

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Strategi Energi Nasional

Lahirnya Grand Strategi Energi Nasional diharapkan bisa menjawab persoalan terkait meningkatnya permintaan energi untuk jangka panjang dan terbatasnya pasokan sumber daya dalam negeri. Pemerintah menargetkan kapasitas terpasang pembangkit listrik EBT tahun 2025 mencapai 24 ribu Megawatt (MW). Selanjutnya, pada tahun 2035 ditargetkan ada penambahan pembangkit listrik EBT sebesar 38 ribu MW dari kapasitas terpasang saat ini. Salah satu strategi yang diusung Pemerintah adalah dengan mengoptimalkan pemanfaatan energi surya. (Pribadi, 2021)

Penggunaan energi terbarukan belum besar, kecuali tenaga air, karena biaya produksinya belum kompetitif dibandingkan dengan energi konvensional. Pada umumnya harga listrik yang dibangkitkan dari PLTS, PLTB, Geothermal dan PLT energi terbarukan lainnya masih lebih tinggi daripada yang dibangkitkan dengan BBM (bersubsidi) kecuali PLTMH. (Kadiman, 2006)

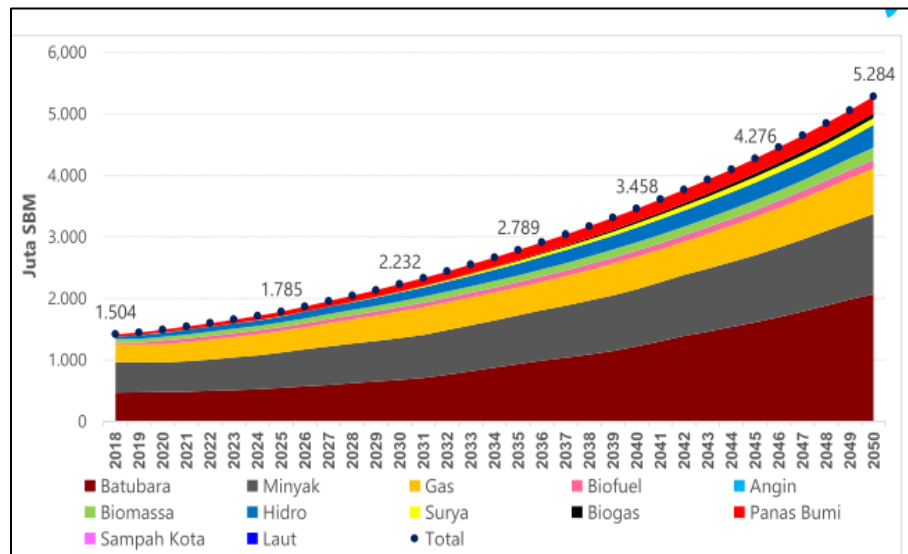
2.2. Sumber Daya Energi

Sumber daya energi adalah sumber daya alam yang dapat diolah oleh manusia sehingga dapat digunakan bagi pemenuhan kebutuhan energi. Satuan perdagangan yang biasa digunakan untuk bahan bakar cair minyak bumi adalah satuan volume seperti liter, barel (setara 159 ltr). Sedangkan untuk bahan bakar padat seperti batu bara menggunakan satuan berat yaitu Ton. Bahan bakar gas menggunakan satuan volume dan berat. Misalnya standar normal meter kubik (m^3)

artinya satuan m^3 gas bumi pada tekanan normal (bar) dan suhu 15° C. Di dunia tersedia berbagai sumber daya alam diantaranya angin, air, batu bara, minyak bumi, panas matahari, dan lain-lain. Di antara sumber daya alam tersebut tersedia bahan yang bisa menjadi sumber energi. Berdasarkan definisi dalam Undang - Undang Republik Indonesia No. 30 Tahun 2007 Bab I Pasal 1, sumber energi adalah sesuatu yang dapat menghasilkan energi baik secara langsung maupun melalui proses konversi. Sedangkan sumber daya energi adalah sumber daya alam yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber maupun energi. (Yuniarti & Printo, n.d.)

Tabel 2.1 Klasifikasi Sumber Energi (Yuniarti & Printo, n.d.)

No	Jenis Sumber Energi	Berdasarkan Ketersediaan (Renewable/ Non renewable)	Berdasarkan Asal Muasal (Fosil/Non fosil)	Berdasarkan Nilai Komersil (Komersil/Non Komersil)	Berdasarkan Pemakaian (Primer/ Sekunder)
1	Minyak Bumi	NR	F	K	P
2	Gas Bumi	NR	F	K	P
3	Batu Bara	NR	F	K	P
4	Uranium	NR	NF	K	P
5	Panas Bumi	R	NF	K	P
6	Tenaga Air	R	NF	K	P
7	Tenaga Surya	R	NF	NK/EB	P
8	Tenaga Angin	R	NF	NK/EB	P
11	BBM	NR	F	K	S
12	LPG	NR	F	K	S
13	Listrik			K	S



Gambar 2.1 Proyeksi Penyediaan Energi (BPPT, 2020)

Penyediaan energi primer meningkat dari 1.504 juta SBM pada tahun 2018 menjadi 5,284 juta SBM pada tahun 2050 atau meningkat dengan pertumbuhan rata-rata 4.2% per tahun. Penyediaan energi sampai dengan tahun 2050 diperkirakan tetap didominasi oleh energi fosil. Energi fosil yang tumbuh paling pesat adalah batubara karena sektor pembangkit listrik didominasi oleh PLTU batubara. Selain itu, batubara juga digunakan sebagai bahan bakar di sektor industri. (BPPT, 2020)

2.3. Sumber Energi Baru dan Terbarukan

Sesuai dengan Undang Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi, yang dikategorikan sebagai sumber energi baru adalah sumber energi yang dapat dihasilkan oleh teknologi baru baik yang berasal dari sumber energi terbarukan maupun sumber energi tak terbarukan, antara lain nuklir, hidrogen, gas metana batubara (coal bed methane), batubara tercairkan (liquified coal), dan batubara tergaskan (gasified coal). sedangkan sumber energi terbarukan adalah sumber

energi yang dihasilkan dari sumber daya energi yang berkelanjutan jika dikelola dengan baik, antara lain panas bumi, angin, bioenergi, sinar matahari, aliran dan terjunan air, serta gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut. (Galakkan *et al.*, 216)

2.4. Potensi Energi Terbarukan

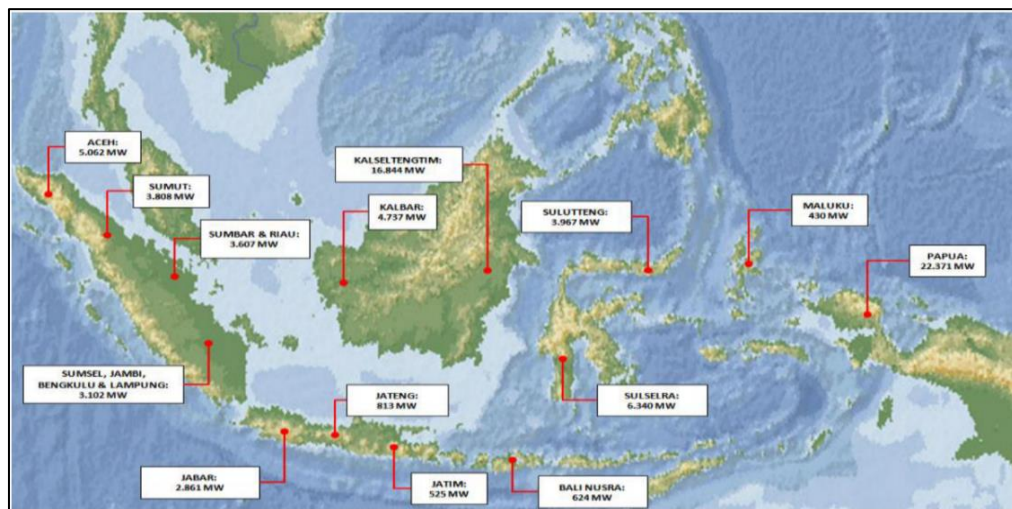
Menurut RUPTL, 2016. Potensi energi terbarukan yang dimiliki Indonesia cukup besar namun, potensi yang sangat besar ini belum dapat dimanfaatkan dengan optimal, bahkan pada beberapa potensi energi terbarukan mengalami penyusutan seperti pada potensi energi air (PLTB) dari 75 GW menjadi 26 GW. Ini didapat berdasarkan hasil penelitian Master Plan Study for Hydro Power Development in Indonesia oleh Nippon Koei (Jepang) pada tahun 2011, setelah menjalani screening lebih lanjut (aspek ekonomi, sosial dan lingkungan termasuk status kehutanan, serta aspek demand), didapat potensi energi air adalah 26,321 MW. Terdiri dari proyek yang sudah beroperasi, proyek yang sudah direncanakan dan sedang konstruksi serta potensi baru. (Adzikri et al, 2017)

Tabel 2.2 Potensi Energi Terbarukan (Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019)

Jenis Energi	Potensi
Tenaga Air	94.3 GW
Panas Bumi	28.5 GW
Bioenergi	32.6 GW
Surya	207.8 GWp
Angin	60.6 GW
Energi Laut	17.9GW

2.5. Potensi Tenaga Air

Indonesia memiliki potensi besar untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga air. Itu disebabkan kondisi topografi Indonesia bergunung dan berbukit serta dialiri oleh banyak sungai dan daerah-daerah tertentu mempunyai danau/waduk yang cukup potensial sebagai sumber energi air. (Abubakar, 2007)

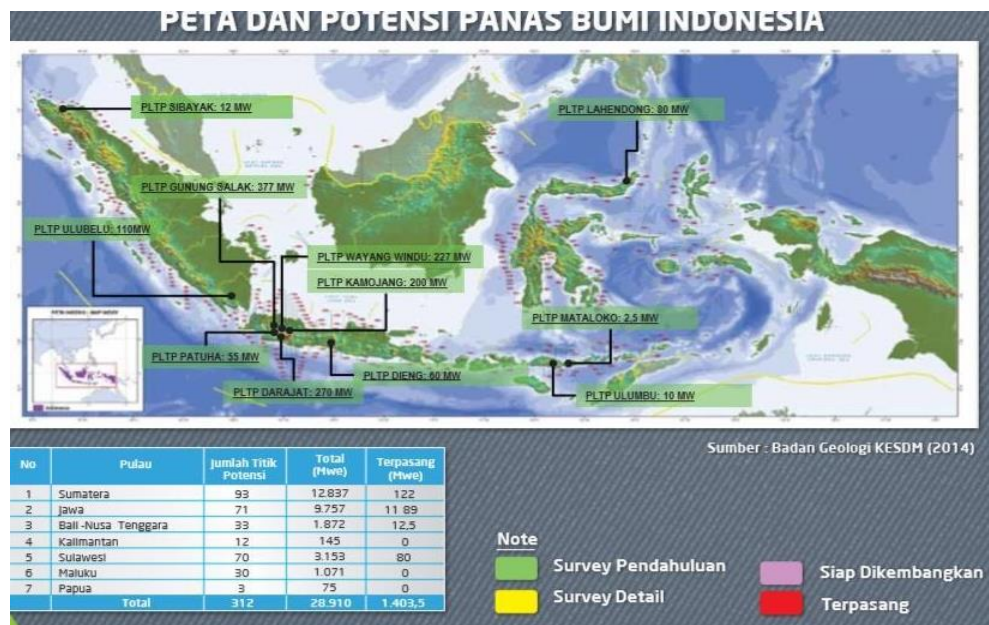


Gambar 2.2 Peta Potensi Tenaga Air (Ministry of Energy, 2010)

Berdasarkan gambar di atas, potensi tenaga air di Indonesia yaitu Aceh 5,062 MW, Sumatera Utara 3,808 MW, Sumatera Barat dan Riau 3,607 MW, Sumatera Selatan, Jambi Bengkulu dan Lampung 3,102 MW, Jabar 2,861 MW, Jateng 813 MW, Jatim 525 MW, Bali Nusra 624 MW, Kalimantan Barat 4,737 MW, Kalimantan Selatan, Kalimantan Tengah, Kalimantan Timur 16,844 MW, Sulawesi Utara, Sulawesi Tengah 3,967 MW, Sulawesi Selatan 6,340 MW, Maluku 430 MW dan Papua 22,371 M. (Nurul Hiron N. B., 2022)

2.5.1. Potensi Panas Bumi

Sebagai daerah vulkanik, wilayah Indonesia sebagian besar kaya akan sumber energi panas bumi. Jalur gunung berapi membentang di Indonesia dari ujung Pulau Sumatera sepanjang Pulau Jawa, Bali, NTT, NTB menuju Kepulauan Banda, Halmahera, dan Pulau Sulawesi. Panjang jalur itu lebih dari 7,500 km dengan lebar berkisar 50-200 km dengan jumlah gunung api baik yang aktif maupun yang sudah tidak aktif berjumlah 150 buah. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan di jalur itu, terdapat 217 daerah prospek panas bumi. (Abubakar, 2007)



Gambar 2.3 Peta Potensi Panas Bumi (Banyog, 2014)

Berdasarkan gambar diatas, didapat potensi panas bumi di PLTP Sibayak 12 MW, PLTP Ulubelu 110 MW, PLTP Patuha 55 MW, PLTP Darajat 270 MW, PLTP Gunung Salak 377 MW, PLTP Wayang Windu 227 MW, PLTP Kamojang 200 MW, PLTP Dieng 60 MW, PLTP Lahendong 80 MW, PLTP Mataloko 2,5 MW, PLTP Ulumbu 20 MW. (Nurul Hiron N. N., 2019)

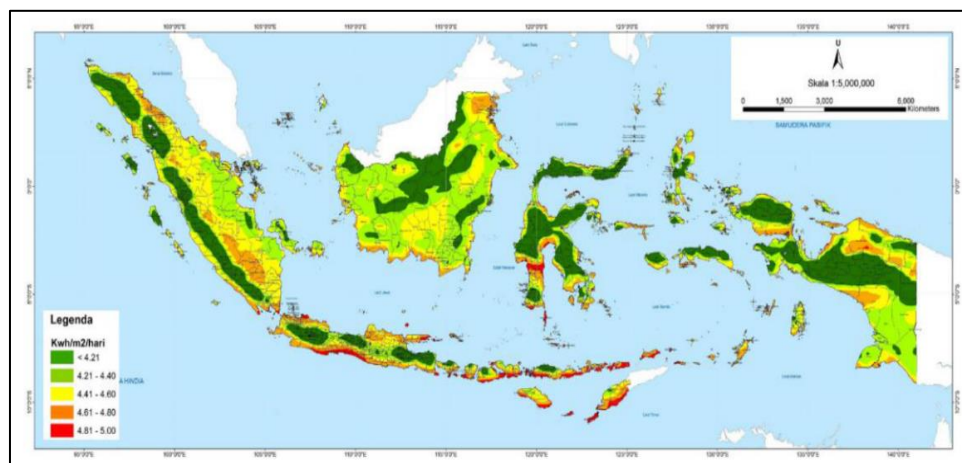
2.5.2. Potensi Energi Surya

Berdasarkan data penyinaran matahari yang dihimpun dari 18 lokasi di Indonesia menunjukkan bahwa radiasi surya di Indonesia dapat diklasifikasikan berturut - turut untuk kawasan barat dan timur Indonesia dengan distribusi penyinaran :

- Kawasan barat Indonesia (KBI) = $4.5 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$, variasi bulanan sekitar 10%
- Kawasan timur Indonesia (KTI) = $5.1 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$, variasi bulanan sekitar 9%
- Rata-rata Indonesia = $4.8 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$, variasi bulanan sekitar 9%.

Hal ini mengisyaratkan bahwa radiasi surya tersedia hampir merata sepanjang tahun. Kawasan timur Indonesia memiliki penyinaran yang lebih baik.

Energi surya dapat dimanfaatkan melalui dua macam teknologi yaitu energi surya termal dan surya fotovoltaik. (Abubakar, 2007)



Gambar 2.4 Peta Potensi Tenaga Surya (Ministry of Energy, 2010)

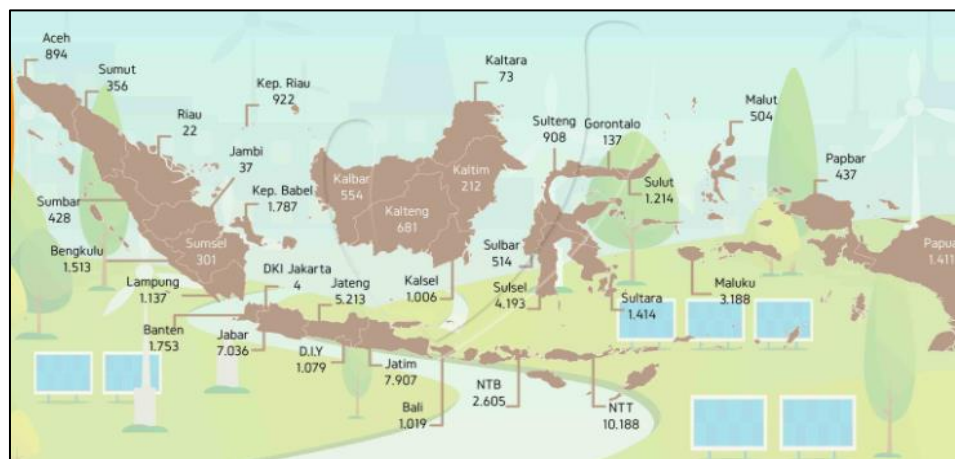
Berdasarkan gambar diatas didapat potensi tenaga surya per hari. warna hijau tua potensi tenaga surya kurang dari $4,21 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$, warna hijau muda

yaitu 4,21 – 4,40 kWh/m²/hari, warna kuning 4,41 – 4,60 kWh/m²/hari, warna oranye 4,61 – 4,80 kWh/m²/hari dan warna merah 4,81 – 5,00 kWh/m²/hari.

2.5.3. Potensi Energi Angin

Secara umum Indonesia masuk kategori negara tanpa angin, mengingat bahwa kecepatan angin minimum rata-rata yang secara ekonomis dapat dikembangkan sebagai penyedia jasa energi adalah 4 m/s. Kendatipun demikian ada beberapa wilayah dimana sumber energi angin kemungkinan besar layak dikembangkan. Wilayah tersebut antara lain Nusa Tenggara Timur (NTT), Nusa Tenggara Barat (NTB), Sulawesi Selatan dan Tenggara, Pantai Utara dan Selatan Jawa dan Karimun Jawa. (Abubakar, 2007)

Potensi energi angin di yang sudah dilakukan studi pendahuluan tersebar di pulau Jawa dan Sulawesi sekitar 950 MW. Pada tahun 2014, Publitbangtek KEBTKE merilis peta potensi energi angin di Indonesia Gambar 2.5.



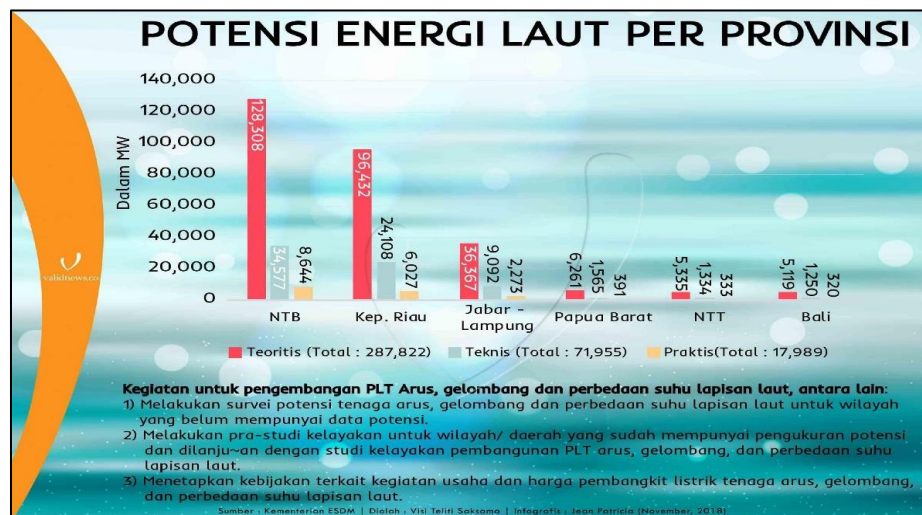
Gambar 2.5 Peta Potensi Tenaga Angin (Fau, 2018)

Dari gambar diatas didapat potensi tenaga angin di Indonesia dalam satuan Megawatt (MW).

2.5.4. Potensi Laut

Di Indonesia, potensi energi Samudra/laut sangat besar karena Indonesia adalah negara kepulauan yang terdiri dari 17,000 pulau dan garis pantai sepanjang 81.000 km, terdiri dari laut dalam, laut dangkal, sekitar 9,000 pulau-pulau kecil yang tidak terjangkau arus listrik Nasional, dan penduduknya hidup dari hasil laut. (Abubakar, 2007)

Berdasarkan penelitian Publitbang KEBTKE ESDM tahun 2014, teridentifikasi peta potensi energi arus laut di 10 selat berpotensi yaitu di Selat Riau, Selat Sunda, Selat Toyapakeh, Selat Lombok, dan Selat Mansuar Raja Ampat. Berdasarkan peta tersebut, potensi dan sumber daya energi laut yaitu potensi energi arus laut praktis sebesar 17,9 GW, energi gelombang potensi praktis sebesar 1,9 GW, dan potensi panas laut praktis sebesar 41 GW. Potensi lokasi sumber tenaga arus laut Indonesia sebagaimana pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Potensi Tenaga Arus Laut (Validnews, 2018)

2.6. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid*

Sistem pembangkit listrik *hybrid* (PLH), digunakan pada pembangkit listrik yang mengandung lebih dari satu generator, biasanya gabungan antara generator konvensional (mesin diesel atau gas) dan energi terbarukan (PLTS, PLTB atau PLTMH). (Studi et al., 2010)

Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH) merupakan salah satu teknologi yang terus berkembang dan dikembangkan dimana *Hybrid System* atau PLTH (Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid) merupakan salah satu alternatif sistem pembangkit yang tepat diaplikasikan pada daerah - daerah yang sukar dijangkau oleh sistem pembangkit besar seperti jaringan PLN atau PLTD. PLTH ini memanfaatkan *renewable energy* atau energi terbarukan yang dikombinasikan dengan Diesel Generator. (Pangkung et al., 2017)

Namun pada penelitian ini PLH yang akan dikombinasikan yaitu berasal dari energi konvensional Pembangkit Listrik Negara (PLN) dengan pembangkit listrik energi terbarukan yaitu energi matahari (surya) dan angin.

2.7. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Indonesia merupakan negara yang memiliki potensi matahari yang cukup besar karena letak geografis Indonesia yang terletak di katulistiwa. Hampir setiap hari dimulai dari pukul 06.00 hingga pukul 17.00 matahari dapat terlihat. Hal ini sangat menguntungkan untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga surya di Indonesia.

Pembangkit listrik tenaga surya memanfaatkan energi radiasi sinar matahari yang ditangkap oleh sel surya yang diproses sedemikian rupa hingga akhirnya menghasilkan energi listrik. Sel surya adalah kumpulan sel fotovoltaik yang dapat mengkonversi sinar matahari menjadi listrik. Potensi energi surya di Indonesia mencapai 4.8 kWh/m²/hari setara dengan 112.000 GWp. (Kementerian ESDM, 2012)

Daya pada PV dapat dihitung dengan HOMER melalui pendekatan matematika. HOMER digunakan sebagai aplikasi pengolah data dan kalkulasi. Untuk menghitung keluaran daya PV menggunakan persamaan berikut:

$$W_p = V \times I \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan :

W_p = Daya pada PV ketika terkena radiasi matahari [watt]

V = Tegangan pada PV [V]

I = Arus pada PV [A]

Umur sel surya biasanya hanya bisa mencapai 25 tahun. Biasanya setelah mencapai jangka waktu tersebut, panel surya tidak akan mengalami penurunan efisiensi yang signifikan. Namun meskipun demikian, sebagian besar efisiensi panel surya komersial mencapai 15% untuk saat ini dan hal ini menjadi salah satu alasan utama mengapa bahan bakar fosil masih belum bisa tersaingi oleh industri energi surya. (Nurul Hiron M. R., 2022)

Fotovoltaik (biasanya disebut juga sel surya) adalah piranti semikonduktor yang dapat merubah cahaya secara langsung menjadi menjadi arus listrik searah (DC) dengan menggunakan kristal silikon (Si) yang tipis. Sebuah kristal silindris Si

diperoleh dengan cara memanaskan Si itu dengan tekanan yang diatur sehingga Si itu berubah menjadi penghantar. Bila kristal silindris itu dipotong stebel 0,3 mm, akan terbentuklah sel-sel silikon yang tipis atau yang disebut juga dengan sel surya (fotovoltaik). (M. Bachtiar, 2006)

HOMER memodelkan PV array sebagai keluaran dari sel surya menggunakan persamaan:

$$P_{pv} = f_{pv} Y_{pv} \frac{IT}{I_s} \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan:

P_{pv} = Daya keluaran pada PV (kWh/hari)

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

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

IT = radiasi matahari secara global (kW/m²/hari)

I_s = 1 kW/m²/hari standar jumlah radiasi yang digunakan PV array.

Sedangkan untuk perhitungan area PV menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$PV \text{ Area} = \frac{EL}{G_{av} \times \eta_{pv} \times TCF \times \eta_{out}} \dots \dots \dots (2.3)$$

dengan :

EL = Pemakaian energi (kWh/hari).

G_{av} = Insolasi harian matahari rata-rata (kWh/m²/hari).

η_{pv} = Efisiensi panel surya.

TCF = *Temperature correction factor*.

η_{out} = Efisiensi inverter

Persamaan menghitung daya yang akan dibangkitkan oleh PLTS adalah sebagai berikut.

$$P = \text{PV area} \times \text{PSI} \times \eta_{PV} \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan :

PV area = Luas permukaan panel surya (m^2)

PSI (Peak Solar Insolation) = $1000w/m^2$

η_{PV} = Efisiensi panel surya (%)

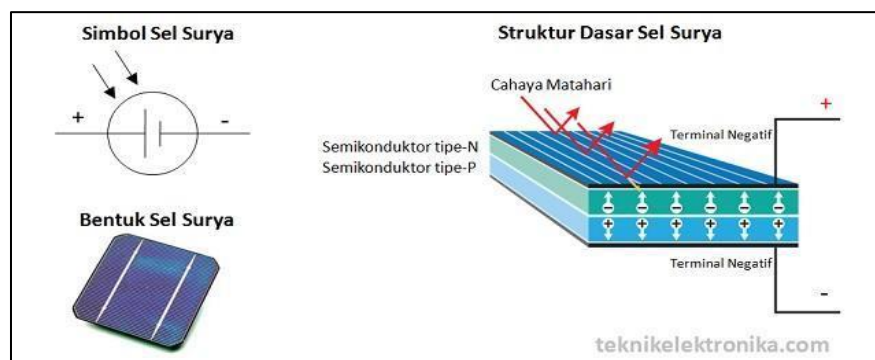
Selanjutnya berdasarkan besar daya yang akan dibangkitkan, maka jumlah panel surya yang diperlukan diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Jumlah Panel Surya} = \frac{P}{P_{mpp}} \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan :

$P_{watt\ peak}$ = Daya yang dibangkitkan (Wp)

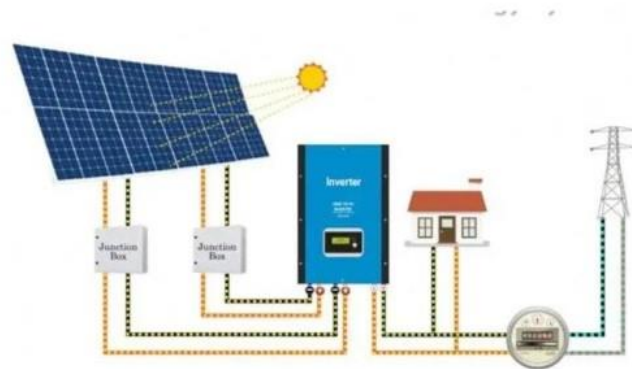
P_{MPP} = Daya maksimum keluaran panel surya (watt)



Gambar 2.7 Struktur Dasar dan Simbol Sel Surya (Dickson Kho, 2020)

2.7.1. Prinsip Kerja Sel Surya

Sistem PLTS biasanya memuat panel surya, inverter, baterai, serta sistem pengendali baterai sebagai komponen utama.



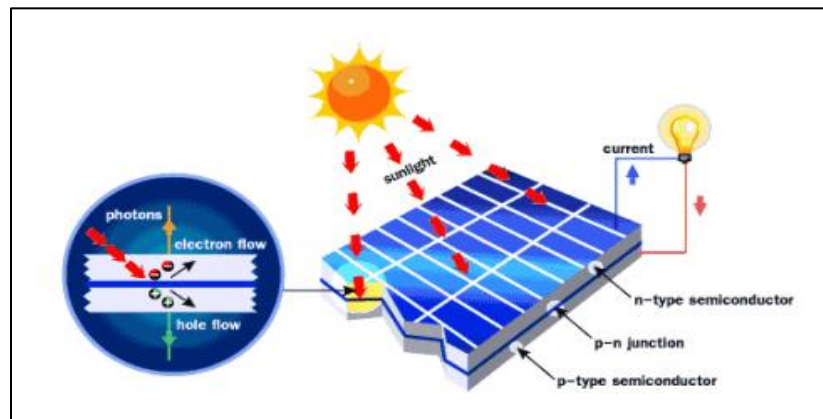
Gambar 2.8 Skema PLTS On Grid Tanpa Baterai

Sinar matahari terdiri dari partikel sangat kecil yang disebut dengan Foton. Ketika terkena sinar Matahari, Foton yang merupakan partikel sinar Matahari tersebut menghantam atom semikonduktor silikon Sel Surya sehingga menimbulkan energi yang cukup besar untuk memisahkan elektron dari struktur atomnya. Elektron yang terpisah dan bermuatan Negatif (-) tersebut akan bebas bergerak pada daerah pita konduksi dari material semikonduktor. Atom yang kehilangan Elektron tersebut akan terjadi kekosongan pada strukturnya, kekosongan tersebut dinamakan dengan “hole” dengan muatan Positif (+).

Daerah Semikonduktor dengan elektron bebas ini bersifat negatif dan bertindak sebagai Pendorong elektron, daerah semikonduktor ini disebut dengan Semikonduktor tipe N (N-type). Sedangkan daerah semikonduktor dengan Hole bersifat Positif dan bertindak sebagai Penerima (*Acceptor*) elektron yang dinamakan dengan Semikonduktor tipe P (P-type).

Di persimpangan daerah Positif dan Negatif (PN Junction), akan menimbulkan energi yang mendorong elektron dan hole untuk bergerak ke arah yang berlawanan. Elektron akan bergerak menjauhi daerah Negatif sedangkan Hole

akan bergerak menjauhi daerah Positif. Ketika diberikan sebuah beban berupa lampu maupun perangkat listrik lainnya di Persimpangan Positif dan Negatif (PN Junction) ini, maka akan menimbulkan Arus Listrik. (Dickson Kho, 2020)



Gambar 2.9 Prinsip kerja sel surya (Anonim, n.d.)

2.8. Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB)

Indonesia berpotensi untuk mengembangkan pembangkitan listrik energi alternatif terbarukan tersebut. Salah satunya adalah energi angin yang berhembus relatif stabil sepanjang tahun dengan rata-rata kecepatan 5 m/s. Dengan menggunakan kincir angin, energi angin yang berhembus dapat diubah menjadi energi listrik yang sangat bermanfaat. (Adriani, 2018)

Pembangkit listrik tenaga angin atau *wind power system* adalah pembangkit yang bersumber dari energi angin dengan memanfaatkan hembusan angin yang mengenai kincir dan memutarakan kincir angin yang sudah terhubung dengan motor sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Pembangkit dengan sumber energi angin ini cocok digunakan di pesisir pantai dan juga dataran tinggi atau juga di daerah yang memiliki potensi angin yang cukup.

Wind Power System ini terdiri dari empat bagian utama, yaitu rotor, elektrik, transmisi, dan kolom. Bagian rotor terdiri dari baling-baling dengan tiga

daun, bentuknya menyerupai baling-baling pada pesawat. Dengan bentuk seperti ini diharapkan energi angin yang tertangkap bisa maksimal agar bobotnya lebih ringan. Baling-baling atau kincir angin ini dibuat dengan jari-jari 1,15 meter dan bahannya dibuat dari fiberglass. Sistem transmisi ini digunakan untuk menyiasati kekuatan angin yang kecil. Karena kecepatan angin di Indonesia relatif kecil, transmisi ini sangat menguntungkan untuk meningkatkan putaran sebagai peningkatan energi angin. (Imron et al., 2016)

Kemudian untuk efisiensi turbin angin ini menurut Betz umumnya daya efektif maksimum dalam perancangan turbin angina tidak lebih dari 59% energi yang dibawa oleh angina dan diserap oleh turbin.

Tabel 2.3 Tabel Efisiensi turbin

Turbin	Efisiensi (%)
Turbin Angin Sumbu Horizontal	30 – 40
Turbin Angin Sumbu Vertikal	10 – 40
Turbin Angin Darius	30 – 40
Turbin Angin Savonius	10 – 17

Kecepatan angin tinggi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut oleh aplikasi HOMER :

$$P = \frac{1}{2} \rho \times S \times V^3 \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana

P = Daya [watt]

ρ = Massa jenis angin (1,225 kg/m³)

V = Kecepatan angin (m/s)

S = Area sapuan angin (m²)

D = Diameter penampang / turbin angin (m)

Kemudian untuk pembatasan jarak dalam optimalisasi ladang angin baru-baru ini, cara yang lebih umum adalah menetapkan jarak minimum antara dua WT, yang merupakan Pembatasan Omnidirectional empiris. Hal ini dapat diinterpretasikan dengan area pengekanan melingkar, dan radius pengekanan 5D (D adalah diameter rotor) paling banyak digunakan.

Park and Law menjelaskan metode untuk mengoptimalkan penempatan WT dengan kendala jarak antar 5D. Mital, dkk. mengusulkan metode optimasi hybrid untuk secara bersamaan mengoptimalkan jumlah total dan lokasi WT, di mana jarak minimum antara WT adalah 5D. Parada, dkk. juga menentukan tata letak ladang angin untuk memaksimalkan energi tahunan yang dihasilkan, menggunakan Pembatasan Segala Arah dengan kendala 5D.

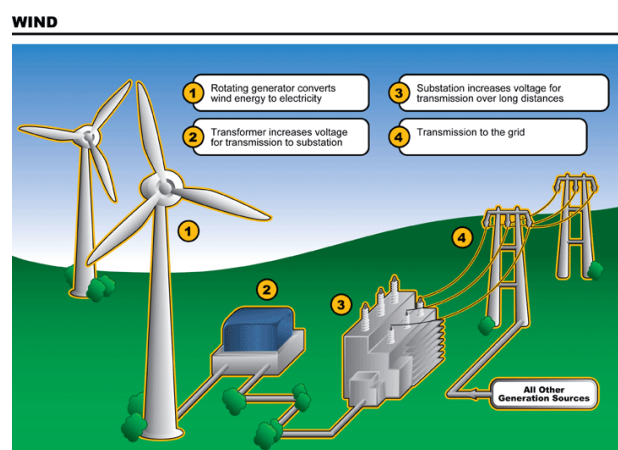
2.8.1. Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Turbin angin bekerja sebagai kebalikan kipas angin. Angin akan memutar *blade*, kemudian memutar sebuah poros yang dihubungkan dengan pembangkit

(generator) hingga menghasilkan listrik. Turbin untuk pemakaian umum (komersial) berukuran 50-750 kilowatt.

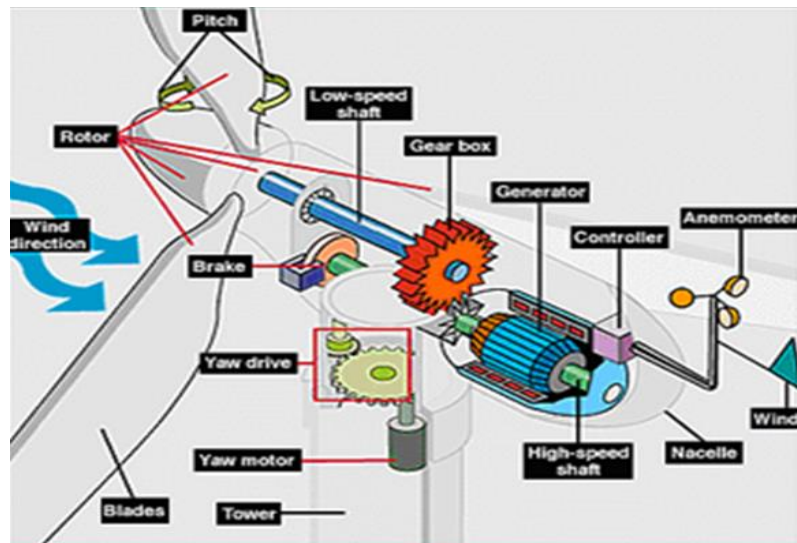
Berikut Langkah kerja dari PLTB

1. Angin yang meniup bilah turbin angin akan mengakibatkan bilah bergerak memutar.
2. bilah turbin angin yang memutar akan memutar poros didalam nacelle.
3. Poros terhubung dengan gearbox, di gearbox perputaran poros ditingkatkan dengan mengatur perbandingan roda gigi dalam gearbox.
4. gearbox dihubungkan dengan generator. Generator akan merubah energi mekanik menjadi energi listrik.
5. Setelah itu, generator yang telah menghasilkan energi listrik menuju transformer untuk menaikkan tegangannya agar bisa didistribusikan ke konsumen atau disimpan pada baterai.



Gambar 2. 10 Skema PLTB Tanpa Baterai

2.8.2. Komponen Turbine Angin



Gambar 2.11 Komponen turbin angin (Hidayat, 2018)

1. Anemometer: Mengukur kecepatan angin, dan mengirim data angin ini ke Alat Pengontrol.
2. Blades (Bilah Kipas): Kebanyakan turbin angin mempunyai 2 atau 3 bilah kipas. Angin yang menghembus menyebabkan turbin tersebut berputar.
3. Brake (Rem): Suatu rem cakram yang dapat digerakkan secara mekanis, dengan tenaga listrik atau hidrolis untuk menghentikan rotor atau saat keadaan darurat.
4. Controller (Alat Pengontrol): Alat Pengontrol ini menstart turbin pada kecepatan angin kira-kira 12-25 km/jam, dan mematikannya pada kecepatan 90 km/jam. Turbin tidak beroperasi di atas 90 km/jam, karena angin terlalu kencang dapat merusaknya.
5. Gearbox (Roda Gigi): Roda gigi menaikkan putaran dari 30-60 rpm menjadi kira-kira 1000-1800 rpm yaitu putaran yang biasanya disyaratkan untuk memutar generator listrik.

6. High-speed shaft (Poros Putaran Tinggi): Menggerakkan generator.
7. Low-speed shaft (Poros Putaran Rendah): Poros turbin yang berputar kira-kira 30-60 rpm.
8. Nacelle (Rumah Mesin): Rumah mesin ini terletak di atas menara. Di dalamnya berisi gearbox, poros putaran tinggi / rendah, generator, alat pengontrol, dan alat pengereman.
9. Pitch (Sudut Bilah Kipas): Bilah kipas bisa diatur sudutnya untuk mengatur kecepatan rotor yang dikehendaki, tergantung angin terlalu rendah atau terlalu kencang.
10. Rotor: Bilah kipas bersama porosnya dinamakan rotor.
11. Tower (Menara): Menara bisa dibuat dari pipa baja, beton, rangka besi. Karena kencangnya angin bertambah dengan ketinggian, maka makin tinggi menara makin besar tenaga yang didapat.
12. Wind vane (Tebeng Angin): Mengukur arah angin, berhubungan dengan penggerak arah yang memutar arah turbin disesuaikan dengan arah angin.
13. Yaw drive (Penggerak Arah): Penggerak arah memutar turbin ke arah angin untuk Desain turbin yang menghadap angin. Untuk Desain turbin yang mendapat hembusan angin dari belakang tak memerlukan alat ini.
14. Yaw motor (Motor Penggerak Arah): Motor listrik yang menggerakkan penggerak arah.

Tabel 2.4 Tingkat kecepatan angin berdasarkan kondisi alam (A. Bachtiar & Hayyatul, 2018)

Kelas	Kecepatan (m/s)	Kondisi Alam
1	0.00-0.2	
2	0.3-1.5	Angin tenang, asap lurus ke atas
3	1.6-3.3	Asap bergerak mengikuti arah angin
4	3.4-5.4	Wajah terasa ada angin, daun-daun bergoyang pelan, penunjuk arah angin bergerak
5	5.5-7.9	Debu jalan, bertebangan, ranting pohon bergoyang
6	8.0-10.7	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
7	10.8-13.8	Ranting pohon besar bergoyang, air di kolam berombak kecil
8	13.9-17.1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
9	17.2-20.7	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan angin
10	20.8-24.4	Dapat mematahkan ranting pohon, rumah roboh
11	24.4-28.4	Dapat merobohkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28.5-32.6	Menimbulkan kerusakan parah

2.9. Hybrid Inverter System

Hybrid inverter system adalah suatu sistem elektronika untuk mengkonversi sumber listrik DC menjadi AC (*inverter*) untuk dimanfaatkan sesuai spesifikasi peralatan elektrik (120 atau 240 V AC, 50 atau 60 Hz) atau setara dengan listrik PLN dan sebaliknya (*rectifier*). Terdapat dua jenis sistem pada *Hybrid inverter sistem* yaitu *off grid* dan *on grid*. (Pradana & Mubarok, 2019)

Pemakaian *hybrid inverter system* ini berfungsi apabila pembangkit mengalami kelebihan daya maka daya lebih tersebut dapat dialirkan dan dijual kembali pada jaringan PLN sesuai dengan kesepakatan Bersama. (Ashwani Kumar, 2021)

a) *Off grid system*

Off grid system biasanya digunakan pada daerah yang belum terjangkau oleh jaringan listrik dari PLN dan merupakan sistem yang hanya menggunakan energi yang dihasilkan sendiri dari pembangkit yang dimiliki.

b) *On grid system*

On grid system yaitu sistem jaringan PLN tetap terhubung dengan sistem energi yang dimiliki. (Andrea Balluchi, 2002)

2.10. HOMER (*Hybrid Optimization Model for Energy Renewable*)

HOMER *Energy* adalah perusahaan perangkat lunak pemodelan microgrid terkemuka di dunia. Perangkat lunak microgrid HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*), salah satu tool populer untuk Desain sistem PLH menggunakan energi terbarukan. HOMER mensimulasikan dan mengoptimalkan sistem pembangkit listrik baik stand-alone (*off grid*) maupun *grid-connected* yang dapat terdiri dari kombinasi pembangkit listrik konvensional turbin angin, photovoltaic, mikrohidro, biomassa, generator (diesel/bensin), microturbine, fuel-cell, baterai, dan penyimpanan hidrogen, melayani beban listrik maupun termal. (HOMER Energy, 2012)

HOMER dapat memodelkan panel surya sebagai perangkat yang memproduksi listrik DC maupun listrik AC. HOMER menghitung daya output dari panel surya dengan menggunakan persamaan 2.1, namun apabila efek suhu sel surya di setiap time-step ikut dipertimbangkan, maka persamaan keseimbangan energi untuk array PV menjadi (A. Duffie & A. William, 1991) :

$$\tau\alpha GT = \eta C GT + UL(TC - Ta) \dots \dots \dots (2. 7)$$

Dimana :

τ = transmitansi matahari dari setiap penutup di atas array PV (%)

α = absorbansi matahari pada array PV (%)

GT = radiasi matahari yang mengenai permukaan array PV (kW/m²)

ηC = efisiensi konversi listrik dari array PV (%)

UL = koefisiensi perpindahan panas ke lingkungan sekitar (kW/m²°C)

TC = suhu sel PV (°C)

Ta = suhu lingkungan sekitar (°C).

Selain itu, HOMER memodelkan turbin angin sebagai perangkat yang mengubah energi kinetik dari angin menjadi listrik AC atau DC sesuai dengan kurva grafik daya output berdasarkan kecepatan angin pada ketinggian hub turbin. HOMER mengasumsikan bahwa kurva daya output berlaku pada kerapatan udara standar 1,225 kg/m³, yang sesuai dengan kondisi suhu dan tekanan standar. (Gilman & Lilienthal, 2006).

HOMER menghitung daya keluaran turbin angin dalam tiga langkah, yaitu:

Pertama, menentukan kecepatan angin pada ketinggian hub turbin berdasarkan data kecepatan angin yang telah ditentukan.

$$U_{hub} = U_{anem} \frac{\ln(Z_{hub}/Z_0)}{\ln(Z_{anem}/Z_0)} \dots \dots \dots (2. 13)$$

dimana

U_{hub} = kecepatan angin pada ketinggian hub turbin (m/s)

U_{anem} = kecepatan angin pada ketinggian anemometer (m/s)

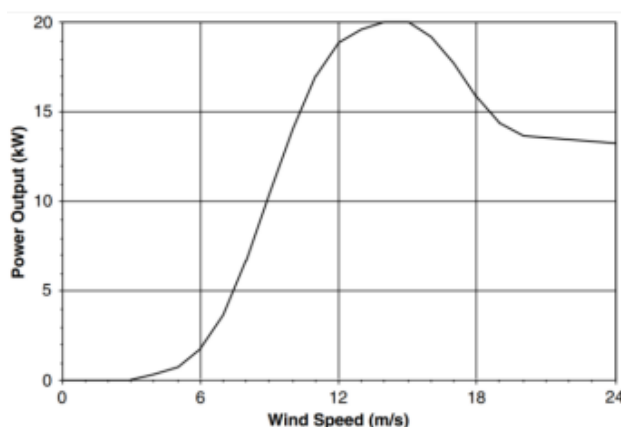
Z_{hub} = ketinggian hub turbin (m)

Z_{anem} = ketinggian anemometer (m)

Z_0 = roughness length (m)

Roughness length adalah karakteristik lanskap yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi angin pada lokasi potensial turbin angin. *Roughness length* didefinisikan sebagai ketinggian di atas tanah Z_0 dalam meter di mana kecepatan angin secara teoritis sama dengan nol (Ragheb, 2018).

Kedua menghitung daya output pada kecepatan angin tersebut mengacu pada kurva daya output dengan asumsi kerapatan udara standar.



Gambar 2.12 Kurva Daya Output Turbin Angin (Gilman & Lilienthal, 2006)

Ketiga, mengalikan nilai output daya dengan rasio kerapatan udara, yang merupakan perbandingan kerapatan udara sebenarnya dengan kerapatan udara standar.

$$P_{WTG} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \cdot P_{WTG,STP} \dots\dots\dots (2. 8)$$

dimana :

P_{WTG} = daya output turbin angin (kW)

$P_{WTG,STP}$ = daya output turbin angin pada suhu dan tekanan standar (kW)

ρ = densitas udara sebenarnya (kg/m³)

ρ_0 = densitas udara pada suhu dan tekanan standar (1,225 kg/m³).

HOMER bekerja berdasarkan pada 3 hal yaitu simulasi, optimasi dan analisa sensitivitas.

2.10.1. Simulasi

Saat melakukan simulasi, HOMER menentukan semua konfigurasi sistem yang kemudian ditampilkan berurutan menurut *net presents costs* - NPC (atau disebut juga *life cycle costs*). (F. Sheriff, D.Turcotte, 2003)

HOMER mensimulasikan operasi suatu sistem dengan membuat perhitungan keseimbangan energi di setiap langkah waktu (interval) dalam setahun. Untuk setiap langkah waktu, HOMER membandingkan permintaan listrik dan panas dalam langkah waktu itu dengan energi yang dapat disuplai sistem dalam langkah waktu tersebut, dan menghitung aliran energi ke dan dari setiap komponen sistem.

Berikutnya, HOMER melakukan perhitungan keseimbangan energi ini untuk setiap konfigurasi sistem yang ingin Anda pertimbangkan. Kemudian menentukan apakah konfigurasi layak, (yaitu, apakah dapat memenuhi permintaan listrik di bawah kondisi yang Anda tentukan), dan memperkirakan biaya pemasangan dan pengoperasian sistem selama masa proyek. Perhitungan biaya sistem memperhitungkan biaya seperti modal, penggantian, operasi dan pemeliharaan, bahan bakar, dan bunga.

Untuk sistem yang menyertakan baterai atau generator bertenaga bahan bakar, HOMER juga memutuskan dalam setiap langkah waktu, bagaimana mengoperasikan generator dan apakah akan mengisi atau mengeluarkan baterai.

2.10.2. Optimasi

HOMER Pro memiliki dua algoritma optimasi. Algoritme pencarian kisi asli mensimulasikan semua konfigurasi sistem yang layak yang ditentukan oleh Ruang Pencarian. HOMER Optimizer baru menggunakan algoritme bebas turunan eksklusif untuk mencari sistem yang paling murah.

HOMER kemudian menampilkan daftar konfigurasi, diurutkan berdasarkan biaya sekarang bersih (kadang-kadang disebut biaya siklus hidup), yang dapat Anda gunakan untuk membandingkan opsi desain sistem.

Proses optimasi dilakukan untuk menentukan konfigurasi yang optimal dalam konfigurasi sistem yang sudah disimulasikan. Sistem dikatakan optimal, apabila salah satu konfigurasi sistem menunjukkan NPC terendah untuk jangka waktu yang telah ditentukan.

Dalam optimasi ini juga ditampilkan beberapa konfigurasi komponen apa saja yang akan digunakan, jumlah dan kapasitas komponen, dan strategi pengisian baterai yang digunakan. (Kamal Kant Sharma, 2021)

2.10.3. Analisis sensitivitas

Analisa sensitivitas akan menunjukkan bagaimana hasil konfigurasi sistem yang optimal apabila nilai parameter masukan berbeda-beda. Pengguna dapat menunjukkan sensitivitas dengan memasukan beberapa nilai variabel sensitivitas.

Pada tahapan ini, pengguna HOMER dapat memasukan rentang nilai variabel tunggal maupun variabel ganda yang dinamakan variabel sensitivitas. Contohnya harga listrik pada jaringan transmisi, harga bahan bakar, suku bunga pertahun, dll.

Setiap kombinasi dari nilai variabel sensitivitas menentukan kasus sensitivitas yang berbeda, dengan contoh jika pengguna menentukan 6 nilai untuk harga listrik, dan 4 nilai untuk suku bunga bank, maka akan terjadi 23 kasus sensitivitas dan menunjukkan hasil dalam bentuk tabel grafik.

1. Analisis sensitivitas dalam keadaan tidak menentu

Analisis sensitivitas dilakukan untuk menghadapi keadaan yang berubah-ubah dan tidak menentu. Contohnya perancangan mengasumsikan harga diesel sebesar 7.500/L, kecepatan angin per tahun sebesar 4m/s, dan umur dari proyek adalah 25 tahun. Keadaan ini dikatakan tidak menentu karena harga diesel tidak stabil, dari tahun ke tahun selalu berubah tergantung kebijakan pemerintah dan kecepatan angin setiap tahun selalu berubah.

Analisa ini berfungsi untuk menentukan efek dari variasi masukan kemungkinan konfigurasi sistem, dan seberapa optimal sistem apabila masukan berubah-ubah.

2. Analisis sensitivitas berdasarkan kumpulan data per jam

Berdasarkan data setiap jam, seperti beban listrik, sumber daya angin, air, ataupun biomassa. Data-data yang dimasukan ditentukan oleh perancang, besarnya nilai dapat diatur apakah diatas atau dibawah nilai utama, sesuai dengan rentang skala yang diinginkan. Contoh perancangan menentukan data beban dengan rata-

rata per tahun 120 kWh/hari. Kemudian menentukan nilai variabel analisis sensitivitas untuk beban sebesar 100,150,200 kWh/hari. (W et al., 2018)

2.10. NPC (*Net present cost*)

Net present cost (NPC) merupakan total biaya awal yang digunakan dalam proyek pembangunan pembangkit listrik baik komponen, pemasangan, pengoperasian, bahan bakar suatu proyek.

Net present cost dapat diketahui dengan persamaan

$$NPC = Capital\ Cost + Replacement\ cost + O\&M\ cost + Fuel\ cost - salvage..(2.9)$$

dengan :

Capital cost	= biaya komponen
Replacement cost	= biaya penggantian komponen
O&M cost	= biaya operasional dan perawatan
Fuel cost	= biaya bahan bakar (generator)
Salvage	= biaya yang tersisa dari komponen

2.11. Cost Of Energy (COE)

Cost of energy merupakan biaya yang dikeluarkan untuk energi listrik per 1 kWh. COE dapat diketahui dengan membagi biaya tahunan dengan total produksi energi tahunan oleh pembangkit hibrid. Nilai COE dapat diketahui dengan persamaan 2.8

$$COE = \frac{TAC}{E_{tot\ served}} \dots\dots\dots(2.10)$$

dengan :

TAC	= biaya total tahunan pembangkit hibrid
$E_{tot\ served}$	= total energi tahunan untuk beban (kWh)

2.12. Densitas

Densitas Energi Densitas energi adalah satuan besaran energi dalam satuan luas seperti meter persegi (m^2). Rumus densitas energi adalah:

$$De = \frac{E}{S} \dots\dots\dots(2.11)$$

dengan :

De = Densitas Energi (kWh/m^2)

E = Energi (kWh)

S = Luas (m^2)

2.13 BEP (Break Event Point)

Break even point merupakan keadaan dimana nilai investasi dan pendapatan berada di titik 0, atau dapat dikatakan berada pada kondisi tidak mengalami kerugian dan tidak mengalami keuntungan. Nilai BEP diperlukan untuk dapat memperkirakan pada tahun ke berapa investor mulai mengalami keuntungan. Dikarenakan *software* Homer tidak menghitung nilai BEP, maka digunakan perhitungan secara manual.

Maka BEP dapat dihitung dan diketahui dengan persamaan sebagai berikut:

$$BEP = \frac{FC}{P-VC} \dots\dots\dots(2.12)$$

dengan :

BEP = *Break Even Point*

FC = *Fixed Cost* (Biaya ini tetap meskipun proses produksi tidak dilakukan)

VC = *Variabel Cost* (Biaya variabel bersifat dinamis sesuai dengan volume produksi)

P = *Price* per unit

Tabel 2.5 arti singkatan

SINGKATAN	ARTI SINGKATAN
PLN	Pembangkit Listrik Negara
HOMER	<i>Hybrid Optimization Model for Electric Renewables</i>
ESDM	Energi Sumber Daya Mineral
PV	<i>Photovoltaic</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
BMKG	Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
kWh	<i>kiloWatt hours</i>
m ³	<u>Meter Kubik</u>
m ²	Meter persegi
PLTS	Pembangkit Listrik Tenaga Surya
PLTB	Pembangkit Listrik Tenaga Bayu
PLTGL	Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut
m/s	<i>Meter per second</i>
W	<i>Watt</i>
Wh	<i>Watt hours</i>
Wp	<i>Watt Peak</i>
V	<i>Volt</i>
Ah	<i>Ampere hours</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
DC	<i>Direct Current</i>
NPC	<i>(Net Present Cost)</i> Semua biaya digunakan dalam pembangunan komponen, pemasangan, dan pengoprasian
COE	<i>(Cost of Energy)</i> Biaya yang dikeluarkan untuk menghasilkan listrik
<i>Initial Capital Replacement cost</i>	Biaya total pemasangan komponen pada awal proyek Biaya penggantian komponen

<i>O&M cost</i>	<i>(Operational and Maintenance cost)</i> Biaya operasional dan perawatan
<i>Salvage</i>	Biaya yang tersisa dari komponen
<i>Capital cost</i>	Biaya komponen
Rp	Rupiah
ROI	<i>Return on Investment</i>
DOD	<i>Depth of Discharge</i>
TAC	<i>Total Annualized Cost</i>
