

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Net Zero Energy Building*

2.1.1. Definisi *net zero energy building* (NZEB)

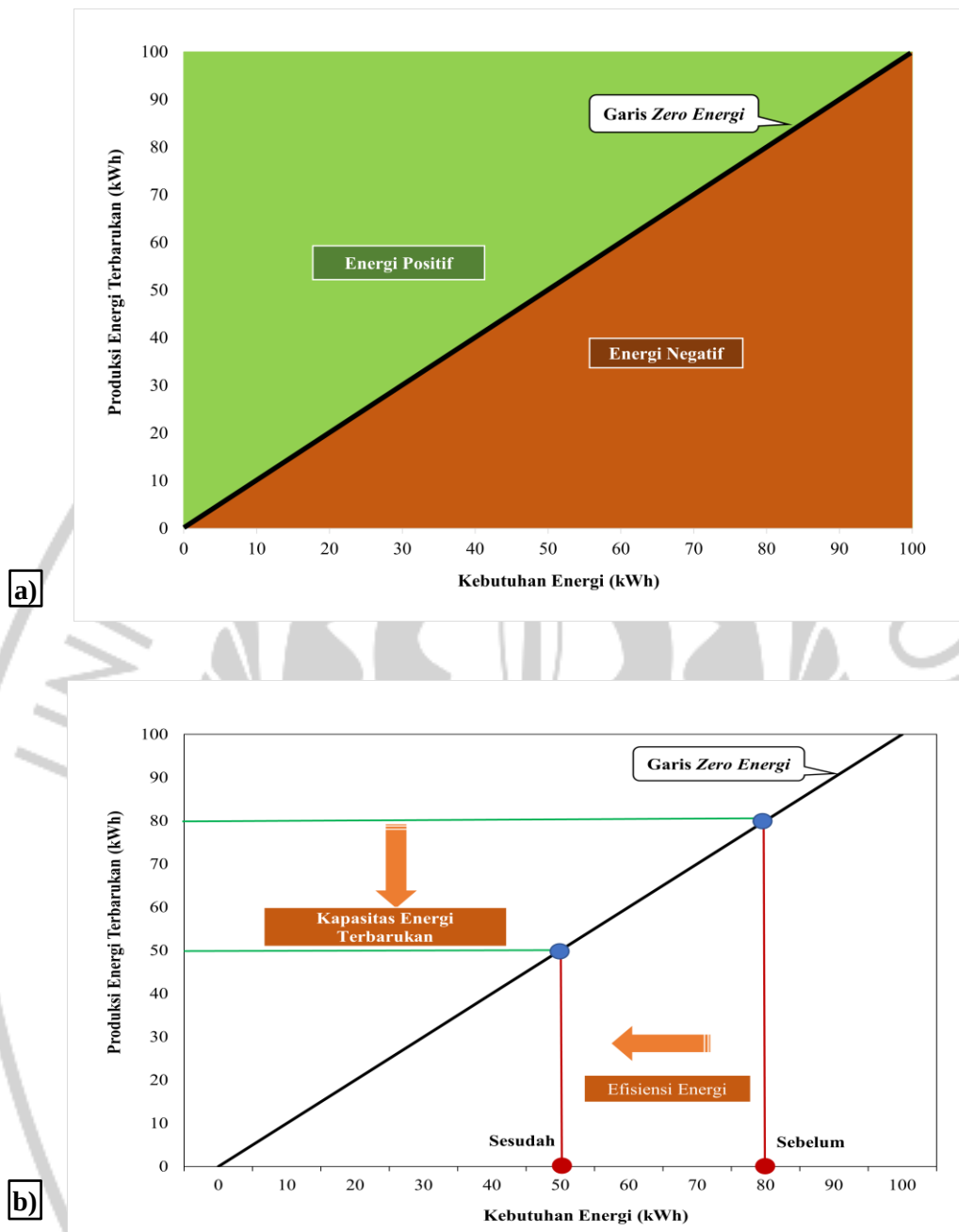
Konsep *Net Zero Energy Building* (NZEB) adalah sebuah bangunan yang dapat memenuhi semua kebutuhan energinya dari sumber yang tersedia pada bangunan itu sendiri, tidak menimbulkan polusi dan menggunakan energi terbarukan. Dalam kriteria NZEB, ada dua parameter penting yaitu efisiensi energi dan penggunaan sistem energi terbarukan. NZEB telah populer dan mulai diterapkan di seluruh dunia. Konsep ini dianggap sebagai salah satu pendekatan pada sektor bangunan untuk menurunkan konsumsi energi bangunan, memanfaatkan sumber energi terbarukan dan pada akhirnya mengurangi emisi gas rumah kaca. Prinsip utama dari konsep *zero energy building* (ZEB) adalah ide bangunan penghasil energi dan hemat energi yang terhubung dengan jaringan listrik atau infrastruktur energi. Interaksi ini memungkinkan bangunan untuk mengembalikan kelebihan energi terbarukan ke jaringan listrik (Berardi, 2018; Torcellini et al., 2006; Voss et al., 2011). Adapun empat perspektif umum untuk definisi ZEB, yaitu *net zero site energy*, *net zero source energy*, *net zero energy costs*, dan *net zero energy emissions* (Torcellini et al., 2006) dengan penjelasan pada Tabel 2.1. Studi ini menggunakan konsep *net zero site energy* yang mengacu pada energi yang dikeluarkan dari pembangkitan energi terbarukan di lokasi yang sesuai dengan kebutuhan energi bangunan selama satu tahun (Torcellini et al., 2006). Selain itu, hal ini melibatkan produksi energi terbarukan di lokasi dan secara langsung membandingkannya dengan kebutuhan energi bangunan untuk mencapai keseimbangan energi (*net energy balance*) (Voss et al., 2011).

Tabel 2.1 Definisi *net zero energy building* (NZEB)

Definisi <i>Net Zero Energy Building</i> (NZEB)		
No.	Pendekatan NZEB	Penjelasan

1	<i>Net Zero Site Energy</i>	Menghasilkan energi terbarukan sebanyak kebutuhan energi gedung dalam satu tahun, di kalkulasi dengan lokasi tersebut. Artinya, energi terbarukan dihasilkan di lokasi bangunan dan langsung dibandingkan dengan kebutuhan energi di bangunan tersebut.
2	<i>Net Zero Source Energy</i>	Menghasilkan energi terbarukan sebanyak energi yang dibutuhkan untuk memenuhi beban bangunan selama satu tahun dikalkulasi dibandingkan langsung dengan sumber energi tak terbarukan.
3	<i>Net Zero Energy Cost</i>	Biaya energi listrik yang dibayarkan pengelola gedung kepada utilitas / Perusahaan Listrik Negara (PLN) untuk penggunaan energi setidaknya sama dengan jumlah yang dibayarkan utilitas/PLN untuk energi terbarukan yang diekspor ke jaringan.
4	<i>Net Zero Energy Emissions</i>	Penurunan emisi dari penggunaan energi terbarukan dibandingkan dengan emisi yang dihasilkan dari energi tak terbarukan.

Metrik ZEB secara teoritis mewakili jumlah energi yang diimpor dan diekspor yang digunakan dalam NZEB, yang secara grafis ditunjukkan pada Gambar 2.1 (a). Konsep metrik NZEB ditunjukkan dengan membandingkan nilai kebutuhan energi di gedung dengan pasokan energi terbarukan dengan unit yang sama atau lebih besar dalam persentase. Selanjutnya, pada Gambar 2.1 (b) (Sartori et al., 2012) langkah efisiensi energi dengan desain aktif dan pasif meminimalkan total konsumsi energi yang dibutuhkan oleh bangunan sehingga mengurangi kapasitas energi terbarukan di lokasi sehingga lebih hemat biaya atau mengekspor energi ke jaringan listrik lebih besar.



Gambar 2.1 Konsep dan strategi *net zero energy building* (a) definisi dan (b) hubungan efisiensi energi

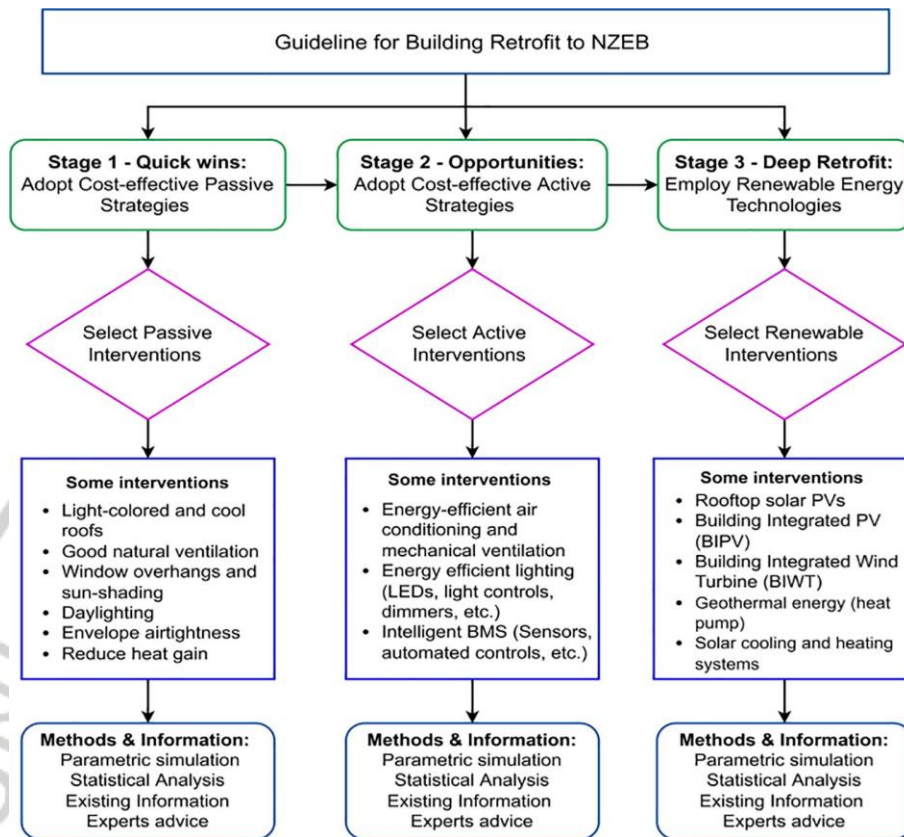
Zero Energy Building (ZEB) memiliki dua pilihan untuk suplai energi terbarukan yaitu suplai di lokasi (*on-site supply*), di mana energi dihasilkan di area atau sekitar gedung dan pilihan suplai dari luar area gedung (*off-site supply*), di mana energi diperoleh dari sumber di luar lokasi gedung ditampilkan pada Tabel 2.2 (Torcellini et al., 2006).

Tabel 2.2 Opsi suplai energi terbarukan pada ZEB (Torcellini et al., 2006)

Opsi No.	Pilihan suplai ZEB	Contoh
0	Mereduksi penggunaan energi dengan menggunakan teknologi energi yang efisien pada bangunan gedung	Pencahayaam alami, sistem HVAC dengan efisiensi yang tinggi, Ventilasi alami, lampu LED
Opsi suplai on-site		
1	Menggunakan sumber energi terbarukan	PV, <i>Solar Water Heater</i> , dan angin di lokasi bangunan
2	Menggunakan sumber energi terbarukan yang tersedia ditapak bangunan	PV, <i>Solar Water Heater</i> , mikro/mini hidro dan angin
Opsi suplai Off-site		
3	Menggunakan sumber energi terbarukan yang tersedia di luar batas bangunan untuk membangkitkan energi di dalam bangunan	PV, angin, mikro/mini hidro, biomassa, etanol, biodiesel, dll
4	Membeli sumber energi terbarukan dari luar bangunan	PV, angin, mikro/mini hidro, biomassa, etanol, biodiesel, dll

2.1.2. Strategi *net zero energy building* (NZEB)

Dalam penerapannya pada suatu bangunan perlu adanya strategi-strategi desain yakni desain pasif misalnya pemanfaatan cahaya alami, ventilasi alami dan selubung bangunan untuk mereduksi panas dari luar ke dalam bangunan, maupun desain aktif misalnya menggunakan peralatan listrik seperti *air conditioner* dan lampu dengan efisiensi yang lebih tinggi serta penggunaan energi terbarukan untuk terealisasinya NZEB (Ohene et al., 2022) seperti yang terlihat pada Gambar 2.2. Strategi desain yang digunakan pada penelitian ini adalah desain aktif dengan strategi efisiensi dan strategi pemenuhan *zero energy* menggunakan energi terbarukan yaitu *photovoltaic*.



Gambar 2.2 Panduan strategi desain untuk mencapai NZEB (Ohene et al., 2022)

2.2 Lampu

Lumen adalah Satuan Internasional (SI) untuk fluks cahaya, yaitu jumlah cahaya yang dipancarkan oleh suatu sumber atau jumlah cahaya yang diterima oleh suatu permukaan. Lux adalah SI untuk pencahayaan, yang merupakan ukuran pencahayaan langsung pada area permukaan seluas satu meter persegi atau lumen/m² (Gan et al., 2013). Efikasi adalah untuk menilai efisiensi dari lampu dengan satuan lumen / Watt (Uyan et al., 2023). Didalam KEPMEN ESDM No.135.K/EK.07/DJE/2022 untuk lampu jenis *Light Emitting Diode* (LED), nilai standar kinerja energi minimum sebesar 80 lumen per Watt dan SNI 6197:2020 nilai lux ruang kerja sebesar 350 lux dan ruang rapat 300 lux sebagai kriteria NZEB dari sistem pencahayaan.

Tabel 2.3 Efikasi dan umur lampu berdasarkan jenis lampu

Sumber cahaya	Efikasi (lm/W)	Umur lampu (jam)	Referensi
---------------	----------------	------------------	-----------

<i>Incandescent</i>	10 -18	1.000	1,2
<i>Halogen</i>	15 -20	8.400	
<i>Compact fluorescent (CFL)</i>	35 -60	12.000	
<i>Linear fluorescent</i>	50 -100	25.000	
<i>Cool white LED >4000K</i>	60 - > 120	50.000	
<i>Warm white LED <4000K</i>	60 - > 120	50.000	

Referensi:

1. (Morgan Pattison et al., 2018)
2. (Palaloi et al., 2018)

2.3 Air Conditioner

Perbedaan terbesar AC *split* tipe standar dengan AC tipe inverter adalah sistem kompresor, dimana kompresor AC tipe standar beroperasi hanya dalam dua mode yaitu *on* dan *off* (Eltawil et al., 2023), sistem ini tidak dirancang untuk menangani beban yang berubah-ubah dengan kata lain hanya kecepatan yang tetap (*fixed type*), ketika dalam keadaan *on* kompresor bekerja dengan kapasitas penuh dan menggunakan seluruh daya listrik sesuai rancangannya, bila suhu yang diinginkan telah tercapai, maka kompresor akan mati dan pendinginan dihentikan selanjutnya, saat termostat mendeteksi bahwa suhu ruangan telah meningkat kompresor akan otomatis menyala kembali. AC tipe inverter dirancang untuk menangani beban pendinginan yang bervariasi dan telah dipelajari selama dua dekade terakhir, dimana teknik yang terkenal adalah mengontrol kecepatan rotasi kompresor berdasarkan beban pendinginannya tergantung pada pengaturan suhu yang diinginkan (Siriwardhana & Namal, 2017). Masa pakai rata-rata AC tipe *split* sekitar 8-11 tahun (Nishijima, 2016; Wu et al., 2019). Untuk menilai kinerja dan efisiensi dari AC menggunakan nilai COP (*Coefficient of Performance*) adalah pengukuran dari sejumlah panas yang diserap dibandingkan dengan jumlah energi listrik yang digunakan (Bunnoto et al., 2019). Didalam SNI 6390: 2020 mengenai konservasi energi sistem tata udara pada bangunan gedung, ditetapkan minimum COP AC *single split* $\leq 27.000 \text{ BTU/h}$ sebesar 4,20. Perhitungan efisiensi (COP) tersebut menggunakan metode *Cooling Seasonal Performance Factor* (CSPF), nilai tersebut yang dijadikan acuan kriteria NZEB. Indonesia memiliki kondisi lingkungan yang berbeda dengan beberapa negara lain sehingga akan mempengaruhi operasional dari sistem *air conditioner*. Semakin tinggi suhu maka akan berakibat semakin tinggi energi yang dibutuhkan AC untuk bekerja. CSPF mewakili suhu lingkungan yang bervariasi. Sebaliknya, *Energy Efficiency Ratio* (EER) yang mengukur kinerja AC tidak dapat mewakili karakteristik geografis negara yang bervariasi dikarenakan hanya memperhitungkan pada kondisi *full load* atau beban penuh disuhu

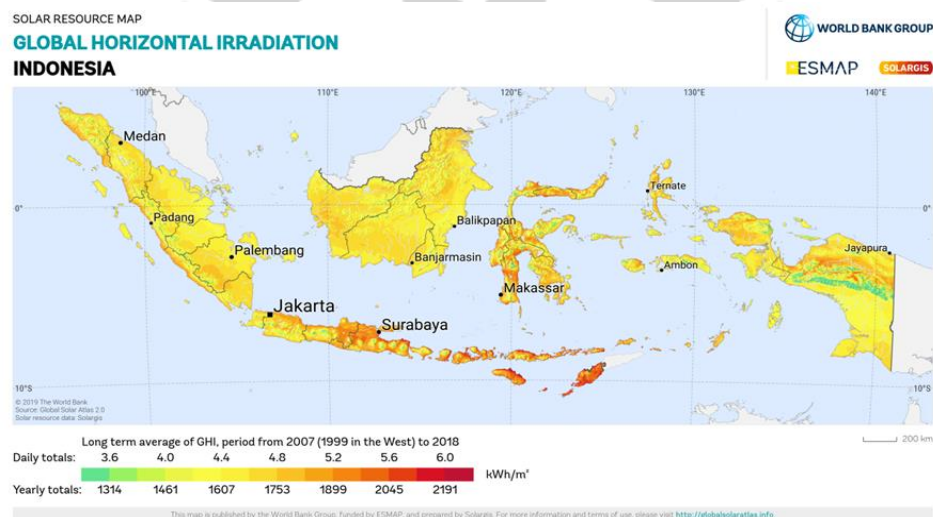
outdoor 35°C. Selain itu, AC dengan teknologi inverter pada kompresor yang mengikuti beban pendinginan tidak dapat direpresentasikan *apple to apple* menggunakan metode EER (Irsyad et al., 2021). Menurut ASHRAE 55 (2020), zona kenyamanan termal pada ruangan berada direntang suhu 23-27 °C.

2.4 Energi Surya

2.4.1. Potensi energi surya

Pemerintah Indonesia telah menerbitkan peta jalan menuju emisi nol bersih (NZE) di sektor energi pada tahun 2060 yang dibuat oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), yang dimodelkan oleh Indonesia dan IEA didapatkan beberapa aksi mitigasi termasuk pengembangan energi terbarukan secara masif dengan fokus pada tenaga surya, hidro, dan panas bumi (IEA, 2022). Sejalan dengan mitigasi negara-negara lain yang menggunakan energi surya (Gondal, 2021; Panagiotidou & Fuller, 2013).

Indonesia adalah negara tropis, yang secara geografis terletak di antara 6 derajat Lintang Utara dan 11 derajat Lintang Selatan khatulistiwa. Negara ini memiliki potensi energi matahari yang melimpah sepanjang tahun. Menurut global solar atlas (Solargis, 2019), potensi radiasi matahari di Indonesia bervariasi antara 4 - 5,8 kWh/m²/hari dengan nilai rata-rata sebesar 4,80 kWh/m²/hari (DEN, 2020). Dari data diatas, penggunaan *photovoltaic* memiliki potensi yang baik dan sejalan dengan peta jalan NZE. Peta iradiasi horizontal global di Indonesia disajikan pada Gambar 2.3 (Solargis, 2019).



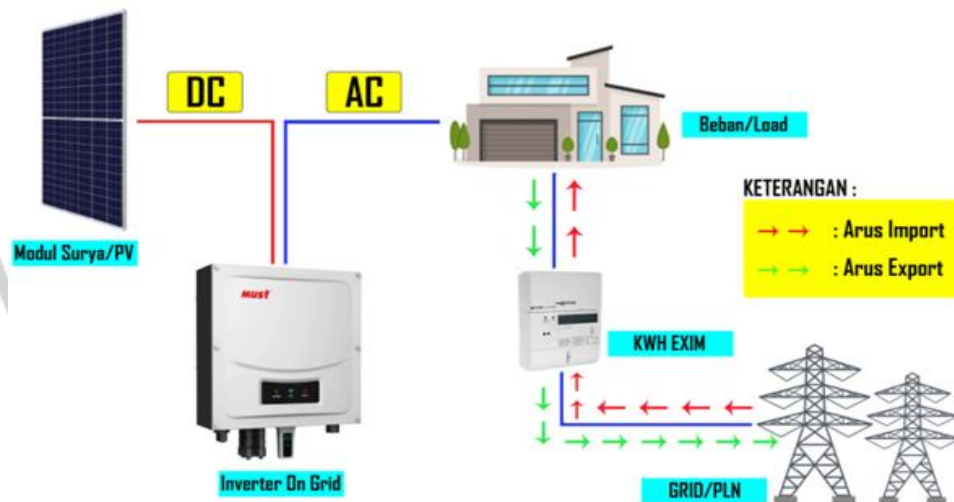
Gambar 2.3 Peta potensi energi surya di Indonesia

2.4.2. Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS)

Modul surya mengubah sinar matahari menjadi listrik dan tidak memiliki komponen yang bergerak, membutuhkan sedikit perawatan, tidak menimbulkan kebisingan, tidak mengeluarkan polusi, mampu bertahan selama 25 tahun atau lebih dan dapat dipasang di tanah dengan penyangga, dipasang di tiang atau dipasang di atap (Anderson et al., 2011). PLTS terdiri dari beberapa komponen utama yaitu modul surya, inverter, dan baterai. Secara desain dan sistem integrasi, PLTS dikonfigurasi menjadi tiga jenis yaitu PLTS *off-grid*, PLTS *on-grid* dan PLTS *hybrid* (Kencana et al., 2018). Pada studi ini menggunakan PLTS dengan jenis *on-grid* dan *hybrid* dengan baterai.

a. PLTS on-grid

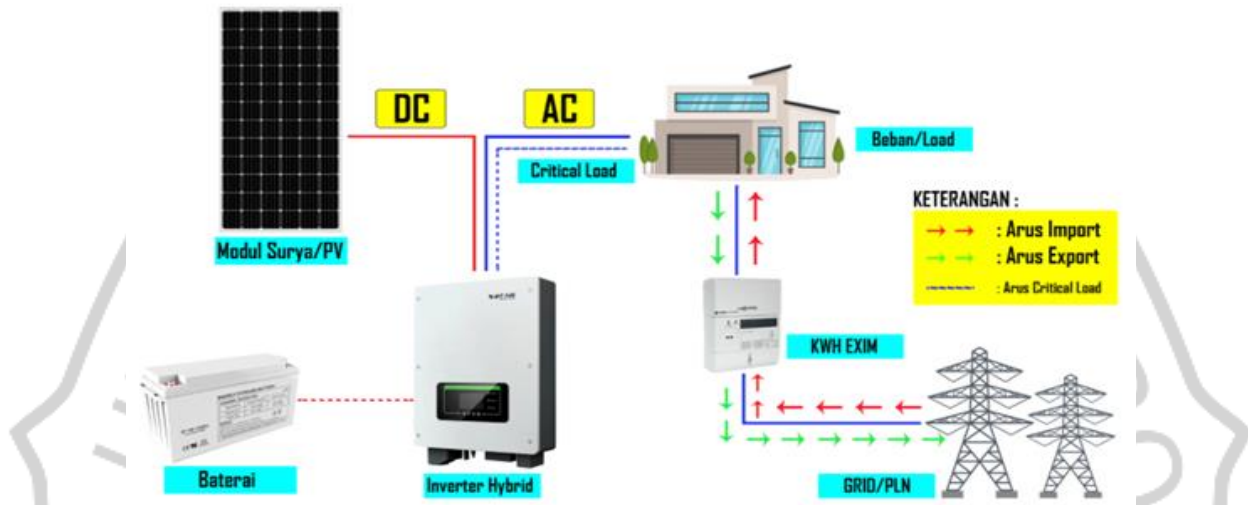
PLTS jenis *on-grid* didesain secara langsung terhubung dengan sistem jaringan dari PLN atau pembangkit lainnya, PLTS jenis ini tidak menggunakan baterai sebagai sarana penyimpanan energi listrik. Manfaat ketika menggunakan PLTS jenis ini adalah untuk mengurangi beban listrik yang disuplai dari jaringan PLN atau pembangkit lain (Kencana et al., 2018). Ketika jaringan listrik kehilangan tegangan, maka sistem PLTS melalui teknologi inverter yang memiliki kemampuan untuk dapat memutus kontak terhadap sistem jaringan. Sistem ini biasa digunakan pada perkantoran, mall, rumah sakit, serta fasilitas umum lainnya.



Gambar 2.4 Ilustrasi PLTS jenis *on-grid* (Powersurya, 2022)

b. PLTS hybrid

PLTS jenis *hybrid* adalah kombinasi dari sistem PLTS dengan jaringan PLN menggunakan baterai atau pembangkit yang lainnya misalkan PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel), PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu). PLTS jenis ini biasa digunakan untuk memaksimalkan potensi energi yang bisa dimanfaatkan untuk penyediaan energi listrik menggunakan baterai sebagai sarana penyimpanan energi listrik (Kencana et al., 2018).



Gambar 2.5 Ilustrasi PLTS jenis *hybrid* (Powersurya, 2022)

2.4.3. **Komponen utama PLTS**

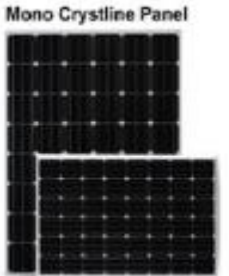
Dalam mengimplementasikan PLTS, ada beberapa komponen utama dari sistem PLTS tersebut yaitu sebagai berikut:

a. Modul surya

Modul surya merupakan suatu modul yang berisikan sel surya yang berfungsi mengubah energi kalor dari sinar radiasi matahari menjadi energi listrik. Sel surya menghasilkan tegangan listrik yang sangat kecil, berkisar 0,6 VDC disaat tanpa beban atau 0,45 VDC pada kondisi diberikan beban. Untuk mendapatkan tegangan listrik yang besar sesuai dengan kebutuhan diperlukan beberapa sel surya yang tersambung secara seri. Jika 36 keping sel surya tersambung secara seri, akan menghasilkan tegangan listrik sekitar 16 VDC sehingga bisa digunakan untuk mensuplai baterai dengan sistem 12 V (Purwoto et al., 2007). Apabila beberapa modul surya dirangkai, maka akan menjadi sistem PLTS. Kualitas dari sebuah modul surya dilihat berdasarkan efisiensinya untuk mengubah radiasi sinar matahari menjadi listrik tegangan DC. Modul surya

yang memiliki efisiensi lebih tinggi akan menghasilkan daya listrik lebih besar dibandingkan dengan modul surya efisiensi lebih rendah pada luasan yang sama. Efisiensi dari modul surya dipengaruhi daripada material sel *photovoltaic* dan proses produksinya. Secara umum, sel *photovoltaic* terbuat dari material jenis *crystalline* dan *non-crystalline* (film tipis). Untuk jenis kristalin, terbagi atas tipe monokristalin dan tipe polikristalin, dengan efisiensi konversi sekitar 12 – 20% (Kencana et al., 2018). Modul surya dijelaskan pada Tabel 2.4 (Alkhalidi, 2018):

Tabel 2.4 Jenis-jenis modul surya kristalin

Tipe	Gambar	Penjelasan
Monokristalin		• Modul surya jenis ini memiliki tingkat efisiensi paling tinggi jika dibandingkan dengan jenis lainnya. • Memiliki nilai efisiensi antara 15-20 %.

Tabel 2.4 (Lanjutan)

Tipe	Gambar	Penjelasan
Polikristalin		• Modul surya jenis ini biasanya memiliki luas permukaan yang lebih besar dari jenis lainnya, namun memiliki nilai efisiensi 2-4% lebih rendah dari monokristal.

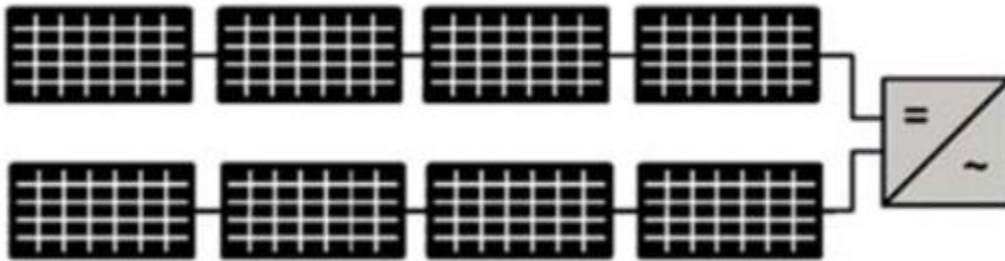
b. Inverter

Secara sederhana, inverter adalah suatu alat yang mengubah tegangan DC menjadi AC. Pada sistem PLTS, energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya dalam wujud tegangan DC akan diubah menjadi tegangan AC untuk kemudian disalurkan menuju beban. Terdapat beberapa jenis inverter yang digunakan pada studi ini, antara lain:

1. Multi string inverter

Koneksi inverter *multi string* seperti pada Gambar 2.6 yang merupakan pengembangan inverter *string* dan bekerja hampir sama dengan sentral inverter kelebihan inverter jenis *multi string* dibandingkan dengan sistem terpusat, karena setiap string bisa dikendalikan secara

individual, dengan demikian ini adalah solusi menggabungkan teknologi dari *central* dan *string inverter* (Hassaine et al., 2014).

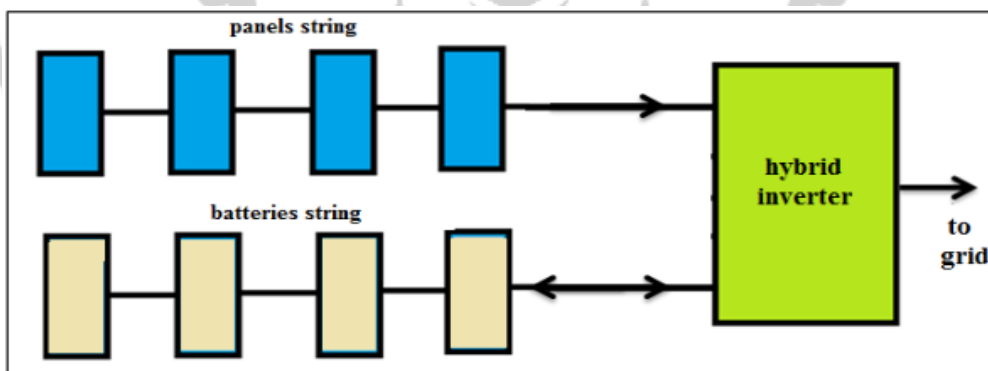


Gambar 2.6 Koneksi multi string inverter (Čorba et al., 2012)

Untuk mendapatkan kapasitas dari inverter yang baik dalam sistem PLTS, diusahakan untuk memilih kapasitas inverter yang sesuai dengan kapasitas daya dari sistem PLTS yang akan diterimanya. Hal ini penting untuk diperhatikan agar efisiensi kerja inverter dapat bekerja maksimal (Foster et al., 2010).

2. *Bidirectional battery inverter*

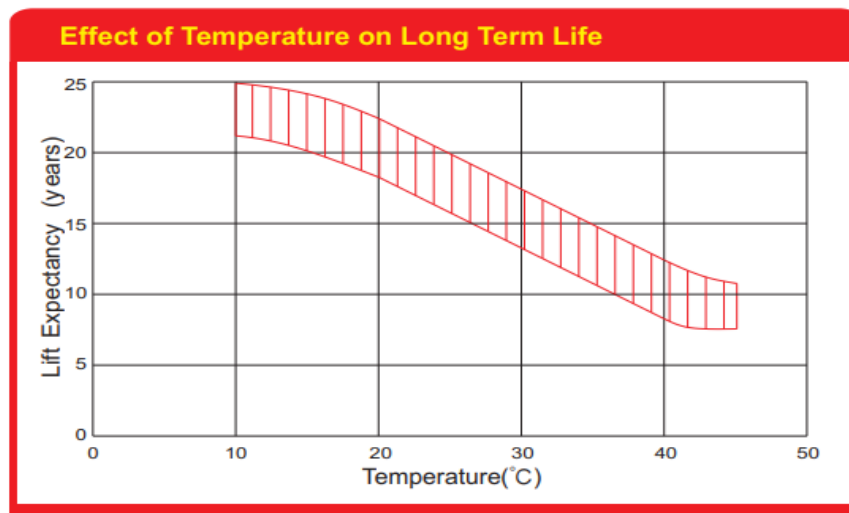
Bidirectional battery inverter adalah unit peralatan yang digunakan untuk mengubah tegangan input DC dari PV dan baterai menjadi tegangan output AC pada saat proses *discharge*, dan sebaliknya untuk mengubah tegangan input AC dari jaringan menjadi tegangan output DC pada saat proses *charging*. Karena sifatnya yang bisa bolak-balik ini, maka battery inverter pada sistem ini disebut juga sebagai *bidirectional battery inverter* atau *hybrid inverter* (Kencana et al., 2018).



Gambar 2.7 Koneksi baterai inverter (Shukir, 2022)

c. Baterai

Baterai merupakan salah satu cara penyimpanan energi listrik yang paling umum digunakan, sehingga baterai menjadi komponen penting dan dapat mempengaruhi sistem PLTS yang menggunakan baterai. Adapun parameter dari baterai yang mempengaruhi dari kinerja PLTS yaitu perawatan baterai, umur pakai, daya dan efisiensi. Baterai yang paling tepat digunakan pada sistem PLTS yang memiliki jenis karakter *deep discharge*. Baterai jenis ini bisa mengeluarkan energi atau *discharge* energi listriknya hingga tersisa sekitar 20% dari kapasitas dari baterai (Kencana et al., 2018). Teknologi baterai *deep-cycle* yang terbukti sejauh ini adalah VLRA (*Valve-Regulated Lead Acid*), *advanced lead- carbon*, dan *lithium ion* (Gumintang et al., 2020). Pada studi ini menggunakan baterai VRLA jenis OPzV. Baterai OPzV menawarkan masa pakai siklus tertinggi di antara semua baterai asam timbal lainnya, dengan penghematan yang signifikan pada biaya per siklus. Baterai ini bebas perawatan dan memiliki konstruksi yang kuat, memberikan tingkat keandalan dan kinerja tertinggi dengan masa pakai desain 16 - 25 tahun serta perawatan yang minim (Energysys, 2017; Karamov, 2020).



Gambar 2.8 Pengaruh suhu terhadap umur baterai OPzV (Ritarpower, 2021)

2.4.4. Bayangan (*shading*)

Pada proses penangkapan energi matahari oleh modul surya, adanya bayangan yang menutupi permukaan panel surya dapat mempengaruhi kinerjanya. Efek bayangan mengakibatkan berkurangnya radiasi matahari sehingga mengganggu proses transfer energi ke permukaan modul surya dan menurunkan hasil produksi. Efek bayangan dapat menginterupsi sistem PLTS apabila:

- a. Jika bayangan menutupi *array*, tegangan maksimum yang akan masuk ke inverter akan menurun sehingga mempengaruhi kinerja inverter.
- b. Jika menggunakan *string* inverter dan terdapat beberapa *string* panel surya, bayangan pada satu string dapat mempengaruhi output string lainnya.

Dalam kedua situasi tersebut di atas, akan sulit memperkirakan *output array*, dan sebagian inverter memiliki respon berbeda, Maka dalam pemasangan *array* sebaiknya memilih lokasi yang tidak tertutup bayangan (gedung / pohon/ lainnya).

2.5 Perhitungan Teknis

2.5.1. Perhitungan *net* keseimbangan energi

Net keseimbangan energi diperoleh menggunakan energi yang dihasilkan dari sistem PV dalam setahun dikurangi konsumsi energi bangunan dalam setahun, dimana *net zero energy building* dicapai apabila hasil dari keseimbangan energi sebesar ≥ 0 (Marszal et al., 2011; Sartori et al., 2012) ditunjukkan pada Persamaan (2.1) :

$$\begin{aligned} \text{Net ZEB} &= \text{Keseimbangan Energi(KE)} ; \\ \text{KE} &= \text{Produksi PV} - \text{Konsumsi energi gedung} \geq 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

2.5.2. Cooling seasonal performance factor (CSPF)

Metode perhitungan CSPF dijelaskan secara komprehensif dalam ISO 16358-1 *air-cooled air conditioners and air-to-air heat pumps-testing and calculating methods for seasonal performance factors* tahun 2013 Berikut ini penjelasan, metode perhitungan akan diringkas dalam langkah-langkah yang lebih mudah, semua persamaan adalah sebagai berikut (Irsyad et al., 2021) :

- a. Perhitungan unjuk kerja *Air Conditioner* (AC) ditujukan untuk unit *non-inverter* (tipe kapasitas tetap) dan *inverter* (tipe kapasitas variabel).
- b. Unit kapasitas variabel, perhitungan CSPF menggunakan dua data yaitu data disaat beban penuh dan beban setengah. Kedua titik tersebut direkomendasikan pada ISO 5151 untuk pengujian AC inverter. CSPF didefinisikan oleh dengan Persamaan (2.2) beban total musiman pendinginan didefinisikan CSTL dan konsumsi energi didefinisikan dan CSEC , menggunakan Persamaan sebagai berikut :

$$F_{CSP} = \frac{LCST}{C_{CSE}} \quad (2.2)$$

Dimana, LCST (*Cooling Seasonal Total Load*) adalah jumlah total panas yang dihilangkan dari udara dalam ruangan bila peralatan dioperasikan untuk mendinginkan bangunan selama musim pendinginan. CCSE (*Cooling Seasonal Energy Consumption*) adalah jumlah total energi yang dikonsumsi oleh peralatan bila dioperasikan untuk pendinginan selama musim pendinginan.

a. Unit tipe tetap (*fixed*)

LCST pada Persamaan (2.2) diperoleh dengan menyelesaikan Persamaan (2.3) sebagai berikut:

$$LCST = \sum_{j=1}^m Lc(t_j) \times n_j + \sum_{j=m+1}^n \phi_{ful}(t_j) \times n_j \quad (2.3)$$

t_j adalah suhu luar untuk setiap *temperature bin*. n_j adalah *bin hours*. $Lc(t_j)$ pada Persamaan (2.3) adalah beban pendinginan untuk setiap temperatur *bin* yang didefinisikan sebagai:

$$Lc(t_j) = \phi_{ful}(t_{100}) \times \frac{t_j - t_0}{t_{100} - t_0} \quad (2.4)$$

Nilai acuan beban pendinginan terdefinisi yang akan digunakan adalah sebagai berikut:

$$t_0 = 20^\circ\text{C} \text{ dan } t_{100} = 35^\circ\text{C}$$

ISO, ditunjukkan pada Tabel 2.5 memiliki distribusi temperatur dan jam *bin* standar. Nilai t_j dan n_j dibatasi dari 21°C hingga 35°C dan jumlah jam bin 1.817, sebagaimana yang tertuang di dalam ISO 16358:1.

Tabel 2.5 Temperatur dan jam *bin*

No.Bin	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Outdoor Temp.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Bin Hours n_j	100	139	165	196	210	215	210	181	150	120	75	35	11	6	4
Temp.Bin t_j	0,055	0,076	0,091	0,108	0,116	0,118	0,116	0,100	0,083	0,066	0,041	0,019	0,006	0,003	0,002

$\phi_{ful}(t_j)$ dalam Persamaan (2.3) adalah karakteristik kapasitas pendinginan terhadap suhu luar, yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\phi_{ful}(t_j) = \phi_{ful}(35) + \frac{\phi_{ful}(29) - \phi_{ful}(35)}{35 - 29} \times (35 - t_j) \quad (2.5)$$

Dimana nilai $\phi_{ful}(29) = 1,077 \times \phi_{ful}(35)$

Persamaan (2.3) harus dipenuhi dengan kondisi sebagai berikut:

- $L_c(t_j) \leq \phi_{ful}(t_j) (j = 1 \text{ to } m)$: $L_c(t_j)$ dihitung dengan Persamaan (2.4).
- $L_c(t_j) > \phi_{ful}(t_j) (j = m + 1 \text{ to } n)$: $\phi_{ful}(t_j)$ dihitung dengan Persamaan (2.5).

Untuk mendefinisikan $CCSE$ pada Persamaan (2.2), harus dihitung menggunakan Persamaan (2.6) sebagai berikut :

$$CCSE = \sum_{j=1}^n X(t_j) \times P_{ful}(t_j) \times \frac{n_j}{F_{PL}(t_j)} \quad (2.6)$$

$X(t_j)$ pada Persamaan (2.6) adalah faktor operasi, dimana:

$$X(t_j) = \frac{L_c(t_j)}{\phi(t_j)} \quad (2.7)$$

Apabila kondisi $L_c(t_j) > \phi_{ful}(t_j)$, maka nilai $X(t_j) = 1$

P_{ful} dalam Persamaan (2.6) adalah karakteristik daya input pada beban penuh terhadap suhu luar, yang didefinisikan sebagai:

$$P_{ful}(t_j) = P_{ful}(35) + \frac{P_{ful}(29) - P_{ful}(35)}{35 - 29} \times (35 - t_j) \quad (2.8)$$

Dimana nilai $P_{ful}(29) = 0,914 \times P_{ful}(35)$

F_{PL} dalam Persamaan (2.6) adalah faktor beban sebagian, yang didefinisikan sebagai berikut:

$$F_{PL}(t_j) = 1 - C_D (1 - X(t_j)) \quad (2.9)$$

Dimana C_D adalah koefisien degradasi, nilainya dapat dinyatakan sebagai nilai default sebesar 0,25. Persamaan (2.9) harus memenuhi kondisi berikut:

- Siklus operasi ($L_c(t_j) \leq \phi_{ful}(t_j)$) : dalam Persamaan (2.6) $X(t_j)$ dihitung menggunakan persamaan (2.7), maka nilai $\phi(t_j) = \phi_{ful}(t_j)$,
- Operasi kapasitas penuh ($L_c(t_j) > \phi_{ful}(t_j)$) : maka dalam Persamaan (2.6) nilai $X(t_j) = F_{PL}(t_j) = 1$

b. Unit tipe variabel (variable-capacity-unit)

$$C_{CSE} = \sum_{j=1}^p \frac{X(t_j) \times P_{haf}(t_j) \times n_j}{F_{PL}(t_j)} + \sum_{j=p+1}^m P_{haf}(t_j) \times n_j + \sum_{j=m+1}^n P_{ful}(t_j) \times n_j \quad (2.10)$$

$P_{ful}(t_j)$ dihitung dengan Persamaan (2.8). $P_{haf}(t_j)$ adalah input daya beban setengah suhu pendingin luar dihitung sebagai berikut:

$$P_{haf}(t_j) = P_{haf}(35) + \frac{P_{haf}(29) - P_{haf}(35)}{35 - 29} \times (35 - t_j) \quad (2.11)$$

Dimana nilai $P_{haf}(29) = 0,914 \times P_{haf}(35)$

$\phi_{haf}(t_j)$ didefinisikan sebagai kapasitas pendinginan beban setengah pada suhu luar , dihitung sebagai berikut:

$$\phi_{haf}(t_j) = \phi_{haf}(35) + \frac{\phi_{haf}(29) - \phi_{haf}(35)}{35 - 29} \times (35 - t_j) \quad (2.12)$$

Dimana nilai $\phi_{haf}(29) = 1,077 \times \phi_{haf}(35)$

Persamaan (2.10) harus memenuhi kondisi siklus operasi sebagai berikut:

$$(Lc(t_j) \leq \phi_{haf}(t_j), j = 1 \text{ to } p) :$$

Perhitungan harus dilakukan dalam kisaran ini, dengan asumsi bahwa AC beroperasi secara siklus dengan beban setengah kapasitas operasi.

Persamaan (2.10), $X(t_j)$ dihitung menggunakan Persamaan (2.7), dimana nilai $\phi(t_j) = \phi_{haf}(t_j)$.

Operasi kapasitas variabel antara kapasitas setengah dan kapasitas penuh ($\phi_{haf}(t_j) < Lc(t_j) \leq \phi_{ful}(t_j), j = p + 1 \text{ to } m$):

Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan Persamaan (2.13) sampai (2.16) menggunakan Persamaan dibawah ini:

$$E_{ER,haf}(t_c) = \frac{\phi_{haf}(t_c)}{P_{haf}(t_c)} \quad (2.13)$$

$$E_{ER,ful}(t_b) = \frac{\phi_{ful}(t_b)}{P_{ful}(t_b)} \quad (2.14)$$

$$E_{ER,haf}(t_j) = E_{ER,haf}(t_c) + \frac{E_{ER,ful}(t_b) - E_{ER,haf}(t_c)}{t_b - t_c} \times (t_j - t_c) \quad (2.15)$$

$$P_{hf}(t_j) = \frac{Lc(t_j)}{E_{ER,haf}(t_j)} \quad (2.16)$$

t_c dan t_b adalah ketika suhu luar beban pendinginan sama dengan pendinginan setengah dan kapasitas penuh, masing-masing. t_c dan t_b didefinisikan dalam persamaan berikut :

$$t_b = \frac{6\phi_{ful}(35)t_0 + 6\phi_{ful}(35)(t_{100} - t_0) + 35(\phi_{ful}(29) - \phi_{ful}(35))(t_{100} - t_0)}{6\phi_{ful}(35) + (\phi_{ful}(29) - \phi_{ful}(35))(t_{100} - t_0)} \quad (2.17)$$

$$t_c = \frac{6\phi_{ful}(t_{100})t_0 + 6\phi_{haf}(35)(t_{100} - t_0) + 35(\phi_{haf}(29) - \phi_{haf}(35))(t_{100} - t_0)}{6\phi_{ful}(t_{100}) + (\phi_{haf}(29) - \phi_{haf}(35))(t_{100} - t_0)} \quad (2.18)$$

$$E_{ER,haf}(t_j) = E_{ER,haf}(t_c) + \frac{E_{ER,ful}(t_b) - E_{ER,haf}(t_c)}{t_b - t_c} \times (t_j - t_c) \quad (2.19)$$

2.5.3. Perhitungan penghematan energi

Penghematan energi dari penggantian peralatan listrik dihitung dengan persamaan berikut (Richman, 2012) :

$$ES = [(FP \text{ base} \times N \text{ base}) - (FP \text{ post} \times N \text{ post}) \times H] \quad (2.20)$$

Dimana, ES adalah penghematan energi per tahun(kWh), *FP Base* adalah daya listrik kasus dasar (W/peralatan), *FP Post* adalah daya listrik yang diusulkan (W/peralatan). *N base* adalah jumlah peralatan, *N Post* adalah jumlah peralatan yang diusulkan dan *H* adalah jam operasi per tahun.

2.5.4. Perhitungan intensitas konsumsi energi (IKE)

Intensitas konsumsi energi (IKE) merupakan istilah yang digunakan untuk menyatakan besarnya pemakaian energi dalam bangunan gedung. IKE dinyatakan dalam satuan kWh/m²/Tahun. Angka yang menunjukkan jumlah energi yang dikonsumsi (dalam kWh) untuk setiap m² luas bangunan yang terkondisikan dengan sistem pendingin udara per tahun ataupun terhadap luasan total gedung (tidak termasuk parkir). Perhitungan IKE menggunakan Persamaan (2.21) sebagai berikut (SNI 6196, 2011):

$$IKE = \frac{\text{Konsumsi energi listrik dalam satu tahun (kWh/Thn)}}{\text{Luas Bangunan (m}^2\text{)}} \quad (2.21)$$

2.5.5. Perhitungan daya output sistem PV

Dalam menghitung daya output dari sistem PV, *Homer* menggunakan Persamaan (2.22) sebagai berikut (Alharthi et al., 2018):

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{T, STC}} \right) [1 - \alpha_P (T_c - T_{c, STC})] \quad (2.22)$$

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{T, STC}} \right) \quad (2.23)$$

Dalam konteks kondisi pengujian standar (STC), Y_{PV} mewakili output daya spesifikasi dan f_{PV} adalah faktor penurunan daya (*derating factor*). G_T adalah radiasi matahari di lokasi, sedangkan $G_{T, STC}$ mengacu pada radiasi yang terjadi selama kondisi pengujian standar. α_P menunjukkan koefisien temperatur daya, T_c menunjukkan temperatur di sel PV, dan $T_{c, STC}$ menunjukkan temperatur sel PV selama *standard test condition* (STC) sebesar 1 kW/m² (Hiendro et al., 2013; HOMER, 2016). *Homer* dalam menentukan daya output dari inverter mengikuti efisiensi dari inverter.

2.5.6. Perhitungan daya maksimum charge discharge baterai

Dalam menentukan batasan daya maksimum dari pengisian daya /charge (c_{max}) dan pelepasan daya/discharge (d_{max}) menggunakan Persamaan berikut (HOMER, 2016):

$$P_{batt, cmax, dmax} = \frac{N_{batt} I_{max} V_{nom}}{1000} \quad (2.24)$$

Dimana, N_{batt} adalah jumlah dari baterai, I_{max} adalah arus daya maksimum (A), V_{nom} adalah tegangan nominal (V), 1000 adalah agar hasil dalam satuan kilowatt.

2.6 Perhitungan Tekno-Ekonomi

2.6.1. Tekno-ekonomi dari efisiensi energi

Analisis ekonomi sangat penting untuk menentukan apakah sebuah proyek layak atau tidak. Analisis ekonomi dalam hal efisiensi energi menggunakan perangkat lunak *RETScreen Expert* untuk menentukan apakah proyek efisiensi penggantian lampu dan AC di gedung 620-621 layak atau tidak secara ekonomi.

Ketika menentukan pembayaran pinjaman (*debt payments*), pokok dan bunga harus dibayarkan setiap tahun untuk melunasi pinjaman. Perhitungan pembayaran pinjaman melibatkan perhitungan tingkat suku bunga pinjaman (*debt interest rate*), jangka waktu pinjaman (*debt term*) dan pinjaman proyek (*project debt*). Meskipun total pembayaran pinjaman tetap konstan selama jangka waktu pinjaman, porsi yang dialokasikan untuk pokok pinjaman akan bertambah, sementara porsi yang dialokasikan untuk bunga akan berkurang seiring berjalannya waktu (RETScreen, 2005). Rumus untuk menghitung pembayaran pinjaman disediakan dalam Persamaan (2.25):

$$D = C f_d \left(\frac{i_d}{1 - \frac{1}{(1+i_d)^n}} \right) \quad (2.25)$$

Dimana, C adalah total investasi proyek, f_d adalah rasio pinjaman (*debt ratio*), i_d adalah tingkat suku bunga (*interest rate*) dan n adalah jangka waktu pinjaman dalam tahun (*debt term*).

Dalam menghitung *Net Present Value* (NPV) melibatkan evaluasi nilai sekarang dari semua aliran kas masuk dan membandingkannya dengan nilai sekarang dari semua aliran kas keluar yang terkait dengan proyek investasi yang didiskontokan (Rehman, 2005) sehingga selisih nilai sekarang dari arus kas tersebut disebut dengan NPV untuk menentukan apakah investasi tersebut layak atau tidak layak dengan melihat nilai NPV yang positif atau lebih besar dari pada nol (Arjunan, 2020; RETScreen, 2005), seperti yang diberikan pada Persamaan (2.26) berikut ini:

$$NPV = \sum_{n=0}^n \frac{C_n}{(1+r)^n} \quad (2.26)$$

C_n adalah arus kas masuk dikurangi arus kas keluar dan r adalah tingkat diskonto (*discount rate*). Dalam menghitung kas bersih menggunakan Persamaan (2.27) dan (2.28).

$$C_n = C_{in,n} - C_{out,n} \quad (2.27)$$

$$C_{out,n} = C_{O\&M}(1 + r_i)^n + C_{fuel}(1 + r_e)^n + D \quad (2.28)$$

Dimana, $C_{(O\&M)}$ adalah biaya pemeliharaan dan operasi dalam satu tahun, r_i adalah tingkat inflasi (*inflation rate*), C_{fuel} adalah biaya tagihan listrik dalam satu tahun, r_e adalah inflasi tarif listrik (*fuel cost escalation rate*), D adalah biaya pembayaran pinjaman dalam satu tahun.

Internal Rate of Return (IRR) adalah kemampuan arus kas untuk mengembalikan modal pinjaman pada tingkat diskonto yang menyebabkan NPV proyek menjadi nol (Chowdhury et al., 2020). Indikator bahwa investasi tersebut layak dilakukan adalah nilai $IRR \geq$ suku bunga pinjaman (Okoe et al., 2023). IRR dihitung dengan menyelesaikan Persamaan (2.29) :

$$0 = \sum_{n=0}^n \frac{C_n}{(1+IRR)^n} \quad (2.29)$$

Dalam menghitung *net Benefit-Cost* (B-C) *ratio*, yaitu perbandingan antara *net present value cash flow* yang diperoleh dengan biaya modal proyek, indikator layak dalam metode perhitungan ini jika nilai rasio yang diperoleh lebih besar dari 1 (Arjunan, 2020; Khamharnphol et al., 2023; RETScreen, 2005) dengan menggunakan Persamaan (2.30):

$$B-C = \frac{NPV + (1 - f_d)C}{(1 - f_d)C} \quad (2.30)$$

Simple Payback (SP) atau periode pengembalian modal merupakan cara untuk menghitung lamanya waktu yang dibutuhkan dari penerimaan kas bersih untuk memulihkan biaya investasi menggunakan Persamaan (2.31) sebagai berikut (RETScreen, 2005):

$$SP = \frac{C_n}{C} \quad (2.31)$$

2.6.2. Tekno-ekonomi dari sistem photovoltaic

Total net present cost (NPC) mencakup semua biaya dari sistem nilai sekarang, dikurangi nilai sekarang dari pendapatan yang diperoleh selama umur proyek, Biaya-biaya ini terdiri dari biaya modal, biaya penggantian, biaya O&M, dan tagihan listrik dari jaringan. Di sisi lain, pendapatan meliputi pendapatan penjualan listrik (ekspor) ke jaringan dan nilai sisa (*salvage value*). Homer menentukan total NPC dengan menjumlahkan arus kas yang didiskontokan untuk setiap tahun selama umur proyek. Total NPC berfungsi sebagai output ekonomi utama dari Homer yang menentukan peringkat semua konfigurasi sistem dalam hasil optimasi. Selain itu, NPC juga menjadi dasar untuk menghitung total biaya tahunan dan LCoE (Dekkiche et al., 2023; Prawitasari et al., 2024; Vaziri Rad et al., 2020). Homer menampilkan dua arus kas nilai yaitu arus kas nominal atau diskonto. Arus kas nominal adalah pendapatan tanpa memperhitungkan bunga pinjaman

dikurangi biaya yang diantisipasi oleh *Homer* seperti biaya pergantian komponen pada tahun tertentu. Arus kas yang didiskontokan adalah arus kas nominal yang didiskontokan ke tahun nol. *Homer* menghitung arus kas yang didiskontokan dengan mengalikan arus kas nominal dengan faktor diskonto (*discount factor*) menggunakan Persamaan (2.32) (HOMER, 2016). *Homer* menggunakan Persamaan (2.33) untuk membagi biaya tahunan dengan total beban listrik yang dikonsumsi oleh beban dan jaringan listrik, sehingga menentukan LCoE (Hiendro et al., 2013; HOMER, 2016).

$$f_d = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (2.32)$$

$$LCoE \left(\frac{C_{ann,total}}{E_{served}} \right) \quad (2.33)$$

Dimana, $C_{ann,total}$ adalah total biaya tahunan dari sistem (Rp/tahun), E_{served} adalah total beban listrik yang dilayani (kWh/tahun).

Homer menggunakan Persamaan (2.34) untuk menghitung total biaya tahunan / *total annualized cost* (Hiendro et al., 2013; HOMER, 2016).

$$C_{Ann,tot} = CRF(i, R_{Proj}) C_{NPC,tot} \quad (2.34)$$

$$CRF(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.35)$$

Dimana, $C_{NPC,tot}$ adalah total biaya bersih saat ini / *total net present cost* (Rp), i adalah tingkat diskonto (%), R_{proj} & n adalah umur proyek (tahun), dan CRF (*capital recovery factor*) adalah fungsi faktor pemulihan modal.

Setelah masa pakai proyek, nilai sisa (*salvage value*) menunjukkan nilai yang tersisa di dalam komponen. *Homer* menggunakan depresiasi linier untuk komponen, yang menandakan bahwa nilai sisa komponen sebanding dengan sisa umurnya di akhir proyek (Dekkiche et al., 2023).

$$S = C_{rep} \left(\frac{R_{rem}}{R_{comp}} \right) \quad (2.36)$$

Dimana, C_{rep} adalah biaya penggantian (Rp), R_{comp} adalah umur komponen (tahun), dan R_{rem} adalah sisa umur komponen pada akhir proyek.

Nilai saat ini (*Present worth*) adalah selisih antara total biaya sekarang bersih (NPC) dari biaya sistem kasus dasar / *base case* dengan sistem yang diusulkan (*propose*). Jika dibandingkan dengan sistem kasus dasar, nilai positif berarti sistem yang diusulkan akan menghemat uang selama proyek berlangsung. Faktor pemulihan modal (CRF) dikalikan dengan total biaya sekarang bersih (NPC) menghasilkan nilai yang disetahunkan (*annual worth*). *Return on investment* (ROI) dihitung dengan membagi selisih rata-rata tahunan arus kas nominal kumulatif selama umur proyek dengan biaya modal. Kemampuan arus kas untuk mengembalikan modal diukur dengan IRR untuk menentukan suku bunga investasi. Homer menghitung biaya energi (*energy charge*) menggunakan persamaan berikut (HOMER, 2016):

$$C_{grid,energy} = \sum_i^{rates} \sum_j^{12} E_{gridpurchases,i,j} \times C_{power,i} - \sum_i^{rates} \sum_j^{12} E_{gridsales,i,j} \times C_{sellback,i} \quad (2.37)$$

Dimana, $E_{gridpurchases,i,j}$ adalah jumlah energi yang dibeli dari jaringan listrik pada bulan j selama tarif i berlaku (kWh), $C_{power,i}$ adalah harga listrik jaringan untuk tarif i (Rp/kWh), $E_{gridsales,i,j}$ adalah jumlah energi yang dijual ke jaringan listrik pada bulan j selama tarif i berlaku (kWh) dan $C_{sellback,i}$ adalah nilai jual kembali untuk tarif i (Rp/kWh).

2.6.3. Biaya operasional dan pemeliharaan (O&M)

Perhitungan biaya operasi dan pemeliharaan mengacu kepada *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, biaya tahunan operasi dan pemeliharaan (O&M) yaitu sebesar \$18,11/kWp/tahun (Ramasamy et al., 2022) atau setara dengan Rp.272.881/kWp/tahun dengan kurs US\$ 1 setara dengan Rp.15.068 (Ministry of Trade, 2023). Biaya O&M baterai sebesar \$0,2/kWh/tahun atau Rp.3.012/kWh (Gumintang et al., 2020).

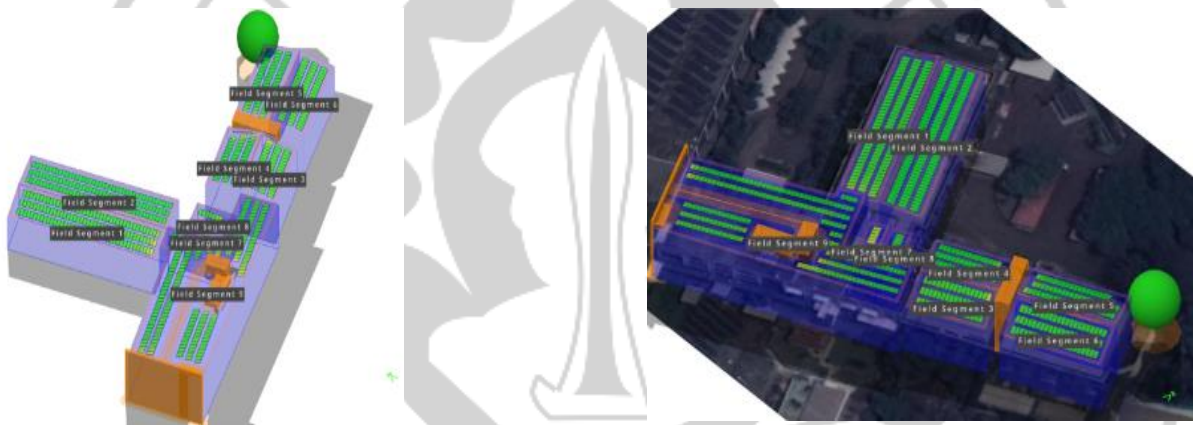
Dari acuan tersebut dapat dihitung biaya operasi dan pemeliharaan dalam setahun untuk PLTS dan baterai dengan persamaan sebagai berikut :

$$Biaya\ O\&M\ PV,\ Baterai\ (thn) = Biaya\ per\ kWp,\ kWh \times Kapasitas\ kWp,\ Kwh \quad (2.38)$$

2.7 Software yang Digunakan

2.7.1. *Helioscope*

Helioscope berbeda dengan perangkat lunak lain yang digunakan dalam penelitian ini. Perangkat lunak ini tidak diinstal di komputer karena berbasis web dan memiliki koneksi internet (Umer et al., 2019). Perangkat lunak ini secara khusus dikembangkan untuk tenaga surya dengan sistem *on-grid* dengan kapasitas maksimum yang dapat dimodelkan sebesar 5 MW (Kumar Vashishtha et al., 2022). *Helioscope* terintegrasi dengan perangkat lunak seperti CAD sehingga tampilan output lebih terlihat dengan lokasi, sehingga memudahkan pengguna dalam mengembangkan sistem yang akan diaplikasikan.



Gambar 2.9 Simulasi bayangan menggunakan *Helioscope*

2.7.2. *Homerpro*

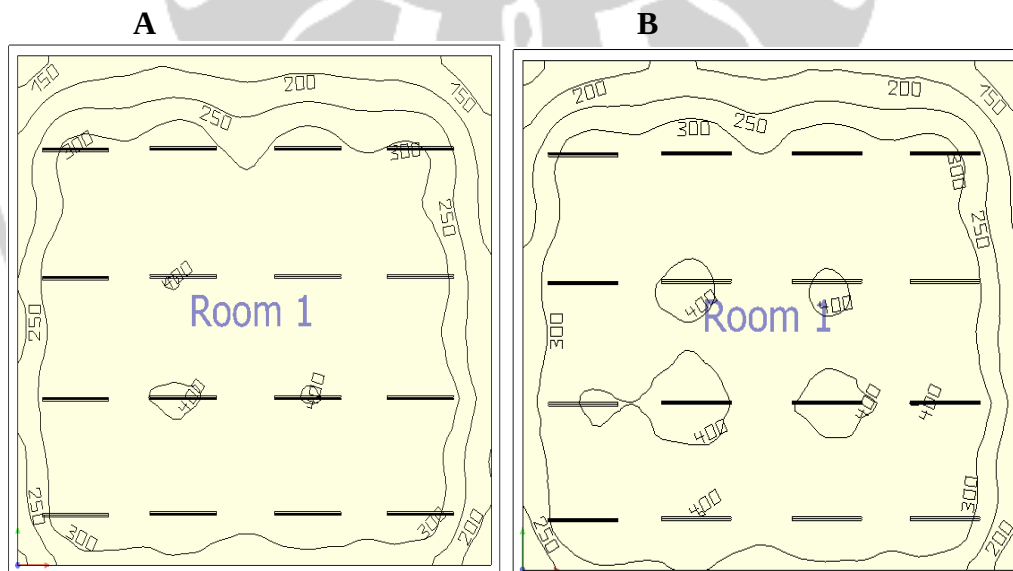
Homer dapat digunakan untuk merancang, mengoptimalkan dan menganalisis sistem energi surya *offgrid*, *ongrid* dan *hybrid* dengan baterai yang terhubung dengan jaringan sehingga didapatkan kapasitas sistem yang paling efektif dan ekonomis serta biaya energi dan biaya modal investasi (Chisale & Mangani, 2021).



Gambar 2.10 Simulasi sistem *hybrid* dan *ongrid* menggunakan *Homer*

2.7.3. Dialux-evo

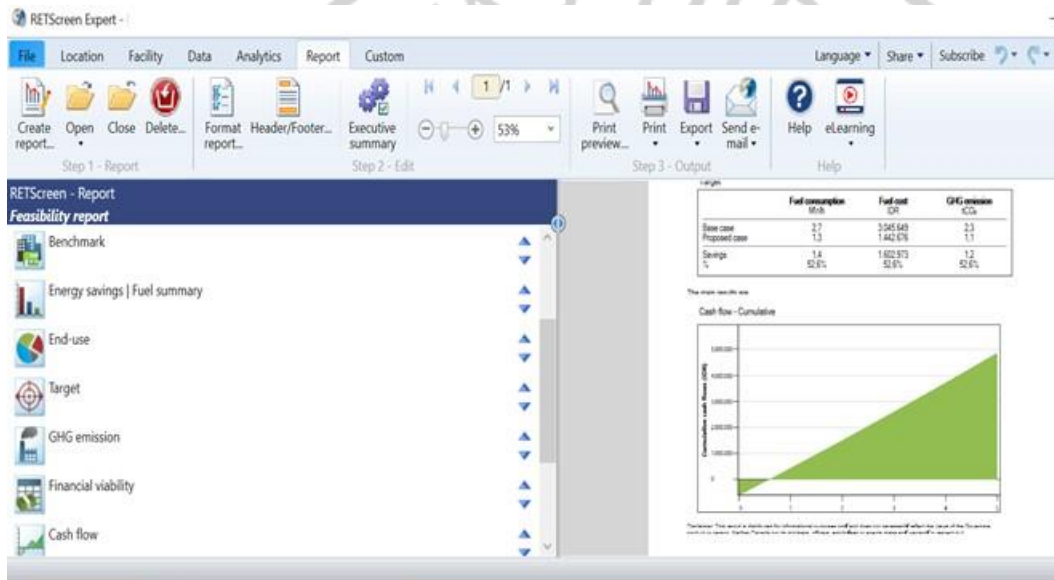
Dialux yaitu perangkat lunak gratis, dikembangkan perusahaan dari Jerman yang digunakan untuk perencanaan tata cahaya ruangan. Perangkat lunak ini dapat melakukan simulasi ruang dengan basis data lampu yang tersedia dipasaran dan juga dapat menginput data apabila basis data lampu yang akan dipasang tidak ditemukan. Hasil yang didapatkan dari simulasi ini menghitung dan memvisualisasikan distribusi cahaya baik 2 Dimensi maupun 3 Dimensi (Jum'atullah et al., 2020).



Gambar 2.11 simulasi menggunakan *Dialux* (A) fluoresen (B) LED

2.7.4. RETScreen

RETScreen adalah perangkat lunak yang dikembangkan oleh Pemerintah Kanada. Perangkat lunak ini untuk mendukung kegiatan energi rendah karbon dan energi terbarukan. Perangkat lunak ini menyediakan fungsi untuk mengidentifikasi dan memodelkan kelayakan proyek efisiensi energi dan pembangkit listrik (Owolabi et al., 2020).



Gambar 2.12 Simulasi tekno-ekonomi menggunakan *RETScreen*

BAB III

