

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Energi**

Energi dalam konteks sumber daya alam merujuk pada kemampuan untuk melakukan kerja yang dapat diekstraksi dari alam atau dihasilkan melalui proses alamiah. Sumber daya alam menyediakan berbagai bentuk energi yang dapat dimanfaatkan oleh manusia untuk berbagai keperluan, seperti pembangkit listrik, transportasi, dan industri. Energi primer dalam neraca energi menunjukkan jumlah energi yang tersedia di suatu wilayah. Pasokan energi primer mencakup banyaknya jumlah energi yang di produksi, diimpor, diekspor dan ketersediaan stok. Dari total pasokan energi primer yang ada di Indonesia pada tahun 2021 yaitu sebesar 472,4 *Million Tons of Oil Equivalent* (MTOE) dengan pasokan terbesar nya adalah batubara sebesar 78,2 MTOE (37,6%), diikuti dengan minyak sebesar 69,5 MTOE (33,4%) dan gas sebesar 35 MTOE (16,8%) dan untuk sisanya sebesar 25,3 MTOE (12,2%) yang dipenuhi oleh EBT terdiri dari energi air, panas bumi, surya, angin, dan bionergi (Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2024).

##### **2.1.1 Produksi Energi**

Produksi energi yang ada di Indonesia pada tahun 2021 yaitu sebesar 472,4 MTOE, sebagian besar (94,6%) yang berasal dari energi fosil yang mencakup seperti batubara, gas dan minyak. Sedangkan produksi energi baru terbarukan sekitar 5,4% yang berasal dari sumber-sumber energi lokal yang dikelola secara

nasional. Batubara menyumbang energi terbesar dalam salah satu produksi energi setara dengan 613,9 juta ton. Di sisi lain produksi minyak dan gas terus menunjukkan penurunan yang di akibatkan oleh sumur yang sudah tua. Tetapi pada tahun 2021 terdapat penambahan cadangan baru sebesar *696 Million Barrels of Oil Equivalent* (MBOE) dengan secara keseluruhan sehingga mendapat lonjakan mencapai 116% sebagaimana yang ditampilkan pada tabel 2.1 di bawah.

**Tabel 2.1 Peningkatan RRR (*Reserves Replacement Ratio* )**

(Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2024)

Tahun	Cadangan minyak (MMSTB)	Cadangan Gas&Asosiasi Gas (BSCF)	Produksi Minyak (MMSTB)	Produksi Gas (BSCF)	RRR	Target RRR
2016	7.251	144.060	303	3.070	64%	60%
2017	3.711	142.720	292	2.963	55%	60%
2018	3.157	135.550	282	2.997	106%	100%
2019	2.676	77.293	272	2.810	354%	100%
2020	4.169	62.390	259	2.443	102%	100%
2021	3.947	60.612	240	2.434	116%	100%

Cadangan minyak *Million Stock Tank Barrels* (MMSTB) dan cadangan gas & asosiasi gas *Billion Standard Cubic Feet* (BSCF) sedangkan dari produksi EBT menunjukkan peningkatan dibandingkan dengan sebelumnya, terutama dengan naiknya produksi dari PLTA dan PLTP tahun 2021 sebesar 372,6 GWh dan 336 GWh (Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2024).

### 2.1.2 Ekspor Energi

Produksi energi pada tahun 2021 sekitar 59,2% yang dipergunakan untuk keperluan ekspor seperti gas dan batubara masih menjadi andalan penerimaan

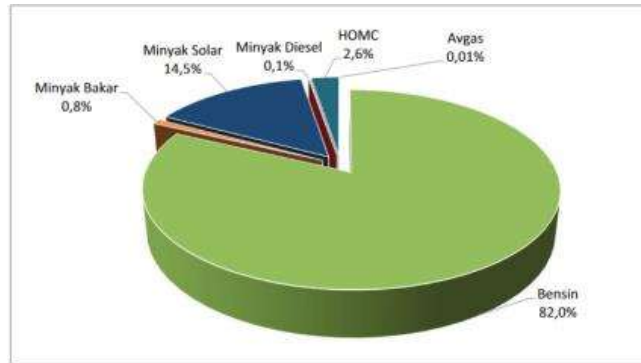
negara dalam ekspor energi, tercatat sebesar 70,9% (255,9% MTOE) ekspor batubara pada tahun 2021. Sedangkan ekspor untuk minyak mentah sebesar 6,1 MTOE atau 18,2% dari total produksi minyak mentah. Sementara untuk ekspor gas yang terdiri dari *Liquefied Natural Gas* (LNG) dan gas pipa sebesar 33,2% dari total produksi gas pada tahun 2021 yang sesuai dengan Kebijakan Energi Nasional yang mengamanatkan perubahan paradigma kebijakan pengelolaan energi dengan mengutamakan pemanfaatan energi serta untuk meningkatkan nilai tambah di dalam negeri. Pemerintah mulai mengalokasikan prioritas pemanfaatan gas untuk memenuhi dalam negeri. Demikian pula untuk batubara secara bertahap akan dialokasikan pemanfaatannya untuk pemenuhan dalam negeri terutama pada pembangkit listrik dan industri yang melalui pengembangan gasifikasi batubara untuk pengembangan sebagai substitusi *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) dan metanol yang dibutuhkan oleh sektor industri dan akan direncanakan pada tahun 2025 (Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2024).

### **2.1.3 Impor Energi**

Total dari impor energi yang ada di Indonesia pada tahun 2021 mencapai 48,5 MTOE atau hanya 23,3% dari total pasokan energi primer. Dari beberapa jenis energi yang masih diimpor yaitu batubara kalori tinggi, minyak mentah, BBM dan LPG. Indonesia masih sangat membutuhkan BBM dikarenakan konsumsi BBM di Indonesia semakin tahun semakin meningkat sejalan dengan meningkatnya jumlah kendaraan seperti sepeda motor. Impor BBM terdiri dari bensin yang mencapai 82,03% dari total BBM. Selain itu untuk impor minyak solar mencapai 14,47 dan sisanya 2,61% *Hydrocarbon Oil Medium Crude*

(HOMC) dan 0,89% terdiri dari avgas, minyak bakar dan minyak diesel.

Gambaran impor produk kilang terlihat pada Gambar 2.1 berikut.



**Gambar 2.1 Impor BBM Tahun 2021**

(Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2024)

Pada tahun 2021 impor minyak mentah yaitu sebesar 89,87 juta barel dan kondensat Indonesia sebesar 14,53 juta barel atau 28,5% dari total kebutuhan minyak mentah untuk kilang (Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2024).

## 2.2 Potensi Energi Baru Terbarukan di Indonesia

Berkurangnya produksi energi saat ini pada energi fosil terutama pada minyak bumi serta komitmen global dalam pengurangan emisi gas kaca, mendorong pemerintah untuk meningkatkan peran energi baru terbarukan yang berjalan secara terus menerus sebagai salah satu bagian dalam menjaga ketahanan dan kemandirian energi sesuai dengan PP No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target energi baru terbarukan pada tahun 2025 paling sedikit yaitu 23% dan 31% pada tahun 2050. Indonesia mempunyai potensi yang cukup besar untuk perkembangan energi baru terbarukan untuk mencapai target aturan energi primer tersebut, bisa dilihat pada tabel 2.2 di bawah.

**Tabel 2.2 Potensi Energi Baru Terbarukan.**

(Sugawara &amp; Nikaido, 2014)

JENIS ENERGI	POTENSI
Tenaga air	93,3 GW
Panas Bumi	28,5 GW
Bioenergi	PLT Bio :32,6 GW & BNN : 200 Ribu Bph
Surya	207,8 GWp
Angin	60,6 GW
Energi Laut	17,9 GW

Total potensi energi baru terbarukan ekuivalen 442 GW yang digunakan untuk pembangkit listrik, sedangkan BBN dan Biogas sebesar 200 ribu BPh yang digunakan untuk keperluan bahan bakar pada sektor transportasi, rumah tangga, komersial dan industri. Pemanfaatan EBT untuk pembangkit listrik tahun 2018 yaitu sebesar 8,8 GW atau 14% dari total kapasitas pembangkit listrik fosil atau non fosil yaitu sebesar 64,5 GW (Sugawara & Nikaido, 2014).

### 2.2.1 Potensi Energi Surya

Indonesia yaitu salah satu wilayah dengan kondisi sinar matahari yang terus bersinar sepanjang tahun di setiap berbagai wilayah. Menjadikan salah satu potensi besar bagi wilayah Indonesia untuk pengembangan PLTS. Pada tahun 2021 telah dilakukan pemutakhiran data energi surya yaitu sebesar 3.294,4 GW seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.3. Pemutakhiran tersebut berfokus pada

metode perhitungan potensi surya berdasarkan klasifikasi intensitas radiasi mulai dari 3,75 kWh/m<sup>2</sup>/hari dan disaring dengan peta tutupan lahan (pemukiman, tanah terbuka, dan savana) tidak termasuk *protected area*. Salah satu yang meningkatkan potensi energi surya yaitu karena perhitungan dimasukan juga potensi PLTS Terapung.

**Tabel 2.3 Sebaran Potensi Energi Surya per Provinsi**

(Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2024)

No	Provinsi	Potensi Surya (GW)
1	Bali	21,6
2	Banten	51,8
3	Bengkulu	13,9
4	DI Yogyakarta	30,3
5	DKI Jakarta	40,4
6	Gorontalo	6,5
7	Jambi	121,7
8	Jawa Barat	155,5
9	Jawa Tengah	185,9
10	Jawa Timur	176,4
11	Kalimantan Barat	91,6
12	Kalimantan Selatan	52,7
13	Kalimantan Tengah	149,5
14	Kalimantan Timur	100,8
15	Kalimantan Utara	35,5

No	Provinsi	Potensi Surya (GW)
16	Kepulauan Bangka Belitung	46,5
17	Kepulauan Riau	29,7
18	Lampung	121,5
19	Maluku	77,5
20	Maluku Utara	17,2
21	Nanggroe Aceh Darussalam	99,2
22	Nusa Tenggara Barat	23,4
23	Nusa Tenggara Timur	369,5
24	Papua	252,3
25	Papua Barat	65,8
26	Riau	290,4
27	Sulawesi Barat	19,8
28	Sulawesi Selatan	60,4
29	Sulawesi Tengah	39,3
30	Sulawesi Tenggara	85,0
31	Sulawesi Utara	12,0
32	Sumatera Barat	43,2
33	Sumatera Selatan	285,2
34	Sumatera Utara	122,4
TOTAL		3.294,4

Potensi energi yang ada di Indonesia secara umum bisa dikatakan cukup, sehingga dapat dijadikan salah satu pedoman dan referensi dalam menyusun

perencanaan pembangunan sumber energi PLTS untuk masa depan. Berdasarkan dari peta potensi wilayah yang mempunyai potensi terbesar yaitu Provinsi Nusa Tenggara Timur, Riau, Sumatera Selatan dan Papua, namun secara umum untuk potensi di setiap Provinsi sudah termasuk relatif tinggi. Untuk wilayah yang memiliki intensitas radiasi matahari paling tinggi yaitu berada pada wilayah timur Indonesia seperti Nusa Tenggara Timur. Dalam RUEN ( Rencana Umum Energi Nasional ), PLTS ditargetkan akan mencapai 14,2 GW tahun 2030 (Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2024).

### **2.2.2 Potensi Energi Surya di Wilayah Provinsi Jawa Barat**

Secara umum, wilayah provinsi jawa barat memiliki berbagai macam sumber energi, baik itu dari sumber energi tak terbarukan seperti minyak dan gas bumi, maupun sumber energi baru terbarukan seperti tenaga air, panas bumi, tenaga angin, tenaga surya dan biomassa. Secara astronomis wilayah jawa barat terletak di  $5^{\circ}50'$  -  $7^{\circ}50'$  LS. Dari kondisi tersebut wilayah provinsi jawa barat memiliki potensi paparan tenaga surya yang cukup besar dan lama penyinaran matahari harian yang cukup Panjang.

Berdasarkan dari hasil kajian paparan surya harian di wilayah provinsi jawa barat berkisar antara  $4,18 \text{ kWh/m}^2$  sampai  $5,00 \text{ kWh/m}^2$ , untuk potensi paparan surya tertinggi yaitu berada di wilayah kabupaten dan kota sukabumi, sementara untuk paparan surya terendah yaitu berada di wilayah sebagian besar priangan timur seperti kabupaten dan kota tasikmalaya, kabupaten ciamis dan kota banjar. Pada tabel 2.4 menunjukkan data potensi energi surya yang berada di wilayah provinsi jawa barat.



**Tabel 2.4 Data Potensi Energi Surya di Wilayah Provinsi Jawa Barat**

(Rizki Yandri, 2020)

No	Kabupaten/Kota	Paparan Surya Harian (kWh/m <sup>2</sup> .hari)	Potensi Tenaga Surya Rata-Rata (W/m <sup>2</sup> )
1.	Kabupaten Tasikmalaya	4,18	191,49
	Kabupaten Ciamis		
	Kota Banjar		
	Kota Tasikmalaya		
2.	Kabupaten Bogor	4,33	198,24
	Kota Bogor		
	Kota Depok		
3.	Kabupaten Bandung Barat	4,38	200,62
	Kabupaten Sumedang		
	Kabupaten Cianjur		
	Kabupaten Purwakarta		
	Kabupaten Bekasi		
	Kabupaten Karawang		
	Kabupaten Subang		
	Kota Bandung		
	Kota Cimahi		
Kota Bekasi			
4.	Kabupaten Bandung	4,46	203,96

	Kabupaten Garut		
5.	Kabupaten Cirebon	4,62	211,53
	Kabupaten Indramayu		
	Kabupaten Majalengka		
	Kabupaten Kuningan		
	Kota Cirebon		
6.	Kabupaten Sukabumi	5,00	228,78
	Kota Sukabumi		
<b>Rata-Rata</b>		<b>4,50</b>	<b>205,77</b>

Pemanfaatan energi surya di wilayah provinsi Jawa Barat masih sangat terbatas pada PLTS yang bersifat mandiri dengan kapasitas terpasang serta produksi energi rendah jika dilihat dari penyediaan PLTS di wilayah provinsi Jawa Barat (Rizki Yandri, 2020).

### 2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu pembangkit listrik yang menggunakan panel surya yang memanfaatkan energi sinar matahari dengan cara mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik. Dapat dilihat pada Gambar 2.2 Panel Surya



**Gambar 2.2 Panel Surya**

(Saugi, 2012)

Secara umum PLTS memiliki beberapa komponen utama yaitu seperti modul surya sebagai pembangkit listrik, inverter untuk mengkonversi sistem tegangan DC menjadi sistem tegangan AC, *charger controller* dan baterai sebagai tempat penyimpanan energi listrik (Plts et al., 2019).

Listrik tenaga surya ini dihasilkan melalui proses yang dinamakan *photovoltaic*, pada proses ini sinar matahari diserap oleh panel solar *cell* yang dapat memecahkan elektron supaya bergerak sehingga akan menghasilkan energi listrik.

Pvsyst menghitung daya pada PV dapat dihitung dengan pendekatan matematika. Aplikasi Pvsyst sebagai pengolahan data dan dikalkulasi menghitung keluaran PV menggunakan persamaan berikut 2.1 :

$$W_p = V \cdot I \quad (2.1)$$

Dimana :

---

$W_p$  = Daya PV ketika terkena radiasi matahari (Watt)

V = Tegangan PV (V)

I = Arus pada PV (A)

Umur pemakaian sel surya biasanya bertahan sekitar 25 tahun, namun kelemahan dari sel surya sendiri dari tingkat efisiensinya sendiri berkisar antara 12-18%.

Sel surya merupakan semikonduktor yang bisa mengubah radiasi matahari menjadi energy listrik Pvsyst memodelkan PV array sebagai keluaran dari sel surya menggunakan persamaan 2.2 :

$$P_{pv} = f_{pv} Y_{pv} PSH \quad (2.2)$$

Dimana :

$P_{pv}$  = Keluaran pada PV (kWh/d)

$f_{pv}$  = Pv derating factor (0,7-0,85)

$Y_{pv}$  = Daya yang diijinkan dari PV array (kW)

PSH = Peak Sun Hour (jam)

Untuk menghitung densitas daya menggunakan persamaan 2.3 :

$$\rho = \frac{\text{energi total terbangkitkan}}{\text{luas lahan}} \quad (2.3)$$

Untuk menghitung keluaran dari sel surya yang di modelkan Pvsyst menggunakan persamaan 2.4 :

$$PV \text{ Area} = \frac{Et}{G_{av} \times TCF \times n_{PV} \times \eta_{out}} \quad (2.4)$$

Dimana :

PV Area	= Luas Array (m <sup>2</sup> )
Et	= Besar Konsumsi Energi (kWh)
Gav	= Minimum Iradiasi Matahari (kWh/m <sup>2</sup> )
Npv	= Efisiensi Modul Surya
Nout	= Efisiensi keluaran
TCF	= Temperature Correction Factor (%)

Untuk menentukan kapasitas dan jumlah modul surya maka diperlukan Temperature Correction Factor (TCF) untuk mendapatkan nilai TCF menggunakan persamaan 2.5 :

$$TCF = \frac{P_{MPP} - (\text{temperature coefficient factor} \times P_{MPP} \times \text{Perubahan suhu})}{P_{MPP}} \quad (2.5)$$

Selanjutnya dari perhitungan area array, maka besar daya yang dapat dibangkitkan PLTS menggunakan persamaan 2.6 :

$$P_{wp} = PV \text{ Area} \times PSI \times npv \quad (2.6)$$

Dimana :

PV Area	= Luas Permukaan Panel Surya (m <sup>2</sup> )
PSI	= Peak Solar Insolation adalah 100 W/m <sup>2</sup>
Npv	= Efisiensi Panel surya (%)

Untuk mendapatkan fill factor menggunakan persamaan 2.7 :

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.7)$$

Dimana :

$V_{mp}$  = Tegangan ketika daya keluaran maksimum

$I_{mp}$  = Arus ketika daya keluaran maksimum

$V_{oc}$  = Tegangan ketika rangkaian terbuka

$I_{sc}$  = Arus ketika rangkaian *short*

## 2.4 Komponen Sistem PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya memiliki beberapa komponen yaitu diantaranya (Farhan Fernanda et al., 2021).

### 2.4.1 Panel Surya

Panel surya juga dikenal sebagai modul surya atau sel surya, adalah perangkat elektronik yang mengubah energi matahari menjadi listrik proses ini disebut fotovoltaik. Komponen utama dari panel surya adalah sel surya, yang umumnya terbuat dari silikon, energi yang dihasilkan adalah arus searah (DC)

Gambar 2.3 panel surya.



**Gambar 2.3 Panel Surya**

(Ken, 2022)

## 2.4.2 Inverter

Inverter merupakan perangkat elektronik yang berfungsi mengkonversi arus listrik searah (DC) dari solar panel menjadi listrik bolak-balik (AC) dan untuk fungsi inverter di PLTS ini adalah untuk menyuplai perangkat yang menggunakan arus listrik bolak-balik (AC) Gambar 2.4 cara kerja inverter dan untuk menghitung kapasitas inverter menggunakan persamaan 2.8 :

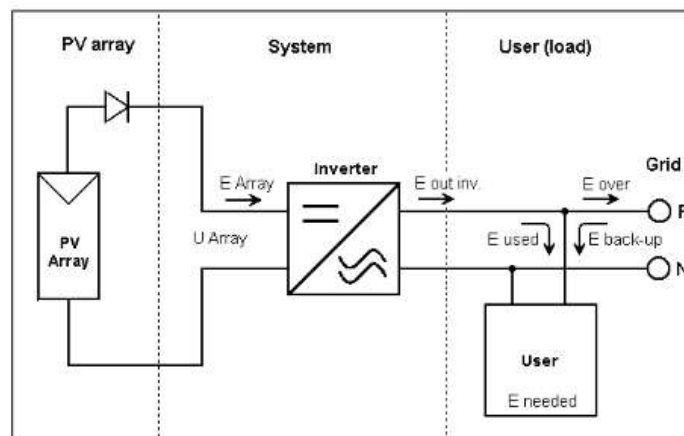
$$P_{inv} = P_{load} \times SF \quad (2.8)$$

Dimana :

$P_{inv}$  = Kapasitas Inverter

$P_{load}$  = Kapasitas total PLTS (KW)

$SF$  = Faktor kapasitas inverter (80%-90%)



**Gambar 2.4 Sirkuit Diagram Inverter**

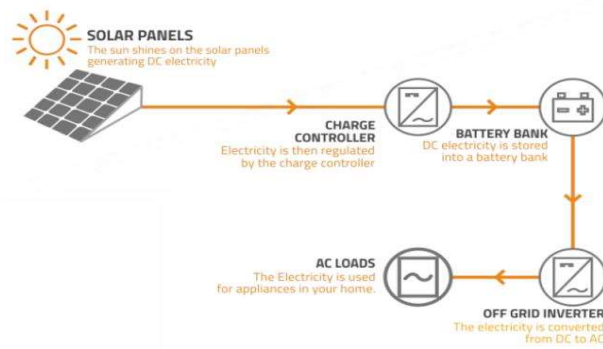
(Karuniawan, 2021)

## 2.5 Jenis-Jenis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Secara garis besar sistem PLTS dibagi menjadi 3 jenis berdasarkan aplikasi dan konfigurasinya yaitu (Teknika et al., 2020).

### 2.5.1 Sistem PLTS *Off-Grid*

Sistem PLTS *off-Grid* merupakan sistem PLTS yang hanya mengandalkan satu-satunya sumber pembangkit listrik yaitu dengan menggunakan radiasi dari sinar matahari dengan bantuan panel surya untuk menghasilkan energi listrik Gambar 2.5 sistem PLTS off-grid. Jenis sistem PLTS Sistem *PLTS off-Grid* ini biasanya dimanfaatkan pada daerah-daerah pelosok yang tidak terjangkau oleh jaringan listrik dari PLN.



**Gambar 2.5 Sistem PLTS Off-Grid**

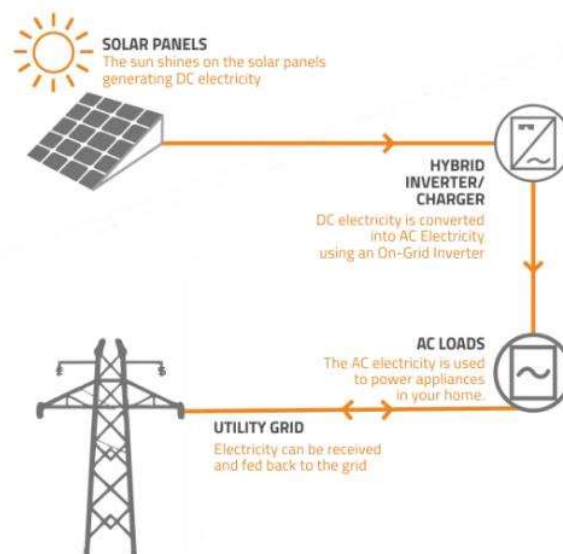
(Nugraha, 2023)

### 2.5.2 Sistem PLTS *On-Grid*

Sistem PLTS *On-Grid* merupakan sistem PLTS yang sistemnya terhubung dengan listrik PLN dan mengoptimalkan pemanfaatan energi matahari melalui modul surya yang menghasilkan energi listrik semaksimal mungkin. Gambar 2.6



sistem PLTS on-grid. Jenis sistem PLTS ini biasanya digunakan untuk daerah perkotaan yang sudah menggunakan jaringan listrik dari PLN yang bertujuan untuk penghematan penggunaan energi listrik PLN sehingga dapat memperkecil biaya tagihan listrik PLN.



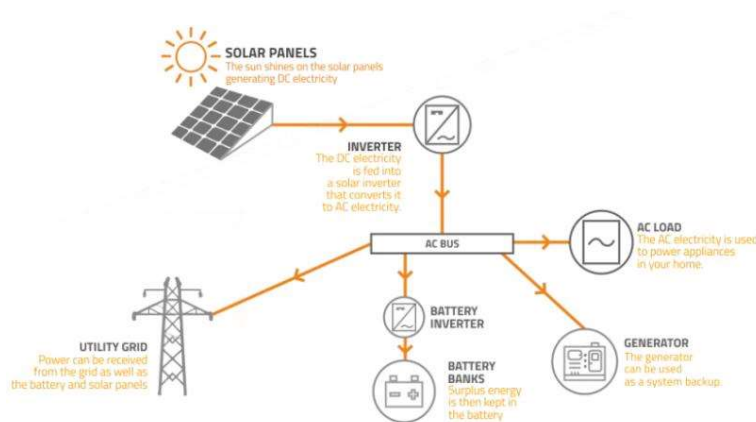
**Gambar 2.6 Sistem PLTS On-Grid**

(Nugraha, 2023)

### 2.5.3 Sistem PLTS Hybrid

Sistem PLTS *Hybrid* merupakan sistem pembangkit listrik yang dikombinasikan dengan 2 atau bisa lebih dengan sistem pembangkit lain, biasanya sumber pembangkit ini bersumber dari pembangkit listrik tenaga diesel, gas alam atau angin. Salah satu contoh sistem PLTS *Hybird* yaitu seperti PLTS *Genset*, PLTS Mikrohidro, PLTS Energi Angin dan lainnya. Sistem PLTS *Hybrid* ini merupakan salah satu solusi untuk mengurangi bahan bakar terutama untuk di

daerah pedesaan yang masih mengandalkan PLTD atau genset sebagai sumber energi listrik Gambar 2.7 sistem PLTS hybrid.



**Gambar 2.7 Sistem PLTS Hybrid**

(Nugraha, 2023)

## 2.6 Prinsip Kerja PLTS

Prinsip kerja PLTS pada dasarnya menggunakan panel surya sebagai komponen utama dan ada juga sistem kontrol dengan *solar charger controller* atau *solar inverter* yang dapat mengatur daya listrik yang dihasilkan untuk dapat digunakan pada beban. Ada 2 cara untuk melakukan penggunaan ini yaitu sebagai berikut (ayu, 2020)

## 2.7 Perhitungan Perencanaan Sistem PLTS Rooftop

Perencanaan meliputi analisa lokasi pemasangan PLTS Atap, seperti analisa ayangan serta orientasi atap dan perhitungan luas area atap. Tahap perencanaan juga meliputi analisa sistem beban listrik. Langkah awal menentukan modul surya dan inverter yang akan digunakan. Selanjutnya menghitung kapasitas maksimal sistem PLTS Atap. Untuk menghitung jumlah kebutuhan modul surya dengan persamaan 2.9 :

$$\text{Jumlah Modul} = \frac{\text{Kapasitas PLTS}}{\text{Kapasitas modul}} \quad (2.9)$$

Menentukan total keluaran energy yang dihasilkan dari sistem PLTS dapat menggunakan persamaan 2.10 :

$$E_{out} = G_{av} \times TCF \times \eta_{out} \times PV \text{ area} \quad (2.10)$$

Dimana :

$E_{out}$  = Energi yang dihasilkan sistem (kWh)

$G_{av}$  = Minimum iradiasi

TCF = Temperature correction factor

$\eta_{out}$  = Efisiensi Panel

PV Area = Luas array

## 2.8 Penghematan dan Pengembalian *Investasi*

### 1. *Return on Investment (ROI)*

Dapat diartikan sebagai laba atas investasi. Dalam perhitungan ROI, nilai yang dicari adalah presentase keuntungan dari investasi berdasarkan keseluruhan laba dan biaya yang dikeluarkan. ROI berguna untuk mengukur efisiensi dari suatu tindakan investasi. Jika langkah yang terukur, maka setiap investasi yang dilakukan akan memiliki resiko kerugian yang minim dan potensi keuntungan yang akan diperoleh dapat diperkirakan. Rumus untuk menentukan ROI menggunakan persamaan 2.11 :

$$E_{out} = \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_o \quad (2.11)$$

### 2. *Net Present Cost (NPC)*

Net Present Cost dapat diartikan sebagai biaya bersih yang difungsikan pada komponen, baik untuk pemasangan atau pengoperasian dalam suatu proyek. Pvyyst mengurutkan data keluaran simulasi berdasarkan nilai NPC terendah. Rumus untuk menentukan NPC menggunakan persamaan 2.12 :

$$NPC = C_{ann} \frac{i(1+i)^N - 1}{(1+i)^N - 1} \quad (2.12)$$

### 3. *Benefit-Cost Ratio (B-CR)*

*Benefit-Cost Ratio* menentukan kelayakan investasi dengan membandingkan antara nilai arus kas bersih sekarang dengan, nilai investasi awal. Rumus untuk menentukan B-CR menggunakan persamaan 2.13 :

$$B - CR = \frac{Benefit}{Biaya produksi} \quad (2.13)$$

### 4. *Payback Periode (PBP)*

*Payback periode* diperoleh dengan menghitung berapa jumlah kas bersih sekarang akan sama atau lebih dengan nilai investasi awal. Payback Periode merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui waktu yang diperlukan untuk mengembalikan biaya. Rumus untuk menentukan Payback Periode menggunakan persamaan 2.14 :

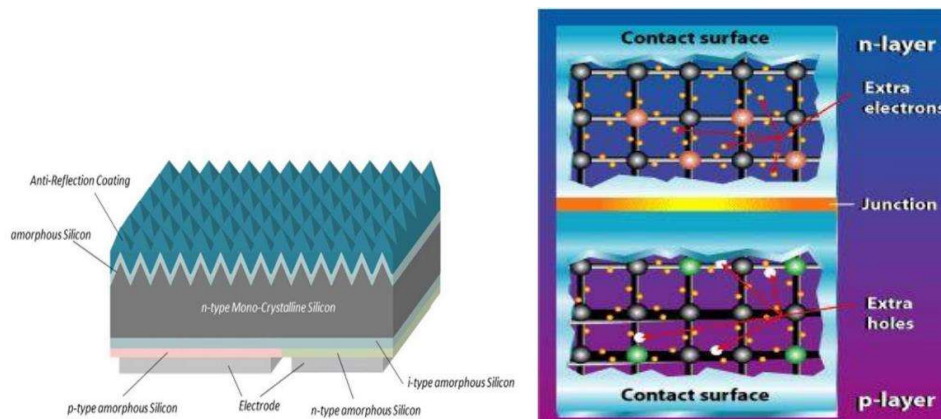
$$PBP = \frac{Investasi}{Pendapatan} \times Periode waktu \quad (2.14)$$

## 2.9 Jenis Modul Surya

Panel surya dapat dibedakan menjadi 3 jenis berdasarkan bentuk dan ukuran tetapi jenis utamanya terbagi menjadi tiga bagian yaitu monokristal, polikristal dan amorphous (Kristiawan et al., 2019).

### 2.7.1 Monokristal (*mono-crystalline*)

Monokristal merupakan modul surya yang mempunyai efisiensi sebesar 15% pada suhu 25°C dan menurun menjadi 12-15% pada suhu 50°C dan memiliki efisiensi hasil tinggi pada setiap satuan luas PV module tetapi sel surya ini mempunyai kelemahan yaitu tidak berfungsi dengan baik ketika tidak mendapatkan sinar matahari yang tertutup oleh awan. Pada Gambar 2.8 menjelaskan struktur modul monocrystalline dan struktur sel fotovoltaik.



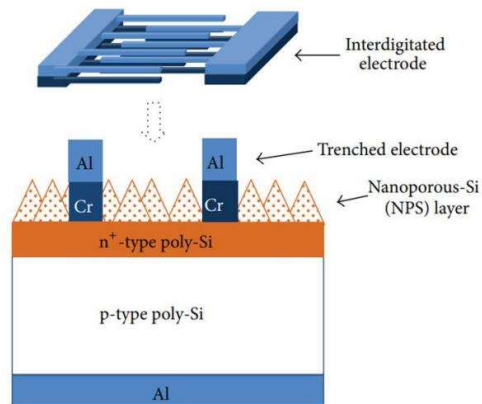
**Gambar 2.8 Struktur modul *Monocrystalline* & Sel Fotovoltaik**

(Juan Arya Satria et al., 2022) (Il- & Th, 2017)

### 2.7.2 Polikristal (*Poly-crystalline*)

Polikristal merupakan modul surya yang memiliki susunan kristal acak karena modul surya ini menggunakan proses pengecoran. Polikristal mempunyai

efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan monokristal yaitu 12% - 14% dan modul surya ini memiliki harga yang lebih murah dari monokristal. Gambar 2.9 Menjelaskan struktur modul *Polycrystalline*.

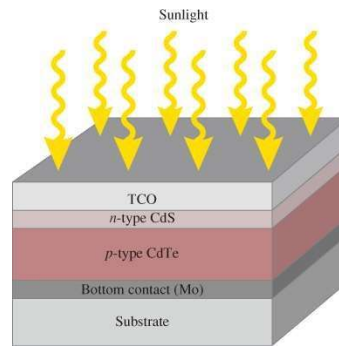


**Gambar 2.9 Struktur Modul Polycrystalline**

(Juan Arya Satria et al., 2022)

### 2.7.3 Thin-Film

*Thin-Film* merupakan modul surya dengan struktur lapisan tipis mikrokrystalsilikon dan *amorphous* dengan efisiensi modul 8.5%. Panel surya amorf dibuat dari lapisan silikon non kristal yang dilapiskan pada substrat tipis seperti kaca, plastik atau logam. Bahan konduktor yang dihasilkan sangat serbaguna; lunak, ringan, dan mudah dipotong menjadi bentuk unik yang cocok untuk banyak aplikasi. Gambar 2.10 Menjelaskan struktur modul thin film.



**Gambar 2.10 Struktur Modul Thin-Film**

(Juan Arya Satria et al., 2022)

Perbedaan dari ketiga modul surya ini dijelaskan pada tabel 2.5 dibawah.

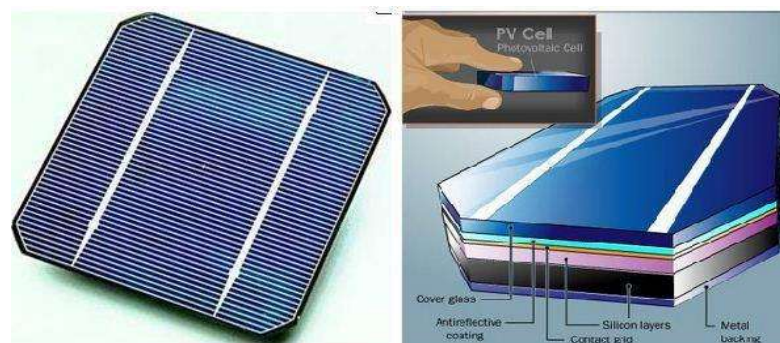
**Tabel 2.5 Perbedaan modul surya Monokristal, Polikristal dan Thin-film**

Jenis Modul	Kelebihan	Kekurangan
Monokristal ( <i>mono-crystalline</i> )	Panel yang memiliki efisiensi yang tinggi dan memiliki masa pakai $\pm 25$ tahun	Jenis panel surya termahal
Polikristal ( <i>Poly-crystalline</i> )	Efisiensi dan biaya panel seimbang, dan memiliki masa pakai $\pm 25$ tahun	Nilai efisiennya = <i>mono-crystalline</i> > Poly-crystalline > Amorphous Temperature mempengaruhi produktivitas dan daya tahan

Amorphous	Temperature tinggi tidak mempengaruhi produktivitas dan biaya rendah	Efisiensi yang rendah dan massa pakai lebih yang pendek dibandingkan dengan monocrystalline dan pollycrystalinne
-----------	--	--

### 2.10 Struktur Panel Surya

Sesuai dengan perkembangan sains dan teknologi, jenis-jenis teknologi sel Surya pun berkembang dengan berbagai inovasi. Ada yang disebut sel surya generasi satu, dua, tiga dan empat, dengan struktur atau bagian-bagian penyusun sel yang berbeda pula. Dalam tulisan ini akan dibahas struktur dan cara kerja dari sel surya yang umum berada dipasaran saat ini yaitu sel surya berbasis material silikon yang juga secara umum mencakup struktur dan cara kerja sel surya generasi pertama (sel surya silikon) dan kedua (thin film/lapisan tipis). Gambar 2.11 menjelaskan material dan struktur sel surya menggunakan material silikon sebagai semi konduktor.



**Gambar 2.11 Struktur sel surya**

(Elektro et al., 2024)



Secara umum terdiri dari :

### 1. Substrat/Metal Backing

Substrat adalah material yang menopang seluruh komponen sel surya. Material substrat juga harus mempunyai konduktifitas listrik yang baik karena juga berfungsi sebagai kontak terminal positif sel surya, sehingga umumnya digunakan material metal atau logam seperti aluminium atau molybdenum. Untuk sel surya *dye-sensitized* (DSSC) dan sel surya organik, substrat juga berfungsi sebagai tempat masuknya cahaya sehingga material yang digunakan yaitu material yang konduktif tapi juga transparan seperti *indium tin oxide* (ITO) dan *fluorine doped tin oxide* (FTO).

### 2. Material semi konduktor

Material semikonduktor merupakan bagian inti dari sel surya yang biasanya mempunyai tebal sampai beberapa ratus mikrometer untuk sel surya generasi pertama (silikon), dan 1-3 mikrometer untuk sel surya lapisan tipis. Material semikonduktor inilah yang berfungsi menyerap cahaya dari sinar matahari. Untuk kasus gambar diatas, semikonduktor yang digunakan adalah material silikon, yang umum diaplikasikan di industri elektronik. Sedangkan untuk sel surya lapisan tipis, material semikonduktor yang umum digunakan dan telah masuk pasaran yaitu contohnya material  $\text{Cu(In,Ga)(S,Se)}_2$  (CIGS), CdTe (kadmium telluride), dan amorphous silikon, disamping material-material semikonduktor potensial lain yang dalam sedang dalam penelitian intensif seperti  $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S,Se)}_4$  (CZTS) dan  $\text{Cu}_2\text{O}$  (copper oxide) Bagian semikonduktor tersebut terdiri dari junction atau gabungan dari dua material semikonduktor yaitu semikonduktor tipe-p (material-material yang disebutkan diatas) dan tipe-n

(silikon tipe-n, CdS,dll) yang membentuk p-n junction. P-n junction ini menjadi kunci dari prinsip kerja sel surya.

### 3. Kontak Metal

Selain substrat sebagai kontak positif, diatas sebagian material semikonduktor biasanya dilapiskan material metal atau material konduktif transparan sebagai kontak negatif.

### 4. Lapisan Anti Reflektif

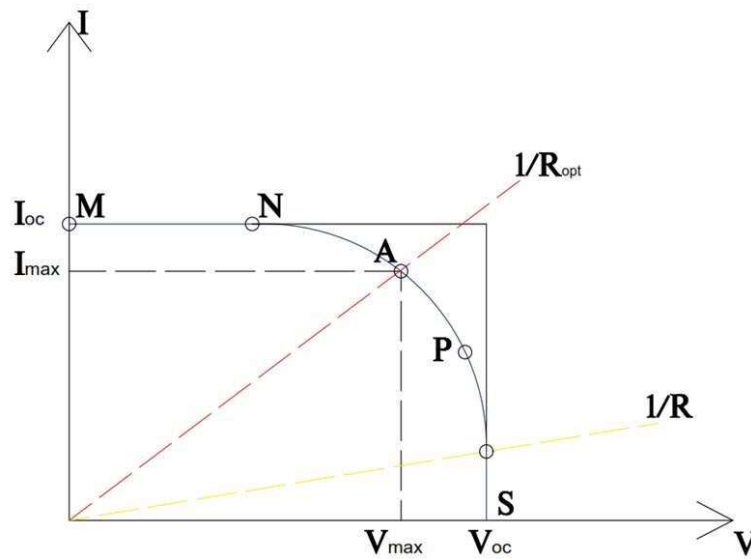
Mengoptimalkan cahaya yang terserap oleh semikonduktor. Oleh karena itu biasanya sel surya dilapisi oleh lapisan antirefleksi. Material anti-refleksi ini adalah lapisan tipis material dengan besar indeks refraktif optik antara semikonduktor dan udara yang menyebabkan cahaya dibelokkan ke arah semikonduktor sehingga meminimumkan cahaya yang dipantulkan kembali.

### 5. Enkapsulasi / Cover glass

Bagian ini berfungsi sebagai enkapsulasi untuk melindungi modul surya dari hujan atau kotoran.

## 2.11 Karakteristik Sel Surya

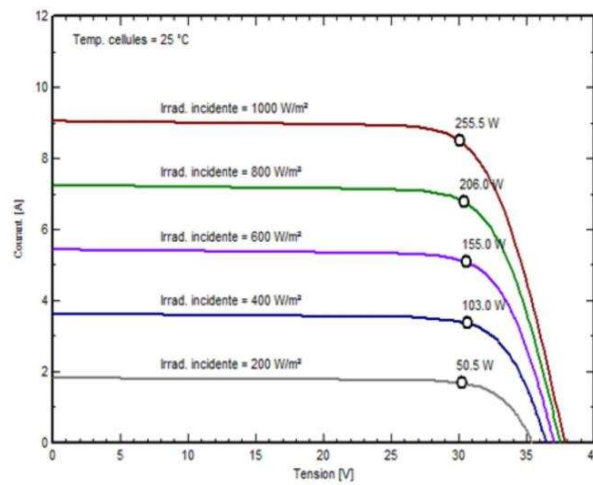
Karakteristik sel surya yaitu kurva hubungan arus dan tegangan yang mempengaruhi dari radiasi sinar matahari dan suhu. Daya maksimal ( $W_p$ ) pada sel surya dapat diraih dengan radiasi matahari pada saat kondisi  $1000W/m^2$  dan suhu pada kondisi  $25^\circ C$  sesuai *standar tes condition* (STC) yang ditunjukkan pada Gambar 2.12. (Juan & Satria, 2023).



**Gambar 2.12 Karakteristik Sel Surya**

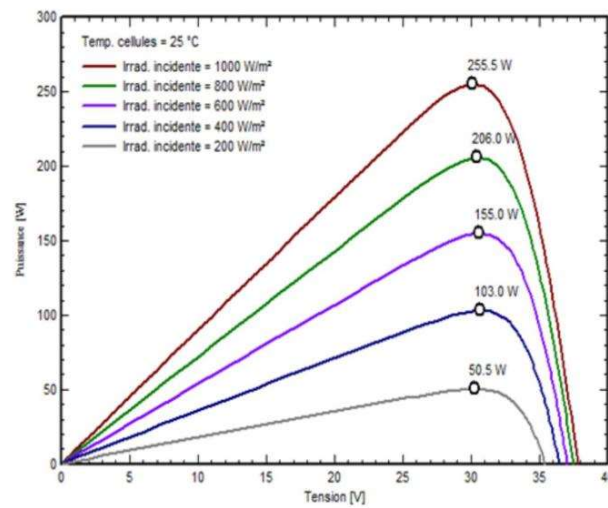
(Juan & Satria, 2023)

Karakteristik keluaran Daya, Tegangan dan Arus modul surya jenis *monocrystalline* (Module PV: SolarWord, Sunmodule SW 225 mono) yang ditunjukkan pada **Gambar 2.12** dan **Gambar 2.13**.



**Gambar 2.13 Karakteristik I-V Module monocrystalline**

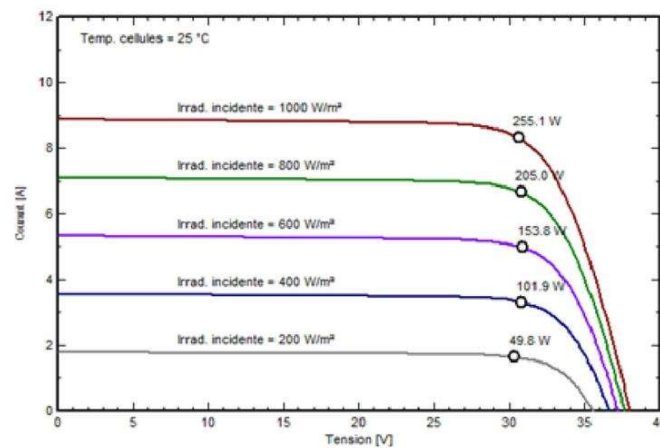
(Juan & Satria, 2023)



**Gambar 2.14 Karakteristik P-V Modul Monocrystalline**

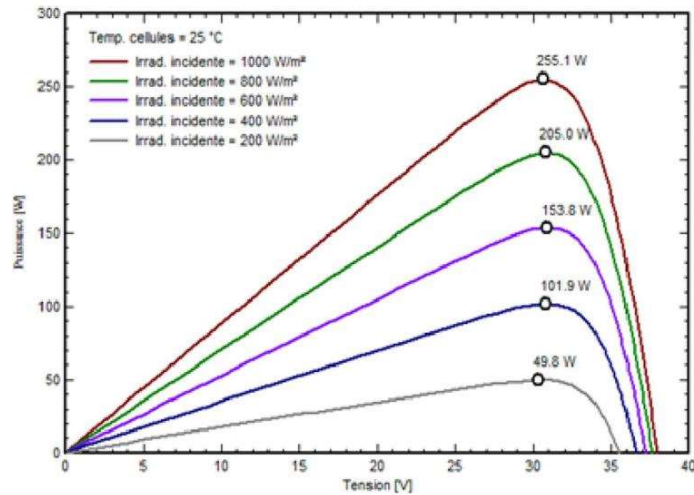
(Juan & Satria, 2023)

Karakteristik keluaran Daya, Tegangan dan Arus pada jenis modul surya *Polycrystalline* (Module PV SolarWord, Sunmodule SW 255 poly) yang di tunjukkan pada gambar Gambar 2.14 ,Gambar 2.15, Gambar 2.16



**Gambar 2.15 Karakteristik I-V Modul Polycrystalline**

(Juan & Satria, 2023)



**Gambar 2.16 Karakteristik P-V Modul Polycrystalline**

(Juan & Satria, 2023)

Dari semua grafik di atas rendah atau tinggi nya grafik pada karakteristik sel surya di pengaruhi oleh daya dari intensitas cahaya radiasi matahari ketika menyinari permukaan bumi.

## 2.12 PVSyst ( *Photovoltaic System* )

PVSyst merupakan paket software yang digunakan untuk proses pembelajaran, pengukuran, dan analisis data dari sistem PLTS secara lengkap. PVSyst dikembangkan oleh Universitas Genewa yang terbagi ke dalam sistem terinterkoneksi jaringan (grid-connected), sistem berdiri sendiri (stand-alone), sistem pompa (pumping), dan jaringan arus searah untuk transportasi publik (DC-grid). PVSyst juga dilengkapi database dari sumber data meteorologi yang luas dan beragam, serta data komponen komponen PLTS. (Karuniawan, 2021)

## 2.13 ETAP ( *Electrical Transient Analyzer Program* )

ETAP didirikan pada tahun 1986 oleh Dr. R. M. (Ravi) Rajapakse dengan fokus awal pada analisis transien listrik. Seiring waktu, ETAP berkembang

menjadi penyedia solusi perangkat lunak terkemuka untuk manajemen sistem tenaga listrik, mencakup fungsi-fungsi penting seperti analisis aliran daya (power flow), perlindungan sistem (short-circuit analysis), pemodelan dinamis (dynamic modeling), dan perencanaan pemeliharaan (maintenance planning). Platform ini juga menyediakan analisis stabilitas sistem (system stability analysis), perancangan sistem distribusi dan transmisi, serta optimasi jaringan (network optimization). Pada tahun 2000-an, ETAP memperkenalkan teknologi berbasis cloud dan digital twin listrik, memperluas fungsionalitasnya untuk meningkatkan kolaborasi global dan aksesibilitas. Saat ini, ETAP dikenal karena inovasinya dalam solusi yang canggih, memberikan pengalaman pengguna yang mulus dan mendukung keberlanjutan serta produktivitas dalam manajemen sistem tenaga listrik.

## 2.14 Penelitian Terkait

**Tabel 2.6 Penelitian Terkait**

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1	Desain stand alone solar photovoltaic system di gedung museum	Robertus Bellarminus Dhony Prasetya	Universitas Semarang 2023	Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya dengan

	provinsialat (pastoran gereja) argopuro Semarang dengan daya 7700VA	Nugraha		menggunakan Software Pvsyst.
2	Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya 100 Wp untuk Penerangan Lampu di Ruang Selasar Fakultas Teknik Universitas Riau Kepulauan	Pamor Gunoto dan Sofan Sofyan	Universitas Riau 2020	Upaya untuk mengurangi penggunaan energi listrik dari PLN dalam rangka penghematan biaya penerangan lampu setiap bulannya.
3	Penentuan Komponen Sistem PLTS 100 Wp pada Floating Photovoltaic sebagai Sumber Energi Lampu Penerangan 20 W pada kolam	Muhamad Farhan Fernanda, Benhur Nainggolan dan Indra Silanegara	Politeknik Negeri Jakarta 2021	Pembuatan <i>Floating</i> <i>Photovoltaic</i> pada kolam Politeknik Negeri Jakarta.

	Politeknik Negeri Jakarta			
4	Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap Gedung Sekolah di Kota Denpasar	H. Kristiawan, I.N.S Kumara dan I.A.D Giriantari	Kota Denpasar 2019	Penerapan sistem <i>Building Applied Photovoltaic</i> (BAP) dan efisiensi penggunaan solar panel pada <i>rooftop</i> .
5	Perencanaan dan Analisis Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat untuk Desa Mandiri	Bambang Winardi, Agung Nugroho dan Erlin Dolphina	Desa Kaliwungu Kecamatan Mandiraja Kabupaten Banjarnegara 2019	Menentukan besar kapasitas peralatan sistem <i>photovoltaic</i> pada PLTS dan menghitung atau menganalisis perkiraan biaya menggunakan metode ekonomi teknik untuk mengetahui kelayakan investasi proyek PLTS.