

**SKRIPSI**

**DESAIN DAN ANALISIS TEKNO-EKONOMI SISTEM PV  
STANDALONE BERBASIS PV\*SOL UNTUK PULAU KECIL**

**Disusun dan diajukan oleh:**

**HERIANTO**

**D041181340**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2023**

## LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

### DESAIN DAN ANALISIS TEKNO-EKONOMI SISTEM PV STANDALONE BERBASIS PV\*SOL UNTUK PULAU KECIL

Disusun dan diajukan oleh:

**HERIANTO**

**D041181340**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada tanggal 25 Agustus 2023  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama,

Prof. Dr.Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng., IPU.

NIP 197405301999031003

Pembimbing Pendamping,

Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 197703222005011001

Ketua Departemen Teknik Elektro,



Dr.Eng. Ir. Dewiani, M.T.

NIP. 196910261994122001

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	Herianto
NIM	D041181340
Program Studi	Teknik Elektro
Jenjang	S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Desain dan Analisis Tekno-Ekonomi Sistem PV *Standalone* Berbasis PV\*SOL  
untuk Pulau Kecil

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak mana pun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala risiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 25 Agustus 2023

Yang Menyatakan,



Herianto

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulisan tugas akhir yang berjudul “Desain dan Analisis Tekno-Ekonomi Sistem PV *Standalone* Berbasis PV\*SOL untuk Pulau Kecil” dapat terselesaikan dengan baik. Salam dan shalawat juga semoga senantiasa selalu terkirim kepada baginda Rasulullah Muhammad SAW, suri tauladan bagi semua umat manusia.

Tugas akhir ini dibuat dalam memenuhi salah satu syarat penyelesaian studi program sarjana di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tentunya dalam menyelesaikan tugas akhir ini banyak rintangan yang dihadapi oleh penulis. Namun berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, akhirnya tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak telah memberikan kontribusi secara langsung maupun tidak langsung membantu kelancaran penyusunan tugas akhir ini, diantaranya kepada:

1. Bapak Prof. Dr.Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng., IPU. selaku pembimbing I sekaligus Ketua Laboratorium Energi Terbarukan dan Sistem Cerdas
2. Bapak Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D. selaku pembimbing II yang senantiasa meluangkan waktu, memberikan bimbingan, dorongan, masukan, arahan dan motivasi selama penulis menyusun tugas akhir ini.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, M.T., IPM. dan Ibu Dr. Hasniaty A, S.T., M.T. selaku penguji yang telah memberikan saran dan kritik guna perbaikan tugas akhir ini.
4. Ibu Dr.Eng. Ir. Dewiani, M.T., IPM. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Bapak Prof. Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin.

7. Seluruh dosen Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala ilmu dan bantuan yang diberikan selama penulis menempuh masa studi.
8. Orang tua dan segenap keluarga tercinta yang telah memberikan dukungan, dorongan dan motivasi tanpa henti.
9. Teman seperjuangan Laboratorium Energi Terbarukan dan Sistem Cerdas atas bantuan, saran dan motivasinya.
10. Teman-teman Teknik Elektro angkatan 2018 (@CAL18RATOR) yang senantiasa menemani dan memberikan semangat, motivasi, dan dukungan selama masa studi.
11. Teman-teman Muncha's House yang selalu saling mendukung selama menjalani suka duka hidup di perantauan.
12. Kanda-kanda senior Departemen Teknik Elektro yang telah banyak memberikan bimbingan dan arahan yang membantu selama masa studi.
13. Seluruh pihak yang telah terlibat membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Semoga segala kebaikan yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan dari Allah SWT. Penulis pun menyadari sepenuhnya bahwa penulisan tugas akhir ini masih sangat jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan dalam penyempurnaan penulisan ini.

Gowa, 25 Agustus 2023

Penulis

## ABSTRAK

**HERIANTO.** *Desain dan Analisis Tekno-Ekonomi Sistem PV Standalone Berbasis PV\*SOL untuk Pulau Kecil* (dibimbing oleh Syafaruddin dan Yusri Syam Akil).

Sistem PV *standalone* adalah salah satu solusi yang menjanjikan dalam menggantikan pembangkit listrik tenaga diesel di pulau-pulau kecil dengan sumber energi terbarukan. Namun, penerapannya untuk pulau-pulau kecil juga memiliki kendala, diantaranya keterbatasan finansial dan lahan. Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan pemilihan komponen utama berupa jenis modul PV dan inverter serta kemiringan modul PV dalam mendesain sistem PV *standalone* yang optimal dari aspek kinerja, keekonomian dan kebutuhan lahan instalasi. Penelitian ini bertujuan untuk mendesain dan menganalisis berbagai konfigurasi sistem PV menggunakan jenis modul PV dan inverter yang berbeda. Selain itu, pengaruh kemiringan modul PV juga dieksplorasi dalam desain sistem PV. Hal ini untuk menghasilkan rekomendasi konfigurasi desain sistem PV *standalone* yang menghasilkan energi maksimum dengan kebutuhan biaya dan area instalasi minimum untuk pulau kecil yang dijadikan studi kasus. Data yang digunakan meliputi biaya komponen, informasi geografis, kondisi iklim dan estimasi kebutuhan energi listrik di Pulau Kulambing sebagai studi kasus. Desain dan simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak PV\*SOL. Terdapat lima jenis modul PV yang dievaluasi dalam desain, yaitu poly-crystalline, mono-crystalline, CIGS, amorphous, dan CdTe. Setiap jenis modul tersebut dikombinasikan dengan dua jenis inverter, yaitu inverter central dan inverter string. Selain itu, kemiringan modul PV divariasikan dengan empat sudut, yaitu 5°, 10°, 15°, dan 20°. Penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan jenis modul PV, inverter dan sudut kemiringan modul PV memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja, keekonomian dan kebutuhan lahan instalasi sistem PV. Hasil penelitian ini merekomendasikan kombinasi modul mono-crystalline dengan jenis inverter central dan kemiringan modul 5° sebagai konfigurasi sistem PV *standalone* yang paling optimal, karena membutuhkan lahan instalasi paling sedikit dengan luas permukaan total modul PV 1.691,1 m<sup>2</sup> dan biaya energi listrik yang rendah yaitu Rp. 3.380,65/kWh.

Kata Kunci: Analisis Tekno-Ekonomi, Pulau Kecil, PV\*SOL, Sistem PV Standalone

## ABSTRACT

**HERIANTO.** *Design and Techno-Economic Analysis of Standalone PV System Based on PV\*SOL for Small Islands* (supervised by Syafaruddin and Yusri Syam Akil).

Standalone PV systems represent a promising solution for replacing diesel-powered electricity generators on small islands with renewable energy sources. However, their application in such locations is challenged by constraints including financial limitations and land availability. Hence, it is crucial to consider the selection of primary components such as PV module types, inverters, and PV module tilt angles when designing an optimal standalone PV system from the perspectives of performance, cost-effectiveness, and installation land requirements. This study aims to design and analyze various configurations of PV systems using different types of PV modules and inverters. Additionally, the impact of PV module tilt angles is explored within the PV system design. This is intended to generate recommendations for optimal standalone PV system configurations that yield maximum energy output while minimizing costs and installation area requirements for the chosen small island case study. The utilized data encompasses component costs, geographic information, climatic conditions, and estimated electricity consumption on Pulau Kulambing, the selected case study area. The design and simulations were conducted using the PV\*SOL software. Within this research, five types of PV modules are evaluated: poly-crystalline, mono-crystalline, CIGS, amorphous, and CdTe. Each module type is combined with two types of inverters: central and string inverters. Furthermore, the tilt angle of the PV modules is varied at four angles: 5°, 10°, 15°, and 20°. The findings of this study indicate that the selection of PV module types, inverters, and PV module tilt angles significantly impacts the performance, cost-effectiveness, and land installation requirements of PV systems. The research recommends a configuration featuring mono-crystalline modules, central inverters, and a 5° module tilt angle. This particular configuration requires the least installation area while covering a total surface area of 1,691.1 m<sup>2</sup> for PV modules, and offers a low electricity cost of Rp. 3,380.65/kWh.

**Keywords:** Techno-Economic Analysis, Small Islands, PV\*SOL, Standalone PV System.

## DAFTAR ISI

	halaman
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR .....	iii
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL .....	xv
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan .....	7
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>9</b>
2.1 Pulau Kecil.....	9
2.2 Sistem PV <i>Standalone</i> (Standalone Photovoltaic System) .....	9
2.3 Komponen Utama Sistem PV <i>Standalone</i> .....	11
2.4 Jenis-Jenis Teknologi Modul Surya .....	17
2.5 Jenis-Jenis Teknologi Inverter PV .....	23
2.6 Instalasi Modul PV Sistem Ground Mounted .....	27
2.7 Perangkat Lunak PV*SOL .....	30

BAB III METODE PENELITIAN.....	34
3.1 Jenis Penelitian.....	34
3.2 Prosedur Penelitian.....	34
3.3 Konfigurasi Sistem.....	35
3.4 Deskripsi Lokasi.....	36
3.5 Kebutuhan Energi Beban.....	39
3.6 Menentukan Kapasitas Sistem PV .....	41
3.7 Komponen yang Digunakan.....	43
3.8 Variasi Desain Sistem .....	45
3.9 Analisis Teknis.....	47
3.10 Analisis Ekonomis.....	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	54
4.1 Desain Sistem PV <i>Standalone</i> .....	54
4.1.1 Kapasitas sistem PV <i>standalone</i> .....	54
4.1.2 Desain sistem PV menggunakan modul PV poly-crystalline .....	55
4.1.3 Desain sistem PV menggunakan modul PV mono-crystalline .....	56
4.1.4 Desain sistem PV menggunakan modul PV CIGS .....	57
4.1.5 Desain sistem PV menggunakan modul PV amorphous .....	58
4.1.6 Desain sistem PV menggunakan modul PV CdTe .....	59
4.1.7 Perbandingan luas area desain jenis modul PV berbeda.....	60
4.2 Analisis Teknis .....	61
4.2.1. Performa sistem dengan modul PV poly-crystalline .....	61
4.2.2. Performa sistem dengan modul PV mono-crystalline .....	63
4.2.3. Performa sistem dengan modul PV CIGS .....	64
4.2.4. Performa sistem dengan modul PV amorphous.....	66
4.2.5. Performa sistem dengan modul PV CdTe.....	67
4.2.6. Perbandingan performa tiap jenis teknologi modul PV .....	68
4.3 Analisis Ekonomis.....	73
4.3.1 Biaya siklus hidup ( <i>life cycle cost</i> ) .....	73

4.3.2 Biaya energi listrik.....	74
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	76
5.1 Kesimpulan.....	76
5.2 Saran.....	77
DAFTAR PUSTAKA .....	79
LAMPIRAN-LAMPIRAN.....	84

## DAFTAR TABEL

Tabel 1 Perbandingan karakteristik tiap jenis modul PV .....	23
Tabel 2 Perbandingan karakteristik inverter central dan inverter string .....	26
Tabel 3 Perbandingan fitur dalam perangkat lunak PV*SOL, PVSYST, HelioScope .....	31
Tabel 4 Penjelasan komponen-komponen dalam sistem PV <i>standalone</i> .....	36
Tabel 5 Karakteristik area untuk desain dan simulasi sistem PV .....	38
Tabel 6 Estimasi penggunaan energi listrik harian penduduk .....	40
Tabel 7 Komponen modul PV yang digunakan .....	43
Tabel 8 Komponen inverter yang digunakan .....	44
Tabel 9 Komponen inverter baterai yang digunakan .....	44
Tabel 10 Komponen baterai yang digunakan.....	45
Tabel 11 Parameter simulasi performa pada program PV*SOL.....	48
Tabel 12 Harga patokan rata-rata modul PV poly-crystalline .....	50
Tabel 13 Harga patokan rata-rata modul PV mono-crystalline .....	50
Tabel 14 Harga patokan rata-rata modul PV CIGS .....	51
Tabel 15 Harga patokan rata-rata modul PV amorphous.....	51
Tabel 16 Harga patokan rata-rata modul PV CdTe.....	52
Tabel 17 Harga patokan rata-rata baterai lithium .....	52
Tabel 18 Harga patokan grid inverter .....	53
Tabel 19 Harga patokan rata-rata bidirectional inverter .....	53
Tabel 20 Kapasitas komponen utama dalam desain sistem PV <i>standalone</i> .....	54
Tabel 21 Perbandingan luas total permukaan tiap jenis modul PV .....	60
Tabel 22 Hasil simulasi performa sistem PV <i>standalone</i> menggunakan modul PV poly-crystalline .....	62
Tabel 23 Hasil simulasi performa sistem PV <i>standalone</i> menggunakan modul PV mono-crystalline .....	63

Tabel 24 Hasil simulasi performa sistem PV <i>standalone</i> menggunakan modul PV CIGS .....	65
Tabel 25 Hasil simulasi performa sistem PV <i>standalone</i> menggunakan modul PV amorphous.....	66
Tabel 26 Hasil simulasi performa sistem PV <i>standalone</i> menggunakan modul PV CdTe.....	67

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Topologi sistem PV <i>standalone</i> .....	10
Gambar 2 Modul PV pada umumnya.....	12
Gambar 3 Pemasangan dan skema inverter jaringan .....	13
Gambar 4 Pemasangan dan inverter baterai dalam rumah pembangkit.....	14
Gambar 5 Pemasangan dan skema baterai dalam rumah pembangkit .....	15
Gambar 6 Kotak penggabung untuk sistem fotovoltaik.....	16
Gambar 7 Klasifikasi warna kabel AC.....	17
Gambar 8 Skema pembagian jenis-jenis modul PV.....	17
Gambar 9 Tampilan modul PV mono-crystalline .....	19
Gambar 10 Tampilan modul PV poly-crystalline .....	19
Gambar 11 Perkembangan Efisiensi Modul Surya Thin Film .....	20
Gambar 12 Tampilan contoh pemasangan modul PV amorphous.....	21
Gambar 13 Tampilan contoh pemasangan modul PV CdTe.....	22
Gambar 14 Tampilan contoh pemasangan modul PV CIGS .....	22
Gambar 15 Perbedaan konfigurasi central, string dan mikro inverter .....	24
Gambar 16 Contoh instalasi PV ground mounted.....	27
Gambar 17 Faktor-faktor penting dalam memperkirakan kebutuhan luas area sistem mounting modul PV .....	28
Gambar 18 Tampilan desain 3D dalam program PV*SOL .....	32
Gambar 19 Diagram alir penelitian.....	34
Gambar 20 Konfigurasi sistem PV <i>standalone</i> .....	36
Gambar 21 Tampilan satelit Pulau Kulambing, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan, Sulawesi Selatan melalui Google Earth.....	37
Gambar 22 Area yang diterapkan untuk desain sistem PV .....	39
Gambar 23 Kurva perkiraan beban 24 jam Pulau Kulambing .....	41

Gambar 24 Skema pengujian variasi desain sistem PV .....	46
Gambar 25 Tampilan desain mounting modul PV jenis poly-crystalline untuk setiap variasi sudut kemiringan .....	55
Gambar 26 Tampilan desain mounting modul PV jenis mono-crystalline untuk setiap variasi sudut kemiringan .....	56
Gambar 27 Tampilan desain mounting modul PV jenis CIGS untuk setiap variasi sudut kemiringan .....	57
Gambar 28 Tampilan desain mounting modul PV jenis amorphous untuk setiap variasi sudut kemiringan .....	58
Gambar 29 Tampilan desain mounting modul PV jenis CdTe untuk Setiap variasi sudut kemiringan .....	59
Gambar 30 Perbandingan <i>spec. annual yield</i> (kWh/kWp) tiap jenis teknologi modul PV .....	69
Gambar 31 Perbandingan <i>performance ratio</i> (PR) (%) tiap jenis teknologi modul PV .....	70
Gambar 32 Perbandingan <i>yield reduction due to shading</i> (%/year) tiap jenis teknologi modul PV .....	71
Gambar 33 Perbandingan <i>maximum possible PV energy</i> (kwh/year) tiap jenis teknologi modul PV .....	72
Gambar 34 Perbandingan biaya siklus hidup untuk setiap variasi desain sistem PV .....	73
Gambar 35 Perbandingan biaya energi listrik untuk setiap variasi desain sistem PV .....	74

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Datasheet string inverter (SMA Sunny Tripower 20000TL).....	84
Lampiran 2 Datasheet central inverter (Solectria Renewables SGI 300) .....	85
Lampiran 3 Datasheet modul PV jenis poly-crystalline (Canadian Solar CS3W 450P) .....	86
Lampiran 4 Datasheet modul PV jenis mono-crystalline (LONGI Solar LR5- 66HPH 500M) .....	87
Lampiran 5 Datasheet modul PV jenis CIGS (Eterbright Solar CIGS-3000A1 Series) .....	88
Lampiran 6 Datasheet modul PV jenis Amorphous (ENN Solar Energy EST- 500).....	89
Lampiran 7 Datasheet modul PV jenis CdTe (First Solar FS-6450) .....	90
Lampiran 8 Datasheet inverter baterai (SMA Sunny Island 8.0H) .....	91
Lampiran 9 Datasheet baterai (Pylontecht US2000B) .....	92

## DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

---

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
AC	Alternating Current, Arus Bolak-balik
ALCC	Annual Life Cycle Cost, Biaya Siklus Hidup Tahunan
CdTe	Cadmium Telluride
CIGS	Copper Indium Gallium Di-Selenide
DC	Direct Current, Arus Searah
DEC	Daily Energi Consumption
DHI	Diffuse Horizontal Irradiation
DNI	Direct Normal Irradiation
GHI	Global Horizontal Irradiation
kWh	Kilo Watt Hour
LCC	Life Cycle Cost, Biaya Siklus Hidup
PR	Performance Rasio, Rasio Performa
PSH	Peak Sun Hour
PV	Photovoltaic, Fotovoltaik
W	Watt
Wp	Watt Peak, Daya Puncak

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan jumlah pulau mencapai 17.001 pulau (BPS Indonesia, 2023). Sebagai negara kepulauan, Indonesia memiliki penduduk yang tersebar di berbagai pulau kecil dan pedesaan yang menimbulkan tantangan dalam distribusi listrik. Permintaan listrik yang rendah di pulau-pulau kecil dan pedesaan menyulitkan investasi besar untuk infrastruktur jaringan listrik. Oleh karena itu, sebagian besar penduduk di pulau-pulau kecil dan pedesaan di Indonesia menggunakan generator diesel untuk memenuhi kebutuhan listrik (Veldhuis & Reinders, 2015).

Khusus untuk menyediakan listrik di pulau-pulau kecil, Indonesia membutuhkan pendekatan baru yang layak secara teknis dan ekonomis. Perluasan jaringan maupun penggunaan generator diesel sudah menjadi pendekatan usang untuk memasok listrik ke rumah tangga di pulau-pulau terpencil dengan penduduk yang tinggal berjauhan satu sama lain (Suhud dkk., 2021). Pendekatan konvensional dengan menempatkan PLTD (pembangkit listrik tenaga diesel) kecil di wilayah kepulauan bukan lagi satu-satunya pilihan untuk menyediakan akses listrik yang andal dan hemat biaya. Masalah umum yang ditemui dalam pengoperasian PLTD adalah sulitnya penyediaan bahan bakar minyak di wilayah kepulauan. Selain itu, dalam mereduksi emisi dan meningkatkan bauran energi baru dan terbarukan (EBT), transisi energi dari energi berbasis impor ke energi domestik menjadi langkah strategis yang harus segera dilakukan (KESDM, 2022).

Menyediakan akses listrik di pulau-pulau kecil melalui sumber energi terbarukan yang tersedia secara lokal seperti energi matahari akan menjadi opsi yang menjanjikan. Sistem PV (*photovoltaic*) standalone dengan sistem penyimpanan baterai adalah solusi yang cukup dominan jika dibandingkan dengan yang lain dalam menggantikan PLTD di pulau-pulau kecil. Pemanfaatan energi matahari melalui sistem fotovoltaik (PV) tidak hanya kompetitif dalam hal teknologi tetapi juga dalam hal biaya jika dibandingkan dengan PLTD kecil

(Gumintang dkk., 2020). Sistem PV *standalone* juga sangat cocok diterapkan di lokasi pulau yang memiliki kendala pengembangan jaringan listrik atau kesulitan transportasi untuk akses bahan bakar minyak. Relatif mudahnya instalasi di berbagai lokasi dengan berbagai ukuran serta kapasitas, menjadi daya tarik tersendiri dibandingkan dengan jenis pembangkit EBT lainnya (Kencana dkk., 2018). Mengingat Indonesia adalah negara tropis yang menerima radiasi matahari yang melimpah rata-rata sebesar 4,8 kWh/m/hari, sistem PV dapat menjadi solusi yang sangat baik untuk melistriki daerah di pulau-pulau kecil yang tersebar (Veldhuis & Reinders, 2015).

Namun, pemanfaatan sistem PV *standalone* sebagai sumber energi terbarukan untuk pulau kecil juga memiliki berbagai kendala. Keterbatasan sumber daya finansial merupakan salah satu faktor utama yang menjadi hambatan dalam pemanfaatan sistem PV *standalone* di pulau-pulau kecil. Pulau-pulau kecil juga merupakan entitas yang memiliki keterbatasan untuk dimanfaatkan terutama ketersediaan lahan (Ketjulan dkk., 2019). Sehingga dalam menyusun suatu kebijakan penerapan sistem PV *standalone* di suatu daerah perlu dilakukan penilaian dalam berbagai aspek, diantaranya teknologi dan ekonomi (Gumintang dkk., 2020).

Selain kondisi lingkungan, beberapa faktor seperti jenis modul PV, inverter dan kemiringan modul sangat mempengaruhi kinerja dan *output* sistem PV (Vidyanandan, 2017). Pemilihan jenis komponen utama juga sangat mempengaruhi biaya yang diperlukan dalam membangun sistem PV *standalone*. Jenis modul PV, inverter dan orientasi modul merupakan parameter yang dapat ditentukan dalam mendesain sebuah sistem PV. Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan pemilihan komponen utama berupa jenis modul PV dan inverter serta kemiringan modul PV dalam mendesain sistem PV *standalone* yang optimal dari aspek teknologi dan keekonomian.

Saat ini terdapat dua jenis teknologi modul PV yang ada di pasaran, yaitu modul PV generasi pertama (*crystalline silicone*) dan generasi kedua (*thin film*). Masing-masing jenis teknologi modul PV memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri. Modul PV film tipis kurang efisien dibandingkan dengan modul PV

crystalline, tetapi harganya lebih murah (RENAC dkk., 2020). Teknologi produksi modul PV poly-crystalline saat ini memiliki biaya produksi yang lebih murah, namun secara umum produk akhirnya memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan teknologi mono-crystalline (Umar dkk., 2018). Modul teknologi film tipis saat ini masih kalah efisien dibandingkan modul silikon kristal, serta memiliki masa pakai yang lebih pendek. Meskipun demikian, modul film tipis memiliki keunggulan dalam menurunkan efisiensi yang lebih rendah saat suhu meningkat, sehingga cocok untuk daerah dengan intensitas radiasi matahari yang tinggi. Dengan demikian, penggunaan modul film tipis dapat memberikan keuntungan bagi wilayah-wilayah dengan intensitas sinar matahari yang tinggi. (Benda & Černá, 2020).

Sementara untuk jenis inverter, saat ini terdapat tiga jenis inverter PV yang paling banyak digunakan yaitu inverter terpusat, inverter string, dan inverter mikro (Yilmaz & Dincer, 2017). Sistem PV berkapasitas besar pada umumnya menggunakan inverter PV terpusat, sementara pembangkit listrik yang lebih kecil beroperasi lebih baik dengan inverter PV tersebar (string) karena fleksibilitas dan keandalannya. Namun, belum ada pendekatan yang paling tepat dalam penentuan desain sistem terpusat atau tersebar karena banyaknya faktor yang perlu dipertimbangkan (Gumintang dkk., 2020). Oleh karena itu, diperlukan kajian untuk menentukan kombinasi jenis modul PV dan inverter yang paling optimal dan ekonomis dalam penerapan sistem PV *standalone*. Hal tersebut dapat dilakukan dengan melakukan perbandingan analisis tekno-ekonomi.

Selain pemilihan komponen yang tepat, keterbatasan lahan untuk instalasi modul surya juga perlu dipertimbangkan dalam mendesain sistem PV untuk wilayah pulau kecil. Hal ini karena sistem PV *standalone* yang dioperasikan dengan sistem terpusat dengan modul surya dipasang di tanah (*ground mounted*) membutuhkan lahan kosong untuk instalasinya. Untuk mengefisienkan penggunaan lahan, efisiensi modul PV, jumlah modul PV, kemiringan modul PV dan jarak antar barisnya menjadi faktor penting yang dipertimbangkan untuk merancang sistem PV skala besar (Tamoor dkk., 2022).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengetahui analisis tekno-ekonomi sistem PV untuk masyarakat daerah terpencil. Sankoh dkk. (2022) melakukan analisis tekno-ekonomi komparatif yang dilakukan untuk menentukan empat opsi individu yang paling layak untuk sistem pembangkit listrik *mini-grid* off-grid yang memanfaatkan sumber-sumber yang meliputi: *solar photovoltaic* (SPV), *diesel generator* (DG), dan *battery system* (BS). Ammari dkk. (2021) melakukan simulasi teknis dan ekonomi sistem fotovoltaik dengan tiga jenis penyimpanan yang berbeda.

Penggunaan program PV\*SOL untuk menganalisis tekno-ekonomi sistem PV telah dilakukan oleh Nkuriyingoma dkk., (2022) untuk menganalisis sistem PV yang terhubung ke jaringan dengan BESS (*battery energy storage system*) untuk memasok komunitas perumahan kecil. PV\*SOL adalah perangkat lunak Jerman yang dikembangkan oleh Valentine Software untuk program simulasi dinamis dengan visualisasi 3D dan analisis bayangan sistem fotovoltaik yang terperinci (Umar dkk., 2018). Tampilan antarmuka dari PV\*SOL cukup sederhana sehingga mudah dimengerti dan digunakan oleh pengguna. PV\*SOL juga dapat menyajikan hasil simulasi dalam bentuk laporan dokumen sehingga cocok digunakan bagi pengguna sebagai laporan teknis lengkap dengan simulasi finansialnya (Karuniawan, 2021).

Berdasarkan studi literatur, belum ditemukan penelitian yang dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem PV *standalone* melalui analisis tekno-ekonomi dengan membandingkan berbagai jenis modul PV dan inverter serta variasi sudut kemiringan melalui program PV\*SOL. Perhatian penelitian sebelumnya juga belum difokuskan pada studi rinci terkait perbandingan berbagai jenis modul PV dan variasi sudut kemiringan untuk penerapan sistem PV *standalone* di daerah pulau kecil yang memiliki keterbatasan lahan untuk instalasi modul PV. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan tekno-ekonomi desain sistem PV *standalone* dengan berbagai kombinasi jenis teknologi modul PV dan inverter serta variasi sudut kemiringan. Penelitian ini juga akan menyelidiki bagaimana meminimalkan pemanfaatan lahan yang tersedia untuk instalasi sistem PV *standalone* di wilayah pulau kecil dengan menganalisis dampak penggunaan berbagai jenis modul PV dan kemiringan modul terhadap kebutuhan

lahan instalasi. Desain, analisis performa dan keekonomian sistem PV dilakukan menggunakan perangkat lunak simulasi PV\*SOL.

Sebagai studi kasus dalam penelitian ini, dipilih lokasi sebuah pulau kecil di daerah Sulawesi Selatan yaitu di Pulau Kulambing, Desa Mattiro Ulung, Kecamatan Liukang Tupabbiring Utara. Pulau ini dipilih sebagai studi kasus karena merupakan salah satu pulau kecil dengan luas 5 km<sup>2</sup> dan menggunakan pembangkit listrik yang masih berasal dari generator diesel dengan total 472 pelanggan (BPS Pangkajene dan Kepulauan, 2023). Dengan menggunakan peta satelit dalam program PV\*SOL, di lokasi pulau ini dapat diketahui bahwa tersedia lahan kosong untuk dapat dilakukan desain sistem PV meskipun dengan luas yang terbatas. Kondisi iklim dan geografis pulau, serta perkiraan kebutuhan energi harian penduduk selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam mendesain sistem PV *standalone*. Berbagai variasi percobaan dilakukan untuk mendapatkan pembangkitan energi modul surya maksimum dengan kebutuhan biaya dan area instalasi minimum. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi bagi pemerintah, praktisi, dan pengambil keputusan dalam memilih kombinasi teknologi yang tepat untuk desain dan penerapan sistem PV *standalone* di wilayah pulau kecil. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan wawasan dan referensi tentang pengaruh pemilihan jenis teknologi terhadap kinerja dan keekonomian serta kebutuhan lahan instalasi dalam desain sistem PV *standalone*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mendesain sistem PV *standalone* yang optimal untuk Pulau Kulambing berdasarkan pemilihan jenis modul PV, inverter, dan kemiringan modul PV yang berbeda, dengan mempertimbangkan aspek kinerja, keekonomian, dan keterbatasan lahan?
2. Bagaimana pengaruh pemilihan jenis teknologi modul PV dan inverter serta kemiringan modul PV terhadap kinerja dan keekonomian serta kebutuhan lahan instalasi dalam desain sistem PV *standalone*?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini diantaranya sebagai berikut:

1. Menghasilkan desain sistem PV *standalone* yang optimal untuk Pulau Kulambing berdasarkan pemilihan jenis modul PV, inverter, dan kemiringan modul PV yang berbeda, dengan mempertimbangkan aspek kinerja, keekonomian, dan keterbatasan lahan.
2. Mengetahui pengaruh pemilihan jenis teknologi modul PV dan inverter serta kemiringan modul PV terhadap kinerja dan aspek keekonomian serta kebutuhan lahan instalasi dalam desain sistem PV *standalone*.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Adapun hasil dan manfaat yang diharapkan dari penelitian ini diantaranya:

1. Penelitian ini akan memberikan rekomendasi terkait konfigurasi desain sistem PV *standalone* yang optimal dari segi teknologi, keekonomian dan pemanfaatan lahan. Informasi ini dapat membantu dalam pengambilan keputusan terkait pemilihan teknologi dan strategi desain yang tepat dalam penerapan sistem PV *standalone* di Pulau Kulambing serta pulau kecil lainnya dengan kondisi yang serupa.
2. Penelitian ini dapat memberikan pemahaman terkait faktor-faktor yang mempengaruhi performa, keekonomian dan kebutuhan lahan instalasi sistem PV *standalone* di Pulau Kulambing serta pulau kecil lainnya dengan kondisi yang serupa sebagai acuan dalam mendesain sistem PV yang lebih efektif dan efisien di wilayah tersebut.
3. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi positif dalam pengembangan pengetahuan dan penerapan energi terbarukan di Pulau Kulambing dan pulau kecil lainnya dengan kondisi serupa. Dengan memanfaatkan sumber daya energi matahari melalui sistem PV *standalone* yang efisien dan ekonomis, dapat diperoleh sumber energi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan di pulau-pulau kecil. Selain itu, penggunaan energi terbarukan juga dapat mengurangi ketergantungan pada

sumber energi fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca, berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim secara global.

### 1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan

Karena keterbatasan tenaga, dana dan waktu, maka penelitian ini memiliki ruang lingkup sebagai berikut:

1. Desain dan simulasi sistem menggunakan perangkat lunak PV\*SOL Premium untuk jenis desain sistem PV *standalone* konfigurasi *AC-coupled* tanpa generator *backup*.
2. Penelitian ini membatasi perbandingan pada lima jenis modul PV (poly-crystalline, mono-crystalline, CIGS, amorphous, dan CdTe) dan dua jenis inverter (inverter central dan inverter string). Pengaruh kemiringan modul PV dianalisis dengan empat sudut ( $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ , dan  $20^\circ$ ).
3. Beberapa jenis pabrikan modul PV dan Inverter yang digunakan sebagai studi kasus dalam penelitian ini diperoleh dalam *database* program PV\*SOL Premium.
4. Lokasi yang digunakan untuk studi kasus desain sistem PV *standalone* dalam penelitian ini adalah salah satu pulau kecil di Sulawesi Selatan, tepatnya di Pulau Kulambing, Kecamatan Liukang Tupabbiring Utara, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan.
5. Profil kebutuhan energi harian yang digunakan dalam penelitian ini merupakan perkiraan kondisi penggunaan energi penduduk berdasarkan jumlah rumah tangga pengguna listrik dan referensi berbagai penelitian relevan.
6. Desain sistem PV *standalone* dalam penelitian ini didasarkan pada perkiraan kebutuhan energi saat ini, sehingga potensi peningkatan kebutuhan energi di masa depan tidak dipertimbangkan dalam analisis.
7. Analisis teknis mengacu pada performa sistem PV *standalone* berdasarkan simulasi PV\*SOL dengan data yang dianalisis dibatasi pada *maximum possible PV energy* (kWh/year), rasio performa / *performance ratio* (PR) (%), energi

spesifik tahunan (*spec. annual yield*) (kWh/kWp), dan *yield reduction due to shading* (%/year).

8. Analisis ekonomi yang dilakukan dibatasi pada biaya siklus hidup (*life cycle cost*) dan biaya energi listrik (*cost of energy*) dalam satu tahun berdasarkan simulasi program PV\*SOL.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pulau Kecil**

Menurut Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-pulau Kecil, pulau kecil adalah pulau dengan luas kurang dari 2.000 km<sup>2</sup> (kilometer persegi). Di samping kriteria utama tersebut, beberapa karakteristik pulau-pulau kecil adalah secara ekologis terpisah dari pulau induknya (*mainland island*), memiliki batas fisik yang jelas dan terpencil dari habitat pulau induk, serta dari segi sosial, ekonomi dan budaya masyarakat pulau-pulau kecil bersifat khas dibandingkan dengan pulau induknya (Kementerian Kelautan dan Perikanan RI, t.t.).

Contoh pulau yang termasuk kategori pulau kecil antara lain Pulau Batam, Pulau Ambon dan Pulau Selayar. Pulau dengan luas < (kurang dari) 100 km<sup>2</sup> (kilometer persegi) termasuk dalam kategori pulau sangat kecil seperti contohnya pulau-pulau di Kepulauan Seribu, Pulau Karimun Jawa, dan Gili Trawangan. Sedangkan Pulau Besar adalah pulau yang luasnya lebih dari 2.000 km<sup>2</sup> yaitu seperti pulau Madura, Pulau Jawa, Pulau Bali dan Pulau Sumatera (Kementerian Kelautan dan Perikanan RI, t.t.).

Pemenuhan kebutuhan listrik sebagian besar daerah pedesaan pulau-pulau kecil di Indonesia masih menggunakan generator diesel yang mahal dan menimbulkan polusi. Selain itu, permintaan listrik yang terus meningkat, berkurangnya sumber daya minyak bumi, dan tujuan penanganan perubahan iklim membutuhkan solusi yang lebih baik. Mengingat Indonesia adalah negara tropis yang menerima radiasi berlimpah dengan rata-rata 4,8 kWh/m/hari, sistem PV dapat menjadi solusi yang sangat baik untuk mengelektifikasi daerah terpencil di pulau-pulau kecil yang tersebar (Veldhuis & Reinders, 2015)

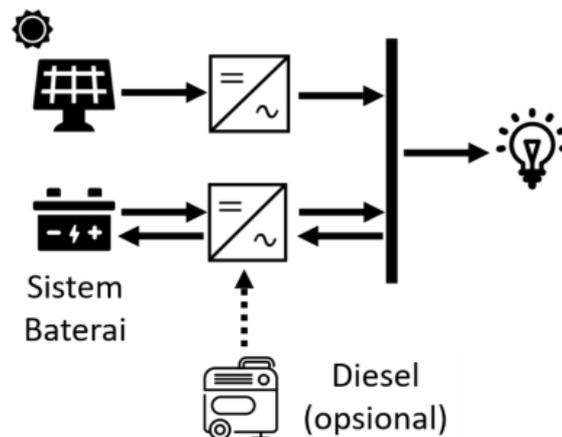
#### **2.2 Sistem PV *Standalone* (Standalone Photovoltaic System)**

Off-grid atau *standalone* adalah sistem kelistrikan yang tidak terhubung dengan jaringan listrik umum. Jadi dapat diartikan bahwa *photovoltaic system* / PV

*system* (sistem fotovoltaik / sistem PV) yang berdiri sendiri (*standalone*) yang selanjutnya disebut *standalone PV system* (sistem PV *standalone*) adalah sistem pembangkitan tenaga listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaik dimana sistem kelistrikannya tidak terhubung dengan jaringan listrik umum (KESDM, 2018).

Sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *off-grid* atau yang dapat disebut *standalone PV system* (sistem PV *standalone*) merupakan sistem PV yang beroperasi secara mandiri tanpa terhubung dengan jaringan listrik PLN. Sistem ini membutuhkan komponen baterai yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik yang diproduksi oleh sistem pada siang hari untuk memenuhi kebutuhan listrik ketika tidak ada sinar matahari seperti saat malam hari (Ramadhani, 2018).

Pada sistem *standalone*, PV adalah satu-satunya sumber energi listrik. Sistem ini sering diimplementasikan di daerah yang belum terjangkau PLN dan tidak bergantung pada pembangkit listrik lain (tidak terhubung dengan jaringan utilitas). Untuk membentuk jaringan listrik yang berdiri sendiri dan mengimbangi *intermittency* sistem ini, umumnya digunakan sistem penyimpanan energi dalam bentuk baterai. Pada topologi ini, terdapat dua skema suplai, yakni suplai sebagian hari atau suplai 24 jam. Kapasitas baterai yang dipilih harus mampu diaplikasikan secara kontinu untuk durasi yang sesuai dengan skema suplai yang direncanakan (Gumintang dkk., 2020). Topologi sistem PV *standalone* ditunjukkan pada Gambar 1 berikut:



Gambar 1 Topologi sistem PV *standalone* (Gumintang dkk., 2020)

Terdapat beberapa jenis sistem PV *off-grid* atau *standalone* yang meliputi:

1. Sistem PV *off-grid* tersebar (*Solar Home System*)

*Solar Home System* (SHS) merupakan sistem PV *off-grid* atau *standalone* yang terpasang pada rumah-rumah untuk memenuhi kebutuhan listrik. SHS merupakan sistem yang bersifat mandiri dan memiliki kapasitas yang kecil. Sistem PV tersebar tidak memiliki sistem jaringan distribusi, sehingga setiap rumah pelanggan memiliki sistem PV tersendiri. Sistem PV tersebar dapat menjadi pilihan ketika persebaran rumah penduduk yang berjauhan satu sama lain (Ramadhani, 2018).

2. Sistem PV Terpusat/Komunal

Sistem PV terpusat *off-grid* merupakan sistem PV yang memiliki baterai, inverter dan sistem jaringan distribusi untuk memenuhi kebutuhan daya dari beberapa pelanggan untuk suatu pulau kecil, desa atau sekelompok masyarakat. Sistem PV dipasang pada suatu tempat dan didistribusikan ke masyarakat setempat. Jenis sistem PV *off-grid* terpusat adalah jenis yang saat ini paling banyak dikembangkan untuk elektrifikasi di daerah pedesaan/*remote* (Kencana dkk., 2018).

3. Sistem PV Hibrida

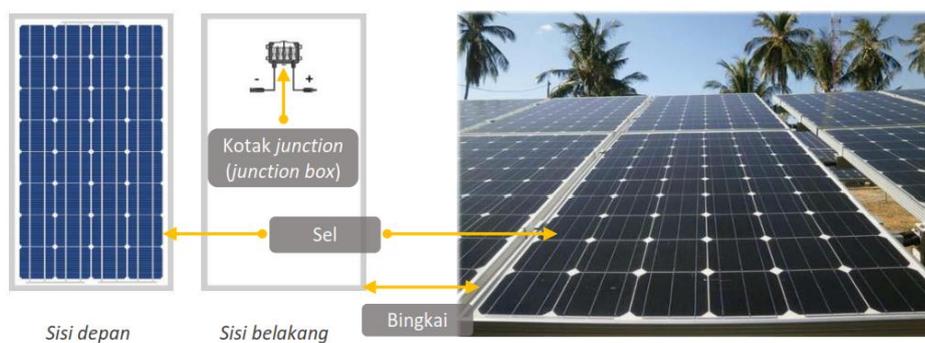
Sistem PV hibrida dapat didefinisikan sebagai sistem PV yang terhubung dengan beban dan sumber pembangkit listrik lainnya seperti Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Pada sistem ini, terdapat sistem PV dan generator diesel sebagai sumber energi listrik, sistem penyimpanan energi dalam bentuk baterai, dan beban lokal (Gumintang dkk., 2020).

### 2.3 Komponen Utama Sistem PV *Standalone*

Sistem PV *standalone* memiliki beberapa komponen yang berperan dalam sistem kerjanya sehingga dapat bekerja untuk memproduksi listrik yang bersumber dari energi surya. Adapun komponen yang terdapat pada sistem PV meliputi modul surya, inverter jaringan, baterai, inverter baterai, kabel, *combiner box*, *solar charge controller*, *mounting*, dan *grounding*.

## 1. Modul PV

Modul PV atau modul surya merupakan salah satu komponen utama dalam sistem PV yang berfungsi untuk mengubah radiasi sinar matahari menjadi energi listrik melalui proses fotoelektrik. Modul surya terdiri atas rangkaian sel fotovoltaik yang terhubung secara seri. Sel-sel tersebut dihubungkan oleh *busbar* dan dilindungi oleh bahan pelapis agar tidak ada kontak langsung dengan lingkungan dan kekuatan mekanik yang mampu merusak sel surya (Ramadhani, 2018). Bentuk modul surya pada umumnya dapat dilihat pada Gambar 2 berikut:



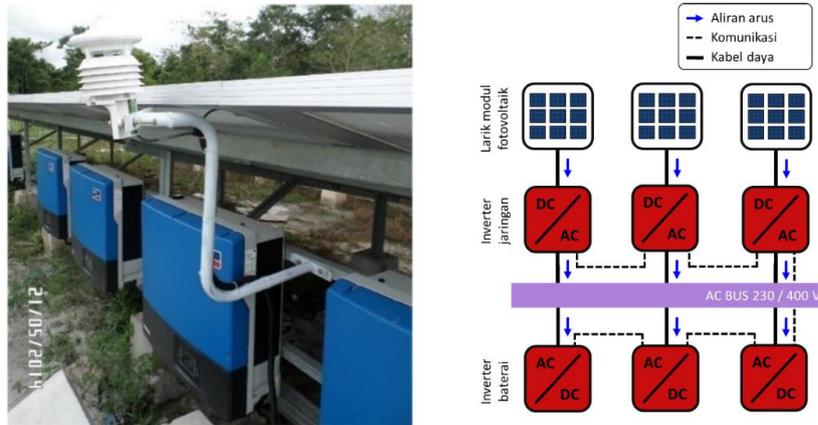
Gambar 2 Modul PV pada umumnya (Ramadhani, 2018)

## 2. Inverter Jaringan (*Grid Inverter*)

Inverter merupakan komponen elektronika daya yang merupakan bagian dari sistem PV dan berfungsi mengonversikan listrik arus searah (DC) yang dihasilkan oleh modul surya menjadi listrik arus bolak-balik (AC). Inverter jaringan atau dikenal juga sebagai inverter PV atau *grid inverter* adalah komponen elektronik daya yang mengonversi tegangan DC dari larik modul fotovoltaik menjadi tegangan AC baik untuk pemakaian langsung atau untuk menyimpan kelebihan daya ke dalam baterai (Ramadhani, 2018).

Serupa dengan *solar charge controller* (SCC), perangkat ini juga dilengkapi dengan MPPT (*maximum power point tracker*) untuk mengoptimalkan daya yang ditangkap dari larik modul fotovoltaik. Karena inverter ini tidak dapat beroperasi tanpa tegangan dan frekuensi jaringan, inverter baterai harus tetap dalam kondisi operasional dan menjaga bank baterai tetap *pada state of charge* baterai yang ditetapkan. Pada kasus khusus dimana tersedia tegangan jaringan, inverter akan melakukan sinkronisasi dengan tegangan dan frekuensi jaringan agar dapat

bergabung dengan jaringan tersebut dan mengirimkan daya yang telah dikonversi ke jaringan AC (Ramadhani, 2018). Tampilan dan skema pemasangan inverter jaringan dapat dilihat pada Gambar 3 berikut:

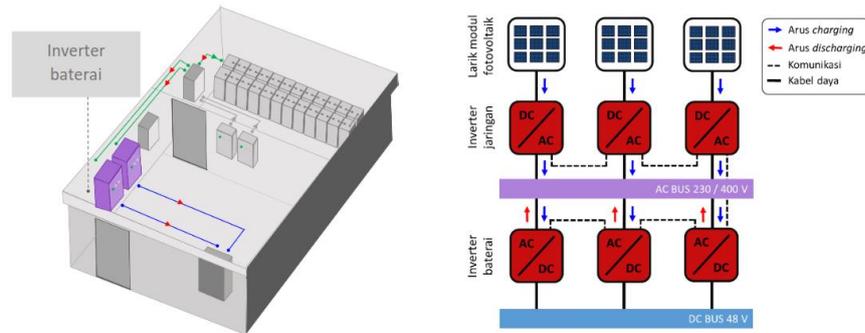


Gambar 3 Pemasangan dan skema inverter jaringan (Ramadhani, 2018)

### 3. Inverter Baterai (*Battery Inverter*)

Inverter baterai atau juga dikenal sebagai inverter yang berdiri sendiri (*standalone*) adalah otak dari sistem PV *standalone* berbasis komunal. Inverter baterai bertugas untuk membentuk jaringan distribusi AC dengan mengatur tegangan dan frekuensi dalam batas yang diizinkan dan menjaga keseimbangan energi di dalam jaringan. Inverter baterai biasanya dapat digunakan secara dua arah (*bidirectional*) atau satu arah (*unidirectional*) tergantung pada konfigurasi dari sistem (Ramadhani, 2018).

Dalam sistem penyambungan *AC-coupling*, inverter baterai berfungsi sebagai inverter (pengubah tegangan DC-AC) serta *charger* (pengubah tegangan AC-DC). Jika terdapat kelebihan energi dari modul fotovoltaik dan baterai tidak terisi penuh, inverter baterai bertindak sebagai charger. Dan jika terdapat kekurangan energi dan baterai masih memiliki energi yang tersisa, baterai akan mengeluarkan daya untuk memenuhi permintaan melalui inverter (Ramadhani, 2018). Pemasangan dan inverter baterai dalam rumah Pembangkit dapat dilihat pada Gambar 4 berikut:

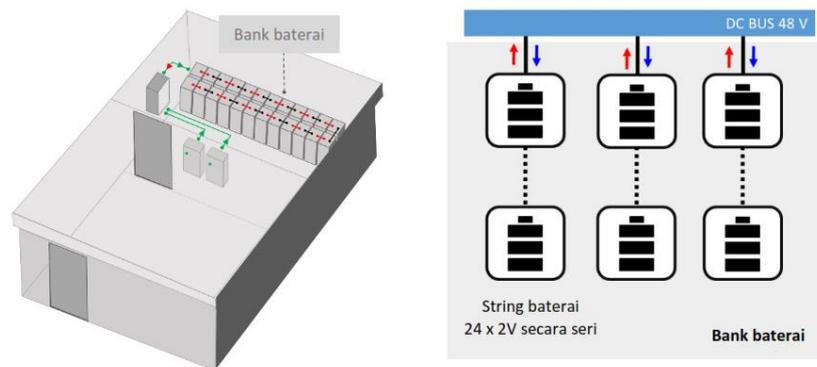


Gambar 4 Pemasangan dan inverter baterai dalam rumah pembangkit (Ramadhani, 2018)

Beberapa inverter baterai dapat ditingkatkan dayanya atau diinterkoneksi secara modular untuk mencapai keluaran (*output*) yang lebih besar. Inverter baterai dapat dikonfigurasi secara paralel sebagai kluster tunggal (*single-cluster*) dalam konfigurasi satu fasa atau tiga fasa serta beberapa kluster (*multi-cluster*) dengan panel distribusi tambahan. Dalam konfigurasi *multi-cluster*, jika satu kluster tambahan bermasalah, yang lainnya masih dapat beroperasi (Ramadhani, 2018).

#### 4. Baterai

Baterai digunakan dalam sistem PV *standalone* untuk menyimpan energi yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik di siang hari, lalu memasok ke beban di malam hari atau saat cuaca berawan. Baterai bertindak sebagai penyimpan energi sementara (*buffer*) untuk mengatasi perbedaan antara pasokan listrik dari modul fotovoltaik dan permintaan listrik. Saat ini, baterai merupakan cara paling praktis untuk menyimpan tenaga listrik yang dihasilkan oleh rangkaian modul fotovoltaik melalui reaksi elektrokimia. Komponen ini merupakan salah satu komponen yang penting dan sekaligus rentan dalam sistem PV *standalone*. Desain yang kurang baik atau ukuran baterai yang tidak tepat dapat mengurangi umur pakai yang diharapkan, berkurangnya energi, kerusakan, hingga bahaya keselamatan pada pengguna. Baterai memiliki keterbatasan umur pakai yang bergantung pada perilaku penggunaan serta temperatur pengoperasian (Ramadhani, 2018). Contoh ilustrasi pemasangan baterai dalam rumah pembangkit dapat dilihat pada Gambar 5.



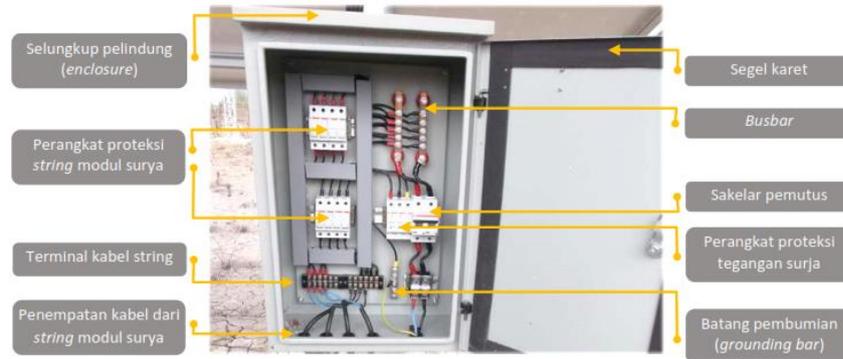
Gambar 5 Pemasangan dan skema baterai dalam rumah pembangkit (Ramadhani, 2018)

Terdapat banyak teknologi baterai yang tersedia untuk sistem PV *standalone* seperti *lead-acid*, lithium ion, zinc air, nickel cadmium, dll. Namun, mempertimbangkan kematangan teknologi, kinerja, serta keamanannya, hanya sedikit jenis baterai yang digunakan di daerah terpencil. Baterai *lead-acid* paling umum digunakan pada sistem PV *standalone*, meskipun terdapat alternatif baterai penyimpan yang lebih baru seperti Lithium ion dan Zinc air yang sudah mulai dipertimbangkan dengan umur pakai yang lebih panjang. Baik baterai lithium ion maupun zinc air memerlukan sistem pengelolaan baterai (*battery management system*) untuk keamanannya dan memperpanjang umur pakai baterai. Dikarenakan densitas energi baterai lithium yang lebih tinggi (Wh/kg) dibanding *lead acid*, terkadang penggunaannya lebih menguntungkan untuk dipakai di daerah terpencil (Ramadhani, 2018).

## 5. Combiner Box

*Combiner box* atau yang biasa disebut kotak penggabung merupakan komponen dalam sistem PV yang berfungsi tempat penggabungan kumpulan *string* modul surya yang dihubungkan pada *busbar* yang sama sehingga mendapatkan arus yang lebih tinggi. Umumnya di dalam *combiner box* terdapat perangkat proteksi arus lebih (*overcurrent protection*) string, perangkat proteksi tegangan surja (*surge protection device*), *busbar* atau terminal tambahan, pemutus arus, dan *grounding bar*. Terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan dalam merancang *combiner box* seperti memisahkan konduktor positif dan negatif yang terbuka untuk mencegah *short circuit*, serta memastikan semua sambungan kabel dikencangkan dengan aman. Luaran gabungan dari kotak penggabung tersebut kemudian

dihubungkan langsung ke solar charge controller pada sistem DC-coupling atau ke inverter jaringan pada sistem AC-coupling (Ramadhani, 2018). Tampilan contoh kotak penggabung untuk sistem fotovoltaik dapat dilihat pada Gambar 6 berikut:



Gambar 6 Kotak penggabung untuk sistem fotovoltaik (Ramadhani, 2018)

## 6. Kabel

Kabel berfungsi menghantarkan arus listrik baik dalam sistem AC maupun DC. Perlu diketahui bahwa kabel untuk menghantarkan daya AC dan DC tidak bisa disamakan karena karakteristiknya yang berbeda. Kabel yang digunakan dari modul surya hingga ke inverter harus menggunakan kabel DC, sementara kabel setelah inverter menggunakan kabel AC. Ukuran kabel keluaran dari combiner box DC harus lebih besar daripada kabel dari modul surya karena kabel tersebut menghantarkan arus yang lebih besar. Hal yang sama juga perlu dilakukan pada kabel AC yang digunakan setelah *combiner box* AC yang berukuran harus lebih besar dari pada kabel yang keluar dari inverter.

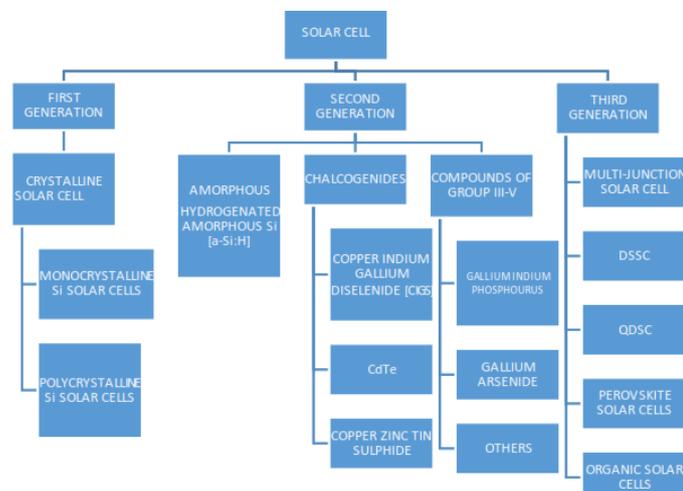
Kapasitas dan jenis kabel dapat ditentukan berdasarkan besar arus yang akan dialirkan dan kemampuan hantar arus kabel yang telah distandarisasi. Pada umumnya, pemilihan dan instalasi kabel di Indonesia mengikuti standar Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL). Selain itu, PUIL juga mengatur terkait penggunaan warna isolasi kabel. Persyaratan warna isolasi kabel berlaku untuk semua instalasi, termasuk instalasi dalam perlengkapan listrik. Klasifikasi warna kabel AC dapat dilihat pada Gambar 7 berikut:

Standar	Fasa / Phasa	Netral	Grounding
PUIL 2011	L1, L2, L3		

Gambar 7 Klasifikasi warna kabel AC (Gumintang dkk., 2020)

## 2.4 Jenis-Jenis Teknologi Modul Surya

Modul PV dapat diklasifikasikan dalam berbagai kategori berdasarkan pada berbagai jenis bahan yang digunakan untuk sel surya. Pembagian jenis teknologi modul PV dapat dibagi menjadi tiga generasi, yaitu generasi pertama (crystalline silicone), generasi kedua (thin film), dan generasi ke tiga yang merupakan jenis yang lebih baru. Pada generasi pertama, silikon utamanya digunakan untuk pembuatan sel surya mono-crystalline dan sel surya poly-crystalline. Teknologi sel surya generasi kedua atau film tipis menggunakan bahan seperti Si amorf (a-Si-), kadmium sulfida (CdS), Cadmium Telluride (CdTe), Copper Indium Gallium Di-Selenide (CIGS) dll. Teknologi sel surya generasi ketiga menggunakan konsep lebih canggih untuk memanen jumlah maksimum energi matahari pada sel surya dan menggunakan konversi foton surya lebih efisien. Kategori ini mencakup sel surya Quantum Dot, sel surya Dye sensitized, sel surya Tandem, dan lain-lain (Dambhare dkk., 2021). Skema pembagian jenis-jenis modul PV dapat dilihat pada Gambar 8 berikut:



Gambar 8 Skema pembagian jenis-jenis modul PV (Dambhare dkk., 2021)

## 1. Crystalline silicon (c-Si) (*first generation*)

Crystalline Silicon (c-Si): Modul dibuat dari sel silikon mono-kristal atau multi-kristal. Sel mono-c-Si umumnya yang paling efisien, tetapi juga lebih mahal daripada multi-c-Si. Modul C-Si terdiri dari sel PV yang dihubungkan bersama dan dikemas antara bagian depan transparan (biasanya kaca) dan bahan pendukung (biasanya plastik atau kaca). Wafer Mono-c-Si diiris dari *ingot* kristal tunggal besar dalam proses yang relatif mahal. Wafer multi-c-Si yang lebih murah dapat dibuat dengan berbagai teknik. Salah satu teknologinya melibatkan pengecoran multi-silikon cair yang dikontrol dengan hati-hati, yang kemudian diiris menjadi wafer. Ini bisa jauh lebih besar dari wafer mono-crystalline. Sel multi-kristal yang diproduksi dengan cara ini saat ini lebih murah, tetapi produk akhirnya umumnya tidak seefisien teknologi mono-kristal. Harga modul mono-crystalline dan multi-crystalline telah menurun drastis dalam dua tahun terakhir.

### a. Mono-crystalline silicon (mono c-Si)

Jenis modul mono c-Si saat ini yang banyak digunakan dan akan terus menjadi pemimpin pasar PV. Saat ini, modul-modul ini tampaknya sudah tersedia dan manfaat yang ada sangat banyak. Satu-satunya faktor pendorong utama adalah biaya rendah. Sel-sel yang digunakan dalam pembuatan modul c-Si terdiri dari wafer *p-doped* dengan persimpangan p-n. Pada awalnya, dalam proses fabrikasi, ingot c-Si diproduksi. Ingot c-Si ini kemudian diubah ukurannya menjadi wafer dengan ukuran kurang dari 0,3 mm. Ini membentuk keseluruhan struktur sel surya, yang kemudian mampu menghasilkan arus sekitar 35mA, 0,55V di bawah kondisi penerangan penuh. Modul ini umumnya memiliki permukaan bertekstur khusus yang paling sering terlihat seperti struktur piramida. Tergantung pada tegangan dan arus yang dibutuhkan, sel surya tersebut dikelompokkan bersama untuk membentuk modul PV. Saat membuat modul, sel-sel ini disusun dalam konfigurasi seri dan paralel dengan kontak konduktif (Kumar dkk., 2020). Tampilan modul PV mono-crystalline dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Tampilan modul PV mono-crystalline (RENAC dkk., 2020)

b. Poly-crystalline silicon (poly c-Si)

Jenis modul PV poly c-Si pasarnya sedikit lebih rendah jika dibandingkan dengan mono c-Si. Masalah kontaminasi logam ada pada mono c-Si dan untuk membatasi masalah tersebut, industri telah menghasilkan sel poly c-Si. Seperti mono c-Si, di sini juga modul dibuat dengan menyusun sel-sel dalam konfigurasi seri dan paralel. Sel-sel diproduksi sedemikian rupa sehingga mereka memiliki struktur kristal yang berbeda. Peleburan dan pemadatan silikon terjadi. Dalam proses ini, kristal yang berorientasi hanya pada satu arah dihasilkan, dan kemudian dibuat menjadi balok-balok tipis dan kemudian menjadi wafer. Sel surya ini memiliki struktur acak pada permukaannya, dan dilengkapi dengan lapisan tambahan yang meminimalkan pantulan cahaya (Kumar dkk., 2020). Tampilan modul PV poly-crystalline dapat dilihat pada Gambar 10.

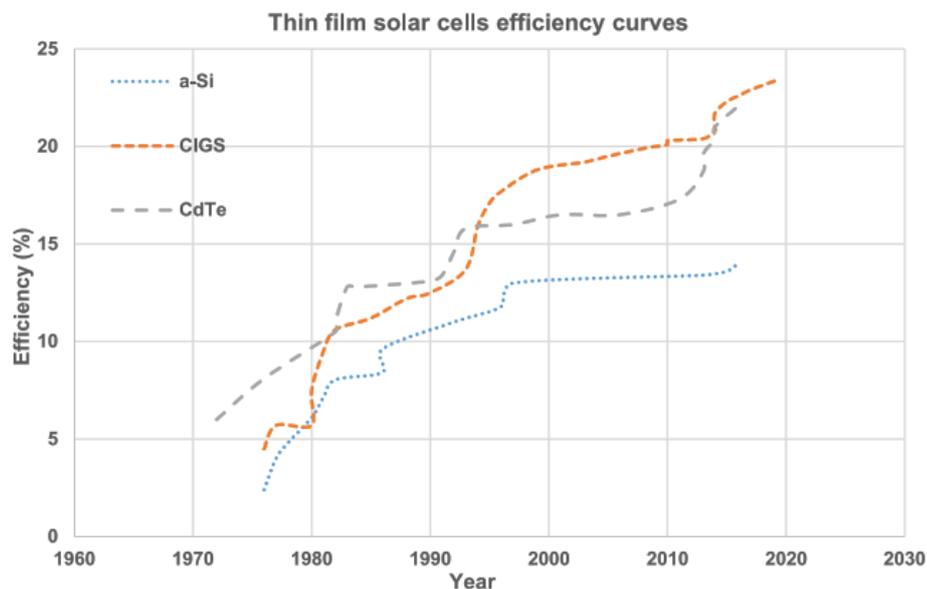


Gambar 10 Tampilan modul PV poly-crystalline (RENAC dkk., 2020)

## 2. Thin film (*second generation*)

*Thin-film solar cell* (TFSC) adalah teknologi generasi kedua. Film tipis ini dibuat dengan menempelkan satu atau beberapa lapisan elemen fotovoltaik tipis pada substrat kaca, plastik, atau logam. Ketebalan film berkisar dari beberapa nanometer hingga puluhan mikrometer, yang terlihat lebih tipis dari sel surya c-Si generasi pertama tradisional (wafer dengan ketebalan sekitar 200  $\mu\text{m}$ ). Karena lebih tipis dan berbobot lebih ringan, sel surya film tipis memiliki ketahanan abrasi yang lebih terbatas dibandingkan sel surya c-Si tradisional (Efaz dkk., 2021).

Saat ini, modul teknologi film tipis tertinggal dari modul silikon kristal baik dalam hal efisiensi maupun biaya, dan memiliki masa pakai yang lebih singkat. Keuntungan dari modul film tipis adalah penurunan efisiensi yang lebih kecil dengan suhu, yang menguntungkan untuk daerah dengan intensitas radiasi matahari yang tinggi. Teknologi film tipis juga dapat digunakan dalam membangun aplikasi PV terintegrasi dan CIGS dapat memiliki banyak aplikasi sebagai modul PV yang fleksibel. Bahkan efisiensi modul CdTe dan CIGS meningkat dari 10-13% menjadi 14-16%. Proporsi modul film tipis sebagai bagian dari total produksi menurun; saat ini sekitar 5% dari total produksi, dengan penurunan terbesar ditemukan pada produksi modul silikon amorf (Benda & Černá, 2020). Perkembangan efisiensi modul PV jenis *thin film* dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11 Perkembangan Efisiensi Modul Surya Thin Film (Benda & Černá, 2020)

Teknologi sel surya lapisan film tipis yang umum ada di pasaran saat ini diantaranya amorphous, CdTe, dan CIGS (RENAC dkk., 2020).

a. Silikon amorf (a-Si)

Silikon amorf (*amorphous silicone*) adalah bentuk silikon non-kristal. Silikon amorf ini adalah lapisan film tipis yang pertama yang menghasilkan produk komersial dan digunakan dalam barang-barang konsumen seperti kalkulator. Silikon amorf dapat diterapkan/dideposisi dalam lapisan tipis ke berbagai permukaan dan menawarkan biaya yang lebih rendah dibandingkan dengan silikon kristal tradisional. Namun demikian, seperti teknologi lapisan film tipis lainnya, silikon amorf memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan silikon kristalin. Tampilan modul PV amorphous dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12 Tampilan contoh pemasangan modul PV amorphous (RENAC dkk., 2020)

b. Cadmium Telluride (CdTe)

CdTe adalah senyawa semikonduktor yang terbentuk dari kadmium dan telurium. Sel CdTe diterapkan/dideposisi langsung ke kaca. Modul-modul ini adalah jenis modul surya lapisan film tipis yang paling umum di pasaran dan paling hemat biaya untuk diproduksi saat ini. Modul CdTe berkinerja lebih baik secara signifikan pada suhu tinggi dan dalam kondisi kurang cahaya dibandingkan dengan modul berbasis kristal karena sifat fisiknya. Namun demikian, efisiensinya secara keseluruhan jauh lebih rendah. Tampilan modul PV CdTe dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13 Tampilan contoh pemasangan modul PV CdTe (RENAC dkk., 2020)

c. Copper Indium Gallium Sulfur Selenide (CIGS)

CIGS adalah senyawa semikonduktor yang dapat diterapkan/ dideposisi ke banyak bahan berbeda. CIGS baru-baru ini saja tersedia untuk aplikasi komersial kecil. CIGS dianggap sebagai pengembangan teknologi sel surya dengan potensi yang tinggi karena efisiensi tinggi yang didapat di laboratorium. Tampilan modul PV CIGS dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14 Tampilan contoh pemasangan modul PV CIGS (Brusdeylins, 2021)

Masing-masing jenis modul PV baik jenis crystalline silicone dan thin film memiliki berbagai kelebihan dan kekurangan. Adapun perbandingan kelebihan dan kekurangan tiap jenis teknologi modul PV dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut:

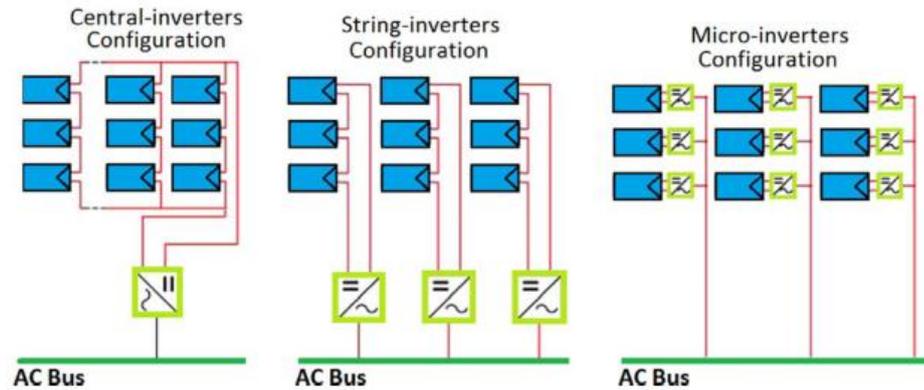
Tabel 1 Perbandingan karakteristik tiap jenis modul PV

Jenis Modul PV	Karakteristik			
	Efisiensi	Performa pada suhu tinggi	Suhu optimal	Biaya
Mono-crystalline	14-17,5%	Drop 10-15%	Berkinerja baik pada cuaca dingin, tetapi buruk pada kondisi panas ekstrem	Jenis crystalline silicon yang paling mahal
Poly-crystalline	13-15%	Drop 20%	Berkinerja baik pada cuaca dingin, tetapi buruk pada kondisi panas ekstrem	Jenis crystalline silicon yang paling murah
CdTe	9-11%	0% drop	Bekerja baik pada cuaca panas, bahkan pada kondisi panas ekstrem	Lebih murah dari crystalline silicon. Jenis thin film yang memiliki biaya paling efektif.
CIGS	10-12%	0% drop	Bekerja baik pada cuaca panas, bahkan pada kondisi panas ekstrem	Lebih murah dari jenis crystalline silicon
Amorphous	5-7%	0% drop	Bekerja baik pada cuaca panas, bahkan pada kondisi panas ekstrem	Lebih murah dari jenis crystalline silicon

Sumber: (Hussin dkk., 2018)

## 2.5 Jenis-Jenis Teknologi Inverter PV

Topologi *array* PV yang berbeda sangat memengaruhi produksi energi. Jenis koneksi di mana panel PV terhubung satu sama lain dan ke sistem inverter merupakan faktor penentu dalam hal konversi energi matahari, rugi-rugi bayangan dan rugi-rugi *mismatch* (ketidaksesuaian). Terdapat tiga jenis inverter PV yang paling banyak digunakan dapat dikategorikan sebagai berikut: inverter terpusat, inverter string, dan inverter mikro (Yilmaz & Dincer, 2017). Konfigurasi tiga jenis inverter PV dapat dilihat pada Gambar 15 berikut:



Gambar 15 Perbedaan konfigurasi central, string dan mikro inverter (Yilmaz & Dincer, 2017)

Sistem PV berkapasitas besar pada umumnya menggunakan inverter PV terpusat, sementara pembangkit listrik yang lebih kecil beroperasi lebih baik dengan inverter PV tersebar (*string*) karena fleksibilitas dan keandalannya. Namun, tidak ada pendekatan yang paling tepat dalam penentuan desain sistem terpusat atau tersebar karena banyaknya faktor kondisi dan lokasi yang perlu dipertimbangkan (Gumintang dkk., 2020).

### 1. Central Inverter

Beberapa panel PV dihubungkan secara seri untuk membuat rangkaian dalam sistem terpusat. String ini kemudian dihubungkan secara paralel untuk membentuk sistem inverter tunggal. Fitur yang paling menonjol dari jenis koneksi ini adalah biaya rendah dan kesederhanaannya. Namun, kenyataan bahwa sistem harus beroperasi dengan satu MPPT untuk semua array menghasilkan produksi yang lebih rendah, yang menyebabkan perubahan faktor seperti kondisi iradiasi, suhu, dan kondisi *shading*, sehingga menurunkan kinerja sistem (Yilmaz & Dincer, 2017). Inverter sentral beroperasi dalam kisaran 100 kW hingga 6 MW dengan topologi tiga fase dan desain modular untuk pembangkit listrik yang lebih besar (Silva dkk., 2020)

Saat menggunakan central inverter, rangkaian panel surya digabungkan secara paralel dengan bantuan kotak sambungan sebelum dihubungkan ke inverter pusat. Struktur inverter sentral cocok untuk *solar farm* dengan karakteristik desain rangkaian panel surya yang sama karena hanya memiliki 1 hingga 2 pelacak MPPT.

Penggunaan inverter sentral akan memudahkan pemantauan sistem kontrol dengan meminimalkan jumlah inverter dan panel kontrol. Namun, kinerja seluruh pembangkit listrik tenaga surya dapat sangat berkurang karena menghubungkan sejumlah besar rangkaian modul surya ke inverter pusat, sehingga jika ada kesalahan yang terjadi pada salah satu rangkaian modul surya akan menyebabkan berhentinya pengoperasian sisa modul surya. Di sisi lain, inverter central karena berat dan panas yang dihasilkan mungkin memerlukan pondasi beton tambahan untuk menempatkan inverter dan perangkat pendingin untuk mengurangi jumlah panas sekitar yang mempengaruhi pengoperasian inverter. Penggunaan inverter sentral dianggap memiliki biaya investasi yang lebih rendah daripada inverter string (Phap & Hang, 2019).

## 2. String Inverter

Sistem dengan inverter string tidak terhubung secara paralel. Setiap string terhubung ke inverternya sendiri, yang berarti masing-masing memiliki MPPT sendiri. Dalam konfigurasi ini, string tidak terpengaruh oleh ketidaksesuaian atau kehilangan bayangan yang mungkin dialami oleh string lain. Konfigurasi ini memungkinkan untuk menggunakan jumlah modul yang berbeda serta jenis modul yang berbeda. Selain itu, jika terjadi masalah pada inverter, konfigurasi ini akan terus beroperasi. Namun, penggunaan beberapa inverter menyebabkan biaya pemasangan yang lebih tinggi (Yilmaz & Dincer, 2017). Inverter string—biasanya beroperasi antara kisaran 0,4 dan 2 kW untuk rangkaian tunggal modul PV, sesuai dengan pembangkit listrik PV atap kecil. Jenis inverter ini mulai digunakan baru-baru ini di solar farm skala utilitas juga, dengan kapasitas di kisaran ratusan kW (Silva dkk., 2020).

Penggunaan string inverter dapat menekan biaya pemasangan karena plan ini tidak membutuhkan alat angkut yang besar seperti *crane* dan pekerja yang terlalu banyak. Namun, tingkat biaya investasi dalam kasus penggunaan total kapasitas string inverter mungkin sedikit lebih tinggi daripada penggunaan inverter pusat dengan kapasitas yang sama. Di sisi lain, dibutuhkan lebih banyak ruang untuk memasang string inverter di proyek tenaga surya serta lebih banyak waktu yang diperlukan untuk pekerjaan pemeliharaan rutin seluruh string inverter di

pembangkit listrik tenaga surya. Pemeliharaan string inverter cukup mudah karena jika string inverter gagal maka akan diganti dengan yang baru dan pekerjaan penggantian akan dilakukan di lokasi pembangkit listrik tenaga surya (Phap & Hang, 2019).

### 3. Mikro Inverter

Pada mikro inverter, modul PV terintegrasi langsung ke inverter dalam sistem dengan inverter mikro, yang meminimalkan kerugian ketidakcocokan (*mismatch*). Setiap inverter mikro terhubung ke panel fotovoltaik secara mandiri. Kerugian inverter mikro lebih tinggi daripada kerugian jenis inverter lainnya. Namun, susut pembangkit PV lebih sedikit karena pembangkit PV lainnya memiliki inverter string dan inverter sentral. Misalnya, kerugian naungan lebih kecil menurut yang lain untuk bertindak sebagai inverter mikro yang independen. Juga, ketika inverter mikro digunakan dan dalam kondisi rusak, hanya satu panel fotovoltaik yang tidak berfungsi. Sementara, ketika inverter jenis lain digunakan dan dalam kondisi rusak, puluhan atau bahkan ratusan panel fotovoltaik tidak berfungsi. Inverter jenis ini lebih dipilih untuk sistem berdaya rendah karena pemeliharaan dan pemasangannya yang rumit (Yilmaz & Dincer, 2017).

Perbandingan karakteristik inverter central dan inverter string dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2 Perbandingan karakteristik inverter central dan inverter string

Jenis Teknologi Inverter	Karakteristik				
	Kapasitas	Jumlah MPPT	Biaya	Performa	
Inverter Central	100 kW – 6 MW	Hanya memiliki satu MPPT	Lebih murah	Lebih baik pada instalasi di lahan datar	Rugi-rugi energi lebih tinggi karena hanya bekerja dengan satu MPPT.
Inverter String	$\leq 100$ kW	Memiliki banyak MPPT untuk setiap inverter	Lebih mahal	Lebih baik pada instalasi di lahan berbukit	Rugi-rugi energi lebih rendah karena memiliki banyak MPPT.

Sumber: (Phap & Hang, 2019; Silva dkk., 2020; Yilmaz & Dincer, 2017)

## 2.6 Instalasi Modul PV Sistem Ground Mounted

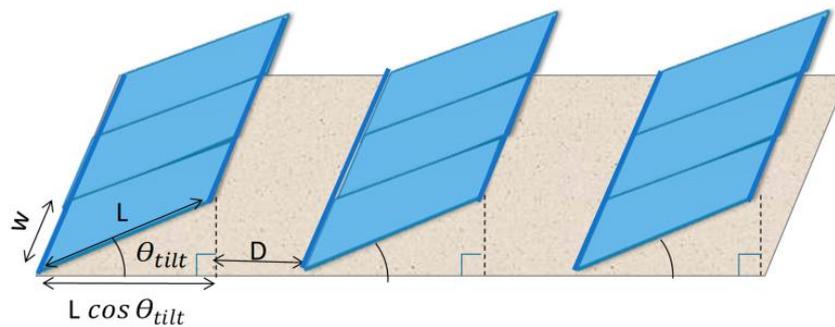
Sistem mounting atau penyangga merupakan komponen yang menyangga modul surya sesuai dengan posisi dan kemiringan yang telah ditentukan. Komponen mounting biasanya terbuat dari besi *galvanized* untuk melindungi dari karat dengan prediksi ketahanan 20-25 tahun (KESDM, 2020). Terdapat beberapa jenis sistem mounting modul surya diantaranya sistem *ground-mounted*, *pole-mounted* dan *roof mounted* (Gumintang dkk., 2020).

*Ground-mounted* merupakan sebuah rangka yang dipasang tepat ke tanah. Ketika banyak luas lahan yang tersedia dan pepohonan tidak menjadi masalah, pemasangan *ground-mounted* adalah cara yang ekonomis. Salah satu kelebihan menggunakan *ground-mounted* adalah bahwa panel mudah diakses untuk pemeliharaan dan pembersihan (Gumintang dkk., 2020). Contoh instalasi PV *ground mounted* dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16 Contoh instalasi PV ground mounted (KESDM, 2020)

Luas area sistem PV yang dibutuhkan pada sistem mounted dipengaruhi oleh berbagai faktor, yaitu dimensi modul, sudut kemiringan, dan lokasi di Bumi. Lokasi area mempengaruhi panjang naungan dan jarak antar baris yang sesuai. Untuk meminimalkan area yang diperlukan untuk pemasangan sistem, jarak antar baris yang optimal perlu diperkirakan, dengan mempertimbangkan memaksimalkan hasil energi dengan memilih sudut kemiringan optimal dari lokasi sistem. Area yang diperkirakan optimal saat bayangan benar-benar dihindari; Oleh karena itu, area tersebut dimanfaatkan dengan baik. Gambar 17 mengilustrasikan faktor-faktor penting yang digunakan untuk memperkirakan luas, dengan asumsi dimensi modul berupa panjang ( $L$ ) dan lebar ( $W$ ), sudut kemiringan ( $\theta_{tilt}$ ), dari panel PV dan jarak antar baris ( $D$ ).



Gambar 17 Faktor-faktor penting dalam memperkirakan kebutuhan luas area sistem mounting modul PV (Al-Quraan dkk., 2022)

Array modul PV disusun dalam susunan baris dengan variasi sudut kemiringan, oleh karena itu perlu menentukan jarak antar baris optimal di setiap variasi sudut kemiringan. Hal ini untuk menghindari paparan bayangan modul PV terhadap modul PV di belakangnya. Berbagai parameter diperlukan untuk mengidentifikasi jarak antara dua baris. Parameter pertama adalah dari dimensi modul dan apakah modul diimplementasikan secara individual atau dipasang dalam dua modul. Ini bergantung pada keputusan perancang sistem untuk mengakomodasi sejumlah panel. Parameter selanjutnya adalah sudut elevasi dan sudut azimuth matahari minimum yang dapat dilihat pada diagram *sunpath*. Dimensi atau panjang susunan modul vertikal ( $L$ ) dan sudut kemiringan yang dipilih oleh perancang digunakan untuk menentukan tinggi modul ( $\Delta H$ ) sebagai mana persamaan (1) (Al-Quraan dkk., 2022).

$$\Delta H = L \sin \theta_{tilt} \quad (1)$$

dimana,

$\Delta H$  = tinggi terminal modul,

$L$  = panjang panel PV, dan

$\theta_{tilt}$  = sudut kemiringan modul

Setelah menentukan tinggi modul dan sudut elevasi matahari, maka panjang bayangan dapat ditentukan. Semakin kecil sudut elevasi, semakin besar bayangan objek. Dalam kasus pemasangan sistem PV, sudut ini dianggap untuk menghindari

bayangan array PV ke array di belakangnya. Panjang bayangan dapat ditentukan menggunakan persamaan (2) (Al-Quraan dkk., 2022).

$$X = \frac{\Delta H}{\tan \theta_{elev}} \quad (2)$$

dimana,

$X$  = panjang bayangan

$\theta_{elev}$  = sudut elevasi matahari

Panjang bayangan yang muncul dengan panjang  $X$  ini belum dapat dianggap sebagai nilai jarak karena dimiringkan pada suatu sudut bergantung posisi matahari pada sudut azimuth. Jarak antar baris minim, yang dilambangkan dengan  $D$ , dapat diperkirakan dengan menggunakan nilai- $X$  dan sudut azimuth. Setelah sudut ini diperkirakan, jarak antar baris dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3) (Al-Quraan dkk., 2022):

$$D = X \cos \theta_{az} \quad (3)$$

dimana,

$D$  = jarak antar baris minimum

$\theta_{az}$  = sudut azimuth matahari.

Radiasi matahari secara langsung mempengaruhi energi yang dihasilkan oleh panel surya. Oleh karena itu, penentuan sudut kemiringan dan orientasi panel surya menjadi kunci karena berpengaruh pada sejauh mana radiasi matahari bisa diserap. Terdapat dua jenis sudut yang relevan: sudut kemiringan yang mengacu pada posisi panel terhadap bidang horizontal, dan orientasi atau sudut azimuth. Untuk optimalisasi penyerapan radiasi, penting agar sudut kemiringan dan orientasi panel sejajar dengan arah sinar matahari. Meski pelacakan sinar matahari sulit dalam skala besar, panel surya dengan jenis array tetap sering digunakan. Dalam kasus ini, penyesuaian sudut kemiringan dan orientasi sangat penting untuk meraih penyerapan radiasi tertinggi sepanjang tahun yang cocok dengan jenis panel surya tersebut. Pengaruh sudut kemiringan terhadap radiasi total yang diterima panel surya dapat digambarkan menggunakan persamaan (4) berikut (Suharta, 2021):

$$I = Rb (H - Hd) + \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)Hd + \frac{1}{2}(1 - \cos\beta)H\rho \quad (4)$$

dengan:

$I$  = rata-rata radiasi yang diterima pada sudut miring

$H$  = rata-rata radiasi global bidang horizontal

$Hd$  = Rata-rata radiasi tersebar pada bidang horizontal

$Rb$  = Rasio radiasi *beam*

$\beta$  = Sudut Kemiringan panel surya terhadap bidang horizontal

$\rho$  = Reflektansi tanah/albedo

Memposisikan panel surya pada sudut kemiringan optimal, dapat meningkatkan efisiensi hingga pada tingkat maksimal. Semakin tinggi nilai efisiensi sebuah panel, maka akan semakin baik performa dari panel tersebut. Posisi sudut kemiringan yang berada tidak pada posisi optimal berpotensi kehilangan nilai radiasi maksimal. Sudut kemiringan optimal ditentukan berdasarkan nilai radiasi yang mengenai permukaan bidang miring. Letak geografis suatu lokasi yang ditentukan oleh garis lintang (latitude) juga mempengaruhi jumlah radiasi yang diterima oleh permukaan panel. Dalam hal ini, posisi optimal untuk suatu lokasi dapat berbeda dengan lokasi lainnya (Pandria & Mukhlizar, 2017).

## 2.7 Perangkat Lunak PV\*SOL

Perkembangan pemanfaatan energi surya atau sistem photovoltaic (PV) menuntut pula perkembangan perangkat lunak yang digunakan dalam proses desain ataupun permodelan sistem. Seiring dengan kemajuan teknologi, perhitungan efisiensi, nilai produksi, dan periode pengembalian modal sistem PV menjadi mudah dengan menggunakan program simulasi (Tabak & Endiz, 2016). Penggunaan perangkat lunak simulasi dapat memudahkan penggunaannya untuk mendesain sistem PV baik dari segi teknis maupun finansial. Perangkat lunak simulasi sistem PV merupakan cara yang efektif untuk memodelkan sistem PV yang sebenarnya, untuk menentukan produksi energi baik secara instan maupun kumulatif selama masa gunanya (Karuniawan, 2021).

Perangkat lunak simulasi sistem PV yang sering digunakan diantaranya perangkat lunak PV\*SOL, PVSYST dan HelioScope. Secara umum fitur yang ditawarkan antara PV\*SOL dan PVSYST lebih lengkap dibanding dengan HelioScope. Sedangkan kelebihan PV\*SOL dibanding PVSYST adalah tampilan antarmuka yang lebih mudah digunakan dan dimengerti. PV\*SOL dan PVSYST cocok digunakan bagi perusahaan ataupun instansi untuk membuat laporan yang mencakup segi teknis maupun finansial secara praktis (Karuniawan, 2021). PV\*SOL adalah salah satu alat desain dan simulasi sistem PV terkemuka. Insinyur, perencana, arsitek, pemasang, dan teknisi di seluruh dunia menggunakan PV\*SOL untuk merancang dan membangun sistem PV yang efisien (Nkuriyngoma dkk., 2022). Adapun perbandingan fitur antara perangkat lunak PV\*SOL, PVSYST, HelioScope dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Perbandingan fitur dalam perangkat lunak PV\*SOL, PVSYST, HelioScope

Fitur	Jenis Perangkat Lunak Simulasi		
	PV*SOL	PVSYST	Helioscope
Basis	Windows	Windows	Web
Lingkup simulasi	PV dengan beban listrik, sistem standalone, baterai, kendaraan listrik, Jaringan/ <i>Grid</i>	<i>On grid</i> , <i>Standalone</i> , <i>Pumping</i>	<i>On grid</i>
Lisensi	<i>trial</i> /berbayar	<i>trial</i> /berbayar	<i>trial</i> /berbayar
3D <i>modelling</i>	ada	ada	sederhana
Import data Meteonorm	ya	ya	tidak
Skema finansial	kompleks	kompleks	sederhana
Antarmuka	sederhana	kompleks	sederhana

Sumber: (Karuniawan, 2021)

PV\*SOL adalah perangkat lunak Jerman yang dikembangkan oleh Valentine Software untuk program simulasi dinamis dengan visualisasi 3D dan analisis bayangan sistem fotovoltaik yang terperinci. Perancang, insinyur, konsultan, dan pemasang sistem PV dapat menggunakan perangkat lunak untuk merancang sistem PV secara profesional. PV\*SOL membuat prediksi akurat menjadi mudah, memberikan pelanggan pengembalian terbaik atas investasi mereka dengan memvisualisasikan sistem dan membuat laporan profesional. PV\*SOL berjalan di bawah Windows Vista, Windows 7, Windows 8 dan Windows 10 dengan Resolusi Monitor minimal 1024 x 768 piksel (Umar dkk., 2018).

PV\*SOL dapat melakukan simulasi sistem PV dengan sistem *on grid*, *standalone*, ataupun *standalone* dengan *backup*. PV\*SOL juga menawarkan simulasi *shading* atau *losses* yang diakibatkan adanya bayangan dari simulasi sistem PV yang dibangun menggunakan simulasi 3D sederhana. PV\*SOL juga dapat melakukan analisis finansial dengan berbagai skema, seperti ekspor-impor ataupun jual beli listrik dengan jaringan. Tampilan antarmuka dari PV\*SOL cukup sederhana sehingga mudah dimengerti dan digunakan oleh pengguna. PV\*SOL juga dapat menyajikan hasil simulasi dalam bentuk laporan dokumen sehingga cocok digunakan bagi pengguna sebagai laporan teknis lengkap dengan simulasi finansialnya (Karuniawan, 2021). Contoh tampilan desain 3D dalam program PV\*SOL dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18 Tampilan desain 3D dalam program PV\*SOL (Valentin Software GmbH, 2022)

Dengan PV\*SOL premium, standar industri untuk program desain fotovoltaik, pengguna dapat merancang dan menyimulasikan semua jenis sistem PV modern. PV\*SOL premium mendukung berbagai desain dan simulasi dari sistem atap kecil dengan beberapa modul hingga sistem berukuran sedang di atap komersial hingga taman surya besar. Baik menghitung konsumsi sendiri, merancang penyimpanan baterai, atau mengintegrasikan kendaraan listrik, PV\*SOL dapat menerapkan dan menyajikan semua keinginan pengguna dalam waktu singkat. PV\*SOL premium dapat digunakan secara gratis untuk percobaan selama 30 hari. (Valentin Software, t.t.).