menghasilkan sensasi penglihatan yang disebut pandangan (Parera et al., 2018).



Gambar 2. 8 Radiasi Tampak (Parera et al., 2018)

### 2.13.2 Fluks Cahaya

Fluks cahaya adalah besarnya energi cahaya yang dihasilkan pada setiap satuan waktu. Jika dirumuskan maka menjadi (Effendi; & Aldifian, 2012) :

$$\Phi = \frac{Q}{t} \quad (2.1)$$

Dimana :

$\Phi$  = fluks cahaya dalam lumen (lm)

Q = energi cahaya dalam lumen jam atau lumen detik

t = waktu dalam jam atau detik

Fluks cahaya adalah jumlah cahaya yang jatuh pada setiap sudut ruangan. Satu watt cahaya kira-kira sama dengan 680 lumen. Angka perbandingan 680 ini dinamakan ekivalen pancaran foto metris. Persamaan fluks cahaya dilambangkan  $\Phi$  dengan satuan lumen (lm) (Parera et al., 2018).

### 2.13.3 Intensitas Cahaya

Intensitas cahaya adalah arus cahaya yang dipancarkan oleh sumber cahaya dinyatakan dengan satuan unit Candela. Dirumuskan dengan (Nurdiana, 2017):

$$i = \frac{\Phi}{\omega} \quad (2. 2)$$

dan

$$K = \frac{\Phi}{P} \quad (2. 3)$$

Sehingga

$$i = \frac{K \cdot P}{\omega} \quad (2. 4)$$

Dimana:

$i$  = Intensitas cahaya dalam candela (cd)

$\Phi$  = Fluks cahaya dalam lumen (lm)

$K$  = Efikasi cahaya rata-rata lampu (lumen/watt)

$P$  = Daya lampu (P)

#### 2.13.3.1 Intensitas Penerangan

Fluks cahaya yang mengenai bidang yang diterangi seluas m<sup>2</sup> disebut dengan intensitas penerangan (E) dengan satuan lux, Bila suatu bidang dengan luas A m<sup>2</sup> diterangi dengan fluks cahaya, maka rata-rata intensitas penerangan itu sama dengan (Nurdiana, 2017):

$$E_{rata-rata} = \frac{\Phi}{A} \quad (2. 5)$$

Dimana:

$E_{rata-rata}$  = Intensitas cahaya (Lux atau lumen/m<sup>2</sup>)

$\Phi$  = flux cahaya dalam lumen

$A$  = luas bidang yang kena cahaya

### 2.13.3.2 Iluminansi

Luminansi merupakan ukuran menentukan tingkat kecerahan suatu benda. Luminansi yang terlalu besar dapat menyilaukan mata. Besarnya luminansi suatu sumber cahaya dapat dihitung dengan (Nurdiana, 2017) :

$$L = \frac{I}{A_s} \quad (2.6)$$

Dimana :

$L$  = Luminansi

$I$  = Intensitas cahaya (cd)

$A_s$  = Luas semu permukaan ( $m^2$ )

### 2.13.3.3 Efisiensi Cahaya

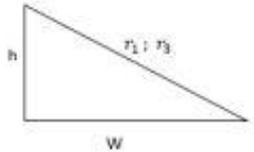
Efisiensi cahaya dapat dihitung berdasarkan persamaan (Nurdiana, 2017):

$$\eta = \frac{\Phi}{\Phi_{maks}} \quad (2.7)$$



1. Menghitung jarak lampu ke ujung jalan ( $r_1$  dan  $r_3$ )

Dengan diketahui tinggi tiang lampu ( $h$ ) dan lebar jalan ( $W$ ) maka dapat diperoleh jarak lampu ke ujung jalan ( $r_1$  dan  $r_3$ ) dengan rumus pythagoras sebagai berikut :



$$r_{1;3} = \sqrt{h^2 + W^2} \quad (2.8)$$

2. Menghitung intensitas penerangan pada lampu ( $I$ )

Dengan diketahui  $E_B$  standar penerangan adalah sebesar 6-10 lux (SNI 7391), tinggi tiang lampu ( $h$ ), dan jarak lampu keujung jalan ( $r_1$  dan  $r_3$ ), maka besar intensitas penerangan diperoleh dengan rumus berikut :

$$I = \frac{E_B(\text{standar}) \times r_{1;3}^3}{h} \quad (2.9)$$

3. Menghitung jarak lampu ke ujung jalan, posisi 0,5 dari jarak antar tiang ( $r_2$  dan  $r_4$ )

Dengan posisi 0,5 dari jarak antar tiang, maka besar kuat penerangan lampu ke ujung jalan adalah  $\frac{1}{2} E_B$ , dikarenakan pada kondisi tersebut:

$$\frac{1}{2} E_{B_1} + \frac{1}{2} E_{B_2} = E_B(\text{standar}) \quad (2.10)$$

Sehingga:

$$r_{2;4} = \sqrt[3]{\frac{Ih}{\frac{1}{2} E_B(\text{standar})}} \quad (2.11)$$

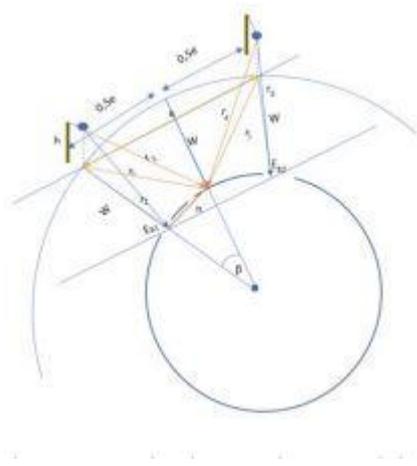
Dengan diketahuinya tinggi tiang lampu ( $h$ ) yang akan digunakan dan besar jarak lampu ke ujung jalan, posisi 0,5 dari jarak antar tiang ( $r_2$  dan  $r_4$ ) maka dapat diperoleh nilai  $x_1$  dan  $x_2$

$$x_{1,3} = r_{2,4}^2 + h^2 \quad (2.12)$$

Dengan diketahuinya tinggi tiang lampu ( $h$ ) yang akan digunakan dan besar jarak horizontal lampu ke ujung jalan, posisi 0,5 dari jarak antar tiang  $x_1$  dan  $x_2$  maka dapat diperoleh jarak antar tiang dengan rumus sebagai berikut :

$$e = 2 (\sqrt{x_1^2 - W^2}) \quad (2.13)$$

#### 2.14.2 Penentuan Jarak Antar Tiang Untuk Jalan Yang Melengkung



Gambar 2. 10 Perhitungan untuk penentuan jarak antar tiang untuk jalan yang melengkung dengan penempatan tiang lampu diluar lengkungan jalan (Nursita, 2020)

Keterangan :

EB : kuat penerangan lampu keujung jalan (Lux)

W : Lebar jalan (m)

h : tinggi tiang (m)

$e$  : jarak antar tiang (m)

$r_1$  ;  $r_3$  : jarak lampu ke ujung jalan (m)

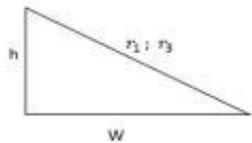
$r_2$  :  $r_4$  : jarak lampu ke ujung jalan, posisi 0,5 dari jarak antar tiang (m)

$R$  : jari-jari lingkaran jalan (m)

Dengan diketahuinya EB standar penerangan adalah sebesar 6-10 lux (SNI 7391), tinggi tiang dan lebar jalan, maka dapat ditemukan jarak antar tiang dengan cara (Nursita, 2020) :

1. Menghitung jarak lampu ke ujung jalan ( $r_1$  dan  $r_3$ )

Dengan diketahui tinggi tiang lampu ( $h$ ) dan lebar jalan ( $W$ ) maka dapat diperoleh jarak lampu ke ujung jalan ( $r_1$  dan  $r_3$ ) dengan rumus pythagoras sebagai berikut :



$$r_{1,3} = \sqrt{h^2 + W^2} \quad (2.14)$$

2. Menghitung intensitas penerangan pada lampu ( $I$ )

Dengan diketahui EB standar penerangan adalah sebesar 6-10 lux (SNI 7391), tinggi tiang lampu ( $h$ ), dan jarak lampu ke ujung jalan ( $r_1$  dan  $r_3$ ), maka besar intensitas penerangan diperoleh dengan rumus berikut :

$$I = \frac{E_{B(standar)} \times r_{1,3}^3}{h} \quad (2.15)$$

3. Menghitung jarak lampu ke ujung jalan, posisi 0,5 dari jarak antar tiang ( $r_2$  dan  $r_4$ )

Dengan posisi 0,5 dari jarak antar tiang, maka besar kuat penerangan lampu ke ujung jalan adalah  $\frac{1}{2} EB$ , dikarenakan pada kondisi tersebut

$$\frac{1}{2} E_{B_1} + \frac{1}{2} E_{B_2} = \frac{1}{2} E_{B \text{ (standar)}} \quad (2.16)$$

Sehingga :

$$r_{2,4} = \sqrt[3]{\frac{Ih}{\frac{1}{2} E_{B \text{ (standar)}}}} \quad (2.17)$$

Dengan diketahuinya tinggi tiang lampu (h) yang akan digunakan dan besar jarak lampu ke ujung jalan, posisi 0,5 dari jarak antar tiang ( $r_2$  dan  $r_4$ ) maka dapat diperoleh nilai  $x_1$  dan  $x_2$  :

$$x_{1,3} = r_{2,4}^2 - h^2 \quad (2.18)$$

Selanjutnya untuk mencari besar n, diperoleh dengan rumus berikut :

$$n = \sqrt{x_{1,3}^2 - w^2} \quad (2.19)$$

Setelah diperoleh besar n maka dapat dicari besar sudut setengah jarak antar tiang ke pusat lingkaran dengan menggunakan rumus tali busur lingkaran sebagai berikut :

$$\beta = \frac{\text{panjang busur } n \times 360^\circ}{2\pi r_{\text{lingkaran kecil}}} \quad (2.20)$$

Jadi untuk menghitung jarak antar tiang lampu dapat dihitung dengan rumus vektor sebagai berikut :

$$e = \sqrt{R_{\text{lingkaran besar}}^2 + R_{\text{lingkaran besar}}^2 - 2 \cdot R_{\text{lingkaran besar}} \cdot R_{\text{lingkaran besar}} \cos(2x\beta)} \quad (2.21)$$

### 2.14.3 Perhitungan Titik Penerangan

Menentukan jumlah titik lampu yang diperlukan pada penerangan jalan umum menggunakan persamaan (Sunarto et al., 2023) :

$$T = \frac{L}{S} + 1 \quad (2.22)$$

Dimana :

T = Banyaknya titik lampu yang dibutuhkan

L = Panjang lintasan jalan (m)

S = Jarak antar tiang (m)

Menentukan besar energi yang dibutuhkan (Sunarto et al., 2023) :

$$E_{load} = P_{load} \times t \quad (2.23)$$

Dimana :

$E_{load}$  = Energi yang dibutuhkan beban (Wh)

$P_{load}$  = Daya beban atau lampu

t = Lama pemakaian beban

## 2.15 Distribusi Cahaya

### 2.15.1 Distribusi Cahaya Berdasarkan Arah Pencahayaan

Distribusi cahaya atau penyebaran cahaya pada suatu ruangan dikenal beberapa istilah antara lain pencahayaan langsung, pencahayaan tidak langsung, pencahayaan semi langsung, pencahayaan semi tak langsung, serta pencahayaan

baur. Distribusi cahaya ini ditentukan oleh arah pencahayaan dan efek dari tempat lampu (armature/luminer) lampu. Secara rinci distribusi cahaya dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2. 6 Distribusi Cahaya (Parera et al., 2018)

Distribusi Cahaya	Keterangan
Langsung	90-100% sinar ke bawah dan 0-10 % sinar ke atas
Semi Langsung	60-90% sinar ke bawah dan 10-40 % sinar ke atas
Tidak Langsung	90-100% sinar ke atas dan 0-10 % sinar ke bawah
Semi Tidak Langsung	60-90% sinar ke atas dan 10-40 % sinar ke bawah
Baur	Pencahayaan tak langsung dengan armature/luminar bahan tembus pandang secara merata

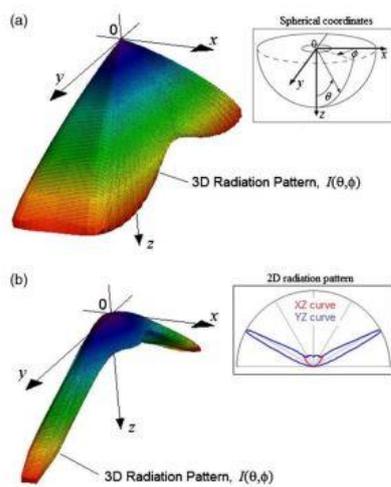
Berkaitan dengan fungsi distribusi cahaya dikenal beberapa istilah yaitu :

- a. Pencahayaan umum (*general lighting*), fungsi untuk penerangan umum secara merata dalam ruangan. Misalnya penerangan untuk ruang kerja atau ruang kelas.

- b. Pencahayaan setempat (*local lighting*), fungsi untuk penerangan setempat khususnya pada lokasi konsentrasi kerja seperti penerangan untuk menggambar, belajar atau untuk kerja khusus seperti tukang jam.
- c. Pencahayaan aksen (*accent lighting*), fungsi untuk memberikan aksen pada ruangan untuk kepentingan estesis pada interior suatu ruangan. Misalnya penempatan lampu pada dinding atau pada kolom suatu ruangan untuk memperindah ruangan.
- d. Pencahayaan gabungan (*ambient lighting*), merupakan pencahayaan keseluruhan dalam ruang yang merupakan gabungan berbagai model pencahayaan yang berfungsi untuk memberikan kesan ruang. (Parera et al., 2018).

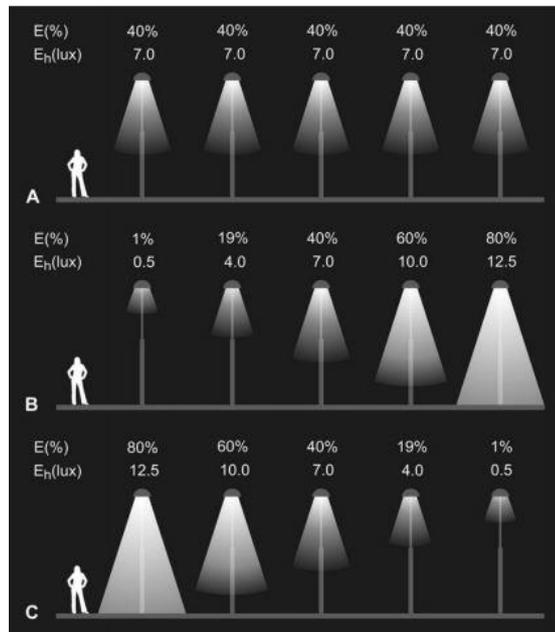
### **2.15.2 Pemodelan Distribusi Penerangan Jalan Umum**

Analisis penerangan jalan dan perhitungan desain adalah penerangan yang mengukur lumen per satuan luas ( $\text{lm}/\text{m}^2$ , *foot-candles*, atau lux) cahaya yang tiba di permukaan jalan. Distribusi cahaya di jalan dapat dimodelkan sebagai variasi spasial  $x$ ;  $y$  dari iluminasi, di mana  $x$  dan  $y$  adalah koordinat spasial di jalan raya (Moreno et al., 2014).



Gambar 2. 11 Pola radiasi tiga dimensi (a) menunjukkan ketajaman dari lampu (b) menunjukkan kehalusan profil pada lampu (Moreno et al., 2014)

**2.15.3 Pengaruh Distribusi Cahaya Pada Persepsi Keamanan**



Gambar 2. 12 Distribusi cahaya konvensional (A), menaik (B), dan menurun (C).

E(%) adalah persentase keluaran maksimum luminer.  $E_h(\text{lux})$  adalah iluminasi horizontal pada permukaan jalan lurus di bawah tiang lampu (Haans & de Kort,

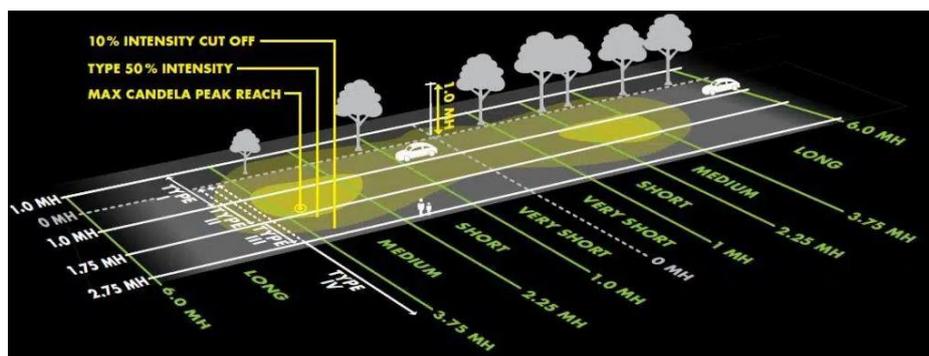
2012)

Pada Gambar 2.10 disimpulkan bahwa menerangi sekeliling pejalan kaki lebih penting daripada menerangi jalan yang terbentang di depannya. Yang penting, tidak adanya segmen jalan dengan interaksi distribusi cahaya menunjukkan bahwa pancaran cahaya dari lumener tidak mengacaukan efek eksperimental distribusi cahaya pada keselamatan yang dirasakan. Karena ruas jalan sama sekali tidak mempengaruhi persepsi keselamatan (Haans & de Kort, 2012).

#### 2.15.4 Klasifikasi Distribusi Cahaya Luminer

Distribusi fluks cahaya yang tepat dari lumener merupakan salah satu faktor penting dalam penerangan jalan raya yang efisien. Penting untuk mendapatkan jumlah penerangan yang tepat di jalan raya agar orang dapat melihat dengan baik dan aman. Lampu-lampu di jalan dipasang dengan cara tertentu untuk memastikan cahayanya sampai ke tempat yang dibutuhkan. Ada sistem yang membantu para insinyur dan desainer memilih lampu yang tepat untuk setiap jalan raya. Sistem melihat bagaimana cahaya menyebar ke atas dan ke bawah serta dari sisi ke sisi. Distribusi cahaya diklasifikasikan menjadi 2 kriteria yaitu distribusi cahaya vertikal dan distribusi cahaya lateral (Robert & Brown, 2004).

##### 2.15.4.1 Distribusi Cahaya Vertikal



Gambar 2. 13 Ilustrasi Distribusi Cahaya (Robert & Brown, 2004)

Distribusi cahaya vertikal dibagi menjadi tiga kelompok yaitu distribusi cahaya pendek (S), distribusi cahaya sedang (M), dan distribusi cahaya panjang (L) (Robert & Brown, 2004) :

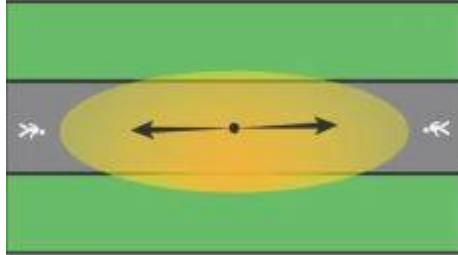
1. Distribusi Cahaya Pendek, sebuah lumener diklasifikasikan memiliki distribusi cahaya pendek ketika titik intensitas maksimumnya terletak di zona Short dapat dilihat pada gambar 2.2, yaitu dari TRL 1,0 MH hingga TRL 2,25 MH. Jarak lumener maksimum umumnya kurang dari 4,5 kali tinggi pemasangan.
2. Distribusi cahaya sedang, sebuah lumener diklasifikasikan memiliki distribusi cahaya sedang ketika titik intensitas maksimumnya terletak di zona Medium dapat dilihat pada gambar 2.2, yaitu dari TRL 2,25 MH hingga TRL 3,75 MH. Jarak lumener maksimum umumnya kurang dari 7,5 kali tinggi pemasangan.
3. Distribusi cahaya panjang, sebuah lumener diklasifikasikan memiliki distribusi cahaya yang panjang ketika titik intensitas maksimumnya terletak pada zona Long dapat dilihat pada gambar 2.2, yaitu dari TRL 3,75 MH hingga TRL 6,0 MH. Jarak lumener maksimum kurang dari 12 kali tinggi pemasangan.

#### **2.15.4.2 Distribusi Cahaya Lateral**

Distribusi cahaya lateral dibagi menjadi dua kelompok berdasarkan lokasi lumener dalam kaitannya dengan area yang akan diterangi yaitu lumener di atau dekat pusat area dan lumener dekat sisi area (Robert & Brown, 2004).

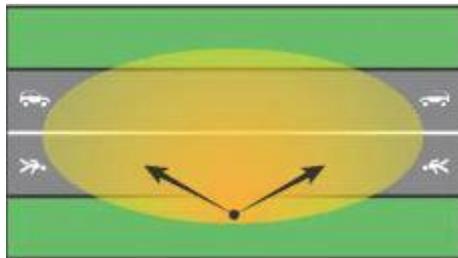
1. Tipe I, sebuah distribusi cahaya diklasifikasikan sebagai tipe I ketika intensitas cahaya maksimumnya jatuh antara 1 MH di sisi rumah dan 1 MH

pada sisi jalan dari posisi lumener. Distribusi tipe I diilustrasikan pada gambar 2.12.



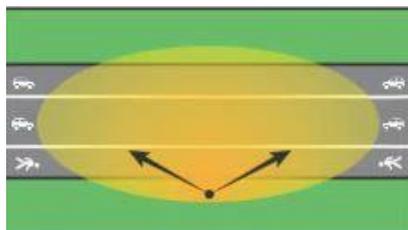
Gambar 2. 14 Distribusi Cahaya Tipe I (Robert & Brown, 2004)

2. Tipe II, sebuah distribusi cahaya diklasifikasikan sebagai tipe II ketika intensitas cahaya maksimumnya jatuh antara 1 MH sampai 1,75 MH di sisi jalan dari posisi lumener. Distribusi tipe II diilustrasikan pada gambar 2.13.



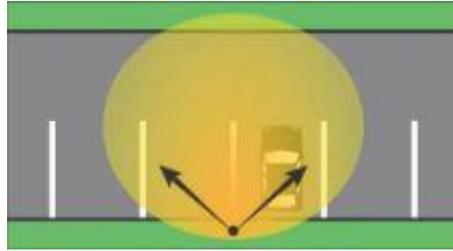
Gambar 2. 15 Distribusi Cahaya Tipe II (Robert & Brown, 2004)

3. Tipe III, sebuah distribusi cahaya diklasifikasikan sebagai tipe III ketika intensitas cahaya maksimumnya jatuh antara 1,75 MH sampai 2,75 MH di sisi jalan dari posisi lumener. Distribusi tipe III diilustrasikan pada gambar 2.14.



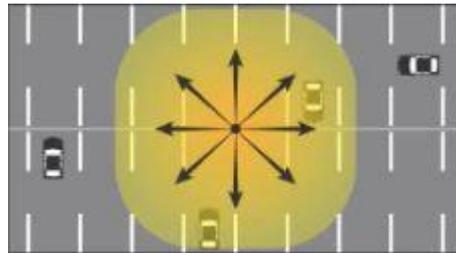
Gambar 2. 16 Distribusi Cahaya Tipe III (Robert & Brown, 2004)

4. Tipe IV, sebuah distribusi cahaya diklasifikasikan sebagai tipe IV ketika intensitas cahaya maksimumnya jatuh antara 2,75 MH sampai 3,7 MH di sisi jalan dari posisi lumener. Distribusi tipe IV diilustrasikan pada gambar 2.15.



Gambar 2. 17 Distribusi Cahaya Tipe IV (Robert & Brown, 2004)

5. Tipe V, sebuah distribusi cahaya diklasifikasikan sebagai tipe V ketika intensitas cahaya maksimumnya jatuh sirkular simetris di sekitar posisi lumener. Distribusi tipe V diilustrasikan pada gambar 2.16.



Gambar 2. 18 Distribusi Cahaya Tipe V (Robert & Brown, 2004)

## 2.16 Metode Perhitungan PV dan Turbin

Untuk menghitung nilai daya listrik bersih yang dihasilkan dari turbin angin digunakan persamaan sebagai berikut (Ali & Ammari, 2022) :

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A_\omega v^3 \quad (2. 24)$$

Dimana :

P = Daya listrik bersih turbin

$\rho$  = Kepadatan Udara

$C_p$  = Koefisien daya turbin

$A_0$  = Area sapuan bilah turbin

$v$  = Kecepatan angin

Untuk menghitung daya turbin angin yang diperlukan untuk menyalurkan beban lampu jalan, digunakan persamaan (Ali & Ammari, 2022):

$$WTC = \frac{\pi}{2} \times r^2 \times v^3 \times \rho \times \eta \quad (2.25)$$

Dimana :

WTC = Kapasitas turbin

$r$  = Radius turbin

$v$  = Kecepatan angin

$\rho$  = Kepadatan udara

$\eta$  = efisiensi

Kebutuhan daya panel surya PV dihitung melalui persamaan (Ali & Ammari, 2022) :

$$PVW = \frac{DL}{SDH \times LF \times PR} \quad (2.26)$$

Dimana :

PVW = Daya PV

DL = Beban Harian

SDH = Jam Puncak Matahari

LF = Faktor Kerugian

PR = Rasio kinerja PV

Kapasitas daya modul PV dihitung menggunakan rumus (Ali & Ammari, 2022) :

$$P_{PV} = \frac{P_{load}}{\eta_{module} \times \eta_{charge\ controller} \times \eta_{Battery} \times \eta_{cables}} \quad (2.27)$$

Watt puncak keseluruhan yang diperlukan untuk modul PV, dihitung menggunakan rumus:

$$P_{peak} = \frac{P_{PV}}{SDH} \quad (2.28)$$

Untuk menghitung arus listrik baterai digunakan persamaan berikut (Ali & Ammari, 2022) :

$$BAC = \frac{DHL \times AD}{B_{Loss} \times DOD \times NV} \quad (2.29)$$

Dimana :

BAC = Kapasitas baterai

DHL = Beban harian per jam

AD = Hari otonomi

DOD = Kedalaman debit

B<sub>Loss</sub> = Faktor loss baterai

NV = Tegangan nominal baterai

Arus pengontrol muatan, CCC dihitung menggunakan persamaan (Ali & Ammari, 2022) :

$$CCC = (NS)(SCC)(LF) \quad (2.30)$$

Dimana :

NS = Jumlah string

SCC = Arus hubung singkat

LF = Rata-rata loss

### **2.17 LCOE (*Levelized Cost Of Electricity*)**

Secara sederhana, LCOE dihitung dengan cara membagi total jumlah biaya suatu pembangkit dengan total jumlah listrik yang dibangkitkan oleh teknologi tersebut selama masa pakainya. LCOE merupakan alat yang umum dipakai untuk membandingkan biaya pembangkitan listrik dari berbagai macam teknologi. Komponen utama biaya dalam perhitungan LCOE, yaitu (Giwangkara & Saputra, 2019) :

1. Biaya investasi/biaya modal (CAPEX), yang meliputi biaya pembelian alat/teknologi, biaya instalasi, dan biaya perencanaan dan persiapan proyek.
2. Biaya O&M, yang meliputi biaya yang dikeluarkan untuk memelihara dan mengoperasikan pembangkit, misalnya biaya pembelian bahan bakar (variable O&M) dan biaya sewa/beli lahan (fixed O&M).
3. Faktor Kapasitas (Capacity Factor), merupakan rasio dari jumlah listrik yang dibangkitkan oleh suatu teknologi dibagi dengan jumlah listrik maksimum yang dihasilkan oleh suatu pembangkit berdasarkan nilai kapasitas

terpasangnya (dihitung dengan menganggap pembangkit selalu membangkitkan listrik sesuai dengan nilai kapasitas terpasang setiap waktunya).

4. Biaya pendanaan (seperti bunga dan WACC), adalah biaya dari pendanaan yang dibayarkan dalam kurun waktu tertentu. Biaya pendanaan berasal dari ekspektasi keuntungan dari investor dan juga biaya bunga terhadap utang.

Dengan dukungan kerangka regulasi yang tepat, LCOE PLTS skala besar dapat turun dari 6-10 ct/kWh (IDR 845- 1400/kWh) menjadi 3.5-8 ct/kWh (IDR 493-1125/kWh). Biaya tersebut sangat kompetitif dengan biaya pembangkitan listrik PLTS saat ini (Giwangkara & Saputra, 2019).

Semua biaya yang digunakan dalam proyek pengembangan komponen, baik instalasi maupun operasi, disebut sebagai *net present cost* (NPC) Persamaan di bawah ini dapat digunakan untuk menghitung biaya bersih saat ini (Fathurrachman et al., 2022) :

$$NPC = Capital Cost + Replacement Cost + O\&M Cost - Salvage \quad (2.31)$$

Dimana:

*Capital Cost* = biaya komponen

*Replacement Cost* = biaya ganti komponen

*O&M Cost* = biaya operasional dan perawatan

*Salvage* = biaya yang tersisa dari komponen

Cost of energy (COE) adalah biaya produksi 1 kWh energi listrik. COE dihitung dengan membagi biaya tahunan dengan produksi energi tahunan pabrik hibrida. Persamaan di bawah ini dapat digunakan untuk menghitung nilai COE :

$$COE = \frac{TAC}{Eetotsarved} \quad (2.32)$$

Dimana:

TAC (*total annualized cost*) = Biaya total tahunan pembangkit hibrid

*Etot served* = Total energi tahunan untuk beban (kWh)

## 2.18 SketchUp

SketchUp merupakan program aplikasi berbasis desain gambar pemodelan 3D yang mudah dan *powerfull*, dirancang untuk arsitek, *civil engineer*, pembuat film, *game developer* dan profesi terkait. Aplikasi ini dirancang untuk menjadi lebih mudah dan efisien, apalagi jika dilengkapi dengan plugin *Vray*, memiliki kemampuan komunikasi grafis, yang tidak kalah menarik dibandingkan program CAD 3D.

*Software* yang dikembangkan Google ini digunakan untuk membuat berbagai jenis model, desain rumah dan interior. *Software* ini sangat mudah digunakan dan model yang dibuat dapat diletakkan di *Google Earth* atau dipamerkan di *Google 3D Warehouse*. Program ini gratis, semua orang bisa mendownloadnya langsung tanpa harus bayar, akan tetapi *software Google SketchUp* mempunyai dua Versi, pertama *Google SketchUp* versi biasa dan versi Pro, untuk versi Pro, kita harus membayar lisensinya terlebih dahulu dan hasil gambarnya memungkinkan eksport ke Format dengan ekstensi .3ds, .dae, .dwg, .dxf, .fbx, .obj, .xsi, dan .wrl. Selain itu, *Google SketchUp* dapat digunakan untuk menyimpan screenshot obyek ke format .bmp, .png, .jpg dan .tif (Group, n.d.).

### 2.19 Dialux EVO

*DIALux* adalah program tata cahaya alami dan buatan gratis yang berkembang pesat dan memenuhi kebutuhan informasi teknologi lampu terkini, memiliki kemampuan membuat laporan teknis otomatis serta memiliki kemampuan visual rendering yang terus ditingkatkan. Kemampuan terakhir tersebut menjadi daya tarik bagi mahasiswa arsitektur karena memadukan teknis dan estetis.

Pada awalnya *DIALux* tidak dirancang untuk mensimulasikan cahaya alami. Namun, dalam perkembangannya, kemampuan simulasi cahaya alami ditambahkan. Walau masih cukup sederhana dan belum memberi keleluasaan untuk mensimulasikan cahaya alami yang terpantul-pantul, penambahan fasilitas ini amat membantu dalam optimasi antara cahaya alami dan buatan. Pada akhirnya, ketika perencana tata cahaya harus mempertimbangkan pemanfaatan cahaya alami secara optimal sebelum beralih ke cahaya buatan (yang memerlukan energi listrik), maka kemampuan *DIALux* untuk mensimulasi keduanya secara simultan menjadi amat realistis. *DIALux* diteliti agar dapat dipakai untuk pencahayaan alami secara lebih baik dengan kombinasi pencahayaan buatan, terutama pada tahap awal desain (Satwiko et al., 2011).

### 2.20 Homer

*HOMER* adalah software model simulasi yang mensimulasikan sistem yang layak untuk semua kemungkinan kombinasi peralatan yang dipertimbangkan pertimbangkan. *Homer* bekerja berdasarkan 3 hal, yaitu simulasi, optimasi, dan analisa sensitifitas. Ketiga hal tersebut bekerja secara beruntun dan memiliki fungsi masing-masing, sehingga didapat hasil yang optimal (Di & Pesisir, 2019).

## 2.21 Penelitian Terkait

Berikut ini beberapa penelitian terkait untuk acuan penelitian dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

No	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
1	Studi Eksperimen Turbin Angin Bersumbu Vertikal Untuk PJU (Penerangan Jalan Umum)	Dari hasil pembahasan pada BAB sebelumnya dapat disimpulkan bahwa bahwa semakin besar kecepatan angin maka semakin besar juga kecepatan putaran VAWTnya dan dapat diketahui juga kecepatan putaran terendah sebesar 62,1 rpm pada kecepatan angin 2,7 m/s dan kecepatan putaran tertinggi sebesar 84,4 rpm pada kecepatan angin 4,1 m/s.	Penelitian ini membahas tentang penggunaan turbin VAWT pada penerangan jalan umum (PJU)	Penelitian ini membuat rancangan pembuatan turbin VAWT dengan tipe sudut datar dengan jumlah 8 blade.

2	Rancang Bangun Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya Sistem Komunal Untuk Jalan Lingkung Desa Kurai Taji Kecamatan Pariaman Selatan Kota Pariaman	Penerangan PJU-TS merupakan aspek penting dalam penataan suatu ka- wasan. PJU berperan penting sebagai pedoman navigasi malam bagi pengguna jalan, menambah nilai estetika dan juga dapat memberikan nilai tambah bagi perekonomian suatu daerah.	Penelitian membahas perencanaan pemasangan solar panel pada penerangan jalan umum (PJU).	Penelitian ini hanya membahas penerangan jalan umum berbasis surya (PJUBS) saja tidak dengan turbinnya.
3	Analisis Integrasi Pembangkit Listrik Hybrid Di Wilayah Daerah Pantai Tasikmalaya Selatan Menggunakan Aplikasi Homer	Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh dengan menggunakan HOMER, perencanaan sistem pembangkit listrik hybrid on-grid di Pesisir Pantai Kecamatan Cipatujah memiliki energi	Penelitian ini meneliti integrasi suatu pembangkit menggunakan <i>software</i> HOMER.	Penelitian ini meneliti integrasi pembangkit listrik tenaga gelombang laut dan angin.

		<p>potensial yang dapat digunakan sebagai sumber energi listrik yang berasal dari panel surya dan turbin gelombang air laut yang terhubung dengan Jaringan PLN dengan total produksi 15-18 MW/tahun. pemasok terbesarnya ada di pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem OWC sebesar 11.316.329-13.809.704 kWh/Tahun, dengan penjualan energi ke jaringan PLN sebesar 13.526.610-16.033.084 kWh/tahun serta</p>		
--	--	--	--	--

		<p>dampak lingkungan yang lebih rendah.</p> <p>Maka perencanaan sistem pembangkit listrik hybrid on grid di Pesisir Pantai layak untuk dipertimbangkan.</p>		
4	<p>Perencanaan Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya (PJUTS) dan Simulasi Dialux (Studi Kasus Jalan Kolonel Masturi Cimahi)</p>	<p>Jumlah panel surya yang digunakan pada tiap-tiap tiang penerangan jalan sebanyak 1 unit dengan kapasitas 75wp. Untuk jumlah baterai yang digunakan pada tiap-tiap tiang penerangan jalan sebanyak 1 unit dengan kapasitas 100 Ah. Sedangkan untuk BCR pada tiap-tiap tiang penerangan setidaknya</p>	<p>Penelitian membahas tentang penerangan jalan umum berbasis surya menggunakan <i>software</i> Dialux EVO.</p>	<p>Penelitian ini tidak membahas integrasi suatu pembangkit.</p>

		memiliki kapasitas arus 2 A.		
5	Pemodelan penerangan jalan LED	Kami telah memperoleh persamaan sederhana untuk menentukan bagaimana cahaya didistribusikan dalam penerangan jalan LED. Pertama, kami mengusulkan dua representasi matematis untuk memodelkan profil intensitas canggih dari lampu-lampu LED: satu persamaan untuk pola intensitas halus, dan satu lagi untuk profil intensitas dengan puncak tajam. Kedua, kami memodelkan iluminasi jalan,	Penelitian ini membahas distribusi cahaya pada penerangan jalan umum (PJU).	Penelitian tidak memakai <i>software</i> Dialux EVO.

		<p>yaitu, kami menentukan persamaan untuk memodelkan distribusi iluminasi di setiap titik pada lantai, jalan, atau jalan raya.</p> <p>Karena model ini bersifat analitik, persamaannya menunjukkan ketergantungan yang jelas pada parameter utama seperti: tinggi termasyhur, panjang lengan, kemiringan termasyhur, dan kurva intensitas cahaya. Terakhir, kami memodelkan kinerja tokoh-tokoh LED.</p> <p>Secara khusus, kami menghitung empat parameter penting penerangan jalan</p>		
--	--	---	--	--

		<p>LED: efisiensi pemanfaatan cahaya, polusi cahaya, keseragaman pencahayaan, dan luminansi silau yang menutupi. Secara umum, kesederhanaan model membuatnya mudah untuk dipahami, diterapkan, dan mungkin ditingkatkan. Model ini merupakan tandingan teoretis dari penelusuran sinar dan perhitungan radiositas Monte Carlo, yang selanjutnya dapat meningkatkan analisis dan kinerja sistem penerangan jalan LED. Misalnya,</p>		
--	--	--	--	--

		<p>model ini mungkin berguna untuk memperkenalkan variasi manufaktur dan pemasangan acak dari lampu-lampu LED untuk menganalisis dan merancang sistem penerangan jalan. Pekerjaan di masa depan mungkin mencakup penentuan kondisi desain sehingga instalasi penerangan jalan LED meminimalkan polusi cahaya, meningkatkan kenyamanan dan visibilitas, serta memaksimalkan keseragaman pencahayaan dan</p>		
--	--	--	--	--

		efisiensi pemanfaatan cahaya.		
--	--	-------------------------------------	--	--